

Vliv použité technologie laserového svařování na výsledné vlastnosti svarového spoje

Bc. Jaroslav Jíra

Diplomová práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Jaroslav Jíra
Osobní číslo:	T23303
Studijní program:	N0788A270002 Výrobní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Vliv použité technologie laserového svařování na výsledné vlastnosti svarového spoje

Zásady pro vypracování

- Vypracování literární rešerše zaměřené na technologie laserového svařování a vliv procesních parametrů svařování na výslednou kvalitu svarového spoje.
- Příprava vzorků svarových spojů za využití různých technologií laserového svařování (ručního a robotického).
- Zhodnocení kvality svarového spoje, v závislosti na použité technologii laserového svařování.

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

KOU, Sindo. *Welding metallurgy*. 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, c2003. ISBN 0471434027.

WEMAN, Klas. *Welding processes handbook*. 2nd ed. Woodhead Publishing in materials. Cambridge, UK: Woodhead Pub., 2012. ISBN 9780857095183.

DAVIM, J. Paulo a GUPTA, Kapil. *Advanced welding and deforming*. Handbooks in Advanced Manufacturing. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, [2021]. ISBN 9780128220504.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2025**
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2025**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

doc. Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 3. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení diplomové práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji, že

- jsem na diplomové práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Diplomová práce se zaměřuje na vliv použité technologie laserového svařování na vlastnosti svarového spoje. V teoretické části práce jsou popsány základní metody svařování se zaměřením na svařování pomocí laserového paprsku. V praktické části byly porovnány jednotlivé metody ručního a robotického svařování, a to na základě mechanických vlastností a dosažené struktury svaru. Ze získaných výsledků je možné dedukovat jisté rozdíly v testovaných parametrech v závislosti na použité technologii laserového svařování.

Klíčová slova: laser, svařování, robot, vzorky, mechanické vlastnosti, svařenec

ABSTRACT

The thesis focuses on the influence of the selected laser welding technology on the properties of the welded joint. The theoretical part describes the basic welding methods, with an emphasis on laser beam welding. In the practical part, various manual and robotic welding methods were compared based on the mechanical properties and the resulting weld structure. From the obtained results, certain differences in the tested parameters can be deduced depending on the applied laser welding technology.

Keywords: laser, welding, robot, samples, mechanical properties, weldment

Velké poděkování patří vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Martinu Bednaříkovi Ph. D, za jeho toleranci, ochotu, spolupráci a drahocenný čas. Další poděkování patří firmě THT Polička, konkrétně panu Janu Palovi, Josefu Zbytovskému a celému vedení firmy.

V neposlední řadě bych rád poděkoval svojí rodině za jejich podporu v průběhu studia, jak finanční, tak psychickou.

„Výzkum je to, co dělám, když nevím, co vlastně dělám.“

— *Wernher von Braun*

OBSAH

ÚVOD.....	13
I TEORETICKÁ ČÁST	14
1 SVAŘOVÁNÍ.....	15
1.1 PRINCIP	15
1.2 TYPY SVARŮ.....	16
1.2.1 Koutový svar	16
1.2.2 Tupý svar.....	17
1.2.3 Bodový svar	18
1.3 METODY TAVNÉHO SVAŘOVÁNÍ	19
1.3.1 Svařování elektrickým obloukem	19
1.3.2 Svařování plamenem	20
1.3.3 Elektronové svařování.....	22
1.4 METODY TLAKOVÉHO SVAŘOVÁNÍ.....	22
1.4.1 Odporové svařování stykové	22
1.4.2 Bodové svařování.....	23
1.4.3 Odporové svařování švové.....	24
1.5 ZÁKLADNÍ PARAMETRY SVAŘOVÁNÍ	25
1.6 MATERIÁLY A JEJICH SVAŘITELNOST	26
1.6.1 Ocel	26
1.6.2 Hliníkové slitiny.....	26
1.6.3 Titan	26
1.6.4 Měď a mosaz.....	27
1.7 DEFEKTY SVARŮ	27
1.8 APLIKACE V PRŮMYSLU	28
1.8.1 Automobilový průmysl	28
1.8.2 Stavebnictví.....	28
1.8.3 Výrobní průmysl	29
1.8.4 Ropný a plynárenský průmysl.....	29
1.8.5 Letecký průmysl.....	29
1.8.6 Lodní průmysl	30
1.8.7 Zemědělská technika	30
2 LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ.....	31
2.1 PRINCIP	31
2.2 TYPY LASERŮ	31
2.2.1 CO ₂ laser	32
2.2.2 Nd:YAG laser.....	34
2.2.3 Diodový laser	35
2.2.4 Diskový laser.....	35
2.2.5 Vláknový laser	35

2.3	APLIKACE.....	37
2.3.1	Letecký průmysl	37
2.3.2	Automobilový průmysl.....	37
2.3.3	Elektroprůmysl	37
2.3.4	Lékařství.....	38
2.4	VÝHODY A NEVÝHODY	38
3	RUČNÍ LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ.....	39
3.1	PRINCIP	39
3.2	TECHNOLOGICKÉ VYBAVENÍ PRO RUČNÍ LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ	40
3.2.1	Svařovací pistole	40
3.2.2	Laserový zdroj	41
3.2.3	Chladicí zařízení.....	41
3.3	PARAMETRY PRO RUČNÍ LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ.....	41
3.4	VÝHODY A NEVÝHODY	42
3.5	KVALITA A JAKOST SVARU	43
4	ROBOTICKÉ LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ	44
4.1	KOMPONENTY SYSTÉMU ROBOTICKÉHO SVAŘOVÁNÍ.....	44
4.1.1	Laserový zdroj	44
4.1.2	Systém pro přenos paprsku.....	45
4.1.3	Robotické rameno a svařovací hlava	45
4.1.4	Řídící a chladicí systém.....	46
4.1.5	Bezpečnostní prvky a pomocná zařízení	46
4.2	PROGRAMOVÁNÍ ROBOTICKÉHO LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ	46
4.2.1	Automatizované offline programování	46
4.2.2	Manuální programování	47
4.2.3	Programování kolaborativních robotů (cobotů)	47
4.3	VÝHODY A NEVÝHODY	48
4.4	BUDOUCÍ TRENDY ROBOTICKÝCH SVAŘOVACÍCH STROJŮ.....	49
4.4.1	Zvýšená automatizace a inteligence	49
4.4.2	Vyšší přesnost a kvalita	49
4.4.3	Flexibilní výrobní systémy	49
4.4.4	Optimalizace na základě dat.....	50
4.4.5	Modulární a multifunkční návrhy.....	50
4.4.6	Ekologická udržitelnost	50
4.4.7	Rozšíření do dalších odvětví	50
II	PRAKTICKÁ ČÁST	51
5	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	52
6	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	53
6.1	VOLBA MATERIÁLU A POLOTOVARU	53
6.2	SVAŘENÍ PLECHŮ.....	54

6.2.1	Svaření plechu pomocí ručního laserového svařování.....	55
6.2.2	Svařování plechů pomocí robotického laserového svařování	57
6.3	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES PRO ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ.....	58
6.4	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES PRO METALOGRAFICKOU ANALÝZU A URČENÍ CHEMICKÉHO SLOŽENÍ.....	61
6.4.1	Příprava metalografických preparátů	61
6.4.2	Světelná mikroskopie (LM)	61
6.4.3	Rastrovací elektronová mikroskopie (SEM).....	61
6.4.4	Analýza chemického složení	61
7	MECHANICKÉ ZKOUŠKY.....	62
7.1	TAHOVÁ ZKOUŠKA	62
7.1.1	Výsledky svarů – ruční laserové svařování s přídavným materiálem (HD)	63
7.1.2	Výsledky svarů – ruční laserové svařování bez přídavného materiálu (HB).....	64
7.1.3	Výsledky svarů – robotické svařování (R).....	66
7.2	ZKOUŠKA MIKROMECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ.....	67
7.2.1	Výsledky vtiskové tvrdosti.....	68
7.2.2	Výsledky modulu pružnosti	71
7.2.3	Výsledky hloubky vrypu	72
7.3	METALOGRAFICKÁ ANALÝZA.....	73
7.3.1	Vyhodnocení mikrostruktury	73
7.3.2	Vyhodnocení makrostruktury.....	78
7.3.3	Vyhodnocení chemické analýzy	81
8	DISKUZE NAD VÝSLEDKY	82
	ZÁVĚR	87
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	88
	SEZNAM OBRÁZKŮ	94
	SEZNAM TABULEK.....	96
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	97
	SEZNAM PŘÍLOH.....	98

ÚVOD

Laserové svařování je moderní metoda, která si v posledních desetiletích získala významné místo v různých průmyslových odvětvích. Původně se laserové technologie vyvinuly pro vědecké a vojenské účely, ale již v polovině 20. století se začaly aplikovat v průmyslových procesech. S využitím laseru pro svařování přišli vědci a inženýři na začátku 60. let, kdy začal být laser použit k usměrnění vysoké intenzity světla na konkrétní místo a tím se umožnil velmi přesný a čistý proces spojování materiálů. Postupně se technologie laserového svařování vyvinula a její využití se rozšířilo do mnoha oblastí, kde byla vyžadována vysoká kvalita svarových spojů. Laserové svařování je technologicky pokročilý proces, při kterém je materiál spojován pomocí intenzivního laserového paprsku, který generuje vysokou teplotu v místě spoje. Na rozdíl od tradičních metod, jako je elektrické obloukové svařování, nevyžaduje laserové svařování přímý kontakt mezi nástrojem a materiálem, což minimalizuje mechanické namáhání a tím i riziko deformace. S tímto způsobem svařování je možné dosáhnout velmi precizních spojů s minimálním ovlivněním okolí svaru, což znamená, že materiál zůstává většinou nezměněn a zachovává si své původní vlastnosti. Tato schopnost přesného řízení tepelného vstupu je jednou z hlavních výhod laserového svařování, která ho odlišuje od tradičních metod. Významnou výhodou této technologie je možnost práce s různými materiály. Klasické svařování může být omezeno typem materiálu nebo tloušťkou, kterou lze svařovat efektivně, zatímco laserové svařování je schopno spojujícími procesy pracovat i s tenkými materiály, které jsou náchylné k poškození tradičními metodami. To zahrnuje například nerezovou ocel, hliník, titan nebo jiné lehké a vysoce pevné materiály. S laserem je také možné dosahovat vyšších teplot v úzkém místě svaru, což minimalizuje rozšíření tepelného ovlivnění na okolí a tím i riziko deformací materiálů. Historie laserového svařování je spojena s neustálým zlepšováním laserových technologií a se vznikem nových typů laserových zdrojů. Dnes se pro tuto metodu používají především vláknové a pevné lasery, které jsou nejen efektivní, ale i snadno ovladatelné, navíc s benefitem minimální údržby. V průběhu let se také zdokonalily optické systémy pro přenos laserového paprsku a zlepšily se metody řízení celého svařovacího procesu, což umožnilo dosažení vyšší kvality svarů a snížení výrobních nákladů. Využití laserového svařování dnes zahrnuje širokou škálu průmyslových odvětví, jako je automobilový průmysl, letecký průmysl, elektronika, a další.

I TEORETICKÁ ČÁST

1 SVAŘOVÁNÍ

Oblast svařovacích procesů hraje významnou roli ve strojírenském navrhování a výrobních činnostech. Obecná univerzálnost a v některých případech i jejich sofistikovanost umožňuje konstruktérům vytvářet širokou škálu výrobků, které splňují jejich konstrukční záměr. [1]

Technologie svařování je proces určený k vytvoření trvalého, nerozebíratelného spoje. Tento proces zahrnuje spojování kovů prostřednictvím tepla, které dosahuje teploty tavení, nebo pomocí tlaku, jenž způsobuje deformaci kontaktních ploch. [2]

1.1 Princip

Při tavném svařování se vytváří dostatečné teplo k vytvoření a udržení roztavené lázně kovu požadované velikosti. Teplo může být dodáváno elektřinou nebo plynovým plamenem. Elektrické odporové svařování lze považovat za tavné svařování, protože při něm vzniká určitá část roztaveného kovu. Základní klasifikaci metod svařování určují příslušné normy. [3]

Tabulka 1 Číselné označení vybraných metod svařování

Metoda svařování	Číselné označení
Obloukové svařování obalenou elektrodou	11
Obloukové svařování plněnou elektrodou bez ochranného plynu	114
Obloukové svařování pod tavidlem	12
Obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu (MIG svařování)	131
Obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu (MAG svařování)	135
Obloukové svařování plněnou elektrodou v aktivním plynu	136
Obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu (WIG, TIG svařování)	141

Plamenové svařování s kyslíkem	31
Laserové svařování	52
Svařování plazmou	15
Odporové bodové svařování	21

(zdroj: vlastní)

1.2 Typy svarů

Typy spojů se volí s ohledem na způsob svařování a tloušťku plechu. Ideální spoj poskytuje požadovanou pevnost a kvalitu konstrukce bez zbytečně velkého objemu spoje, protože náklady na svařování s velikostí spoje rostou. [3; 4]

Pro základní aplikace se používá vícero základních typů svarových spojů (Obrázek 1), ale za nejpoužívanější typy se považuje: tupý, koutový, svar typu V, lemový a bodový. [4; 5]

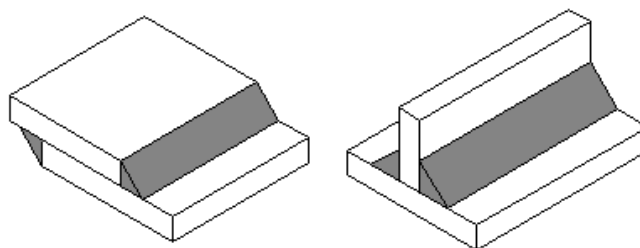
Svar	Zobrazení	Značka	Svar	Zobrazení	Značka	Svar	Zobrazení	Značka
I			W		W	švový		
V		V	U		U	bodový		
1/2 V		1/2 V	1/2 U		1/2 U	děrový		
Y		Y	lemový		Y	oblý V		
1/2 Y		1/2 Y	koutový		1/2 Y	oblý 1/2 V		

Obrázek 1 Základní značky svarů

(zdroj: [5])

1.2.1 Koutový svar

Koutový svar (Obrázek 2) je typ svaru, který se používá především ke spojení dvou kusů kovu pod úhlem, obvykle 90 stupňů. Tato technika svařování vytváří trojúhelníkový průřez, který vyplňuje mezeru mezi oběma součástmi a zajišťuje strukturální celistvost a pevnost spoje. [10; 11; 12]



Obrázek 2 Koutový svar

(zdroj: [6])

Typy koutových svarů:

- a) Jednoduchý koutový svar (používá se na jedné straně spoje).
- b) Dvojitý koutový svar (používá se na obou stranách spoje pro zvýšení pevnosti).
- c) Přerušovaný koutový svar (používá se spíše po částech, než souvisle podél spoje, často se vyskytuje u dlouhých spojů při nižším namáhání). [7]

Výpočtové vztahy svarových spojů s koutovými svary:

- a) Namáhání na smyk

$$\tau_s = \frac{F}{S} \leq \tau'_{Ds} \rightarrow \tau_s = \frac{F}{2 \cdot 0,7 \cdot t \cdot l} \leq \tau'_{Ds} \quad (1)$$

- b) Namáhání na krut

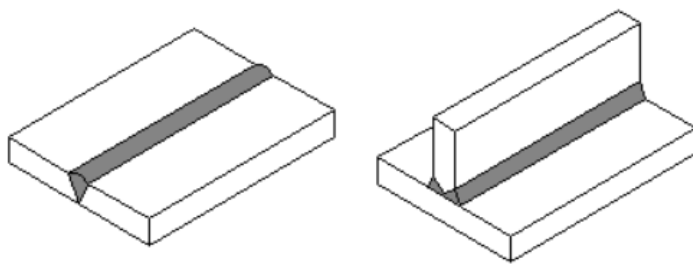
$$\tau_k = \frac{M_k}{W_k} \leq \tau'_{Dk} \rightarrow \tau_k = \frac{M_k}{\frac{\pi}{16} \cdot \frac{D_1^4 - d^4}{D_1}} \leq \tau'_{Dk} \quad (2)$$

- c) Namáhání na ohyb

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} \leq \sigma'_{Do} \rightarrow \sigma_o = \frac{M_o}{2 \cdot \frac{1}{6} \cdot (0,7 \cdot t)^2 \cdot l_1^2} \leq \sigma'_{Do} \quad (3)$$

1.2.2 Tupý svar

Tupý svar (Obrázek 3) je druh spoje, kde jsou využity čela obou součástí (trubky nebo plechu). Jejich velká výhoda spočívá v jejich vysoké pevnosti a přesnosti. Pro své dobré mechanické vlastnosti, je tento spoj využíván v automobilovém průmyslu při svařování karoserií, nebo při svařování potrubí a velkých tlakových nádob. [8]



Obrázek 3 Tupý svar

(zdroj: [6])

Typy tupých svarů:

- d) Tupý svar s V drážkou (využití pro středně silné materiály).
- e) Tupý svar s dvojitou V drážkou (využití pro silné materiály).
- f) Tupý svar s K drážkou (využití pro napojení čela součásti kolmo k druhé součásti).

Výpočtové vztahy svarových spojů s koutovými svary:

- a) Namáhání na smyk

$$\tau_s = \frac{F}{S} \leq \tau'_{Ds} \rightarrow \tau_s = \frac{F}{l \cdot s} \leq \tau'_{Ds} \quad (4)$$

- b) Namáhání na tah-tlak

$$\sigma_t = \frac{F}{S} \leq \sigma'_{Dt} \rightarrow \sigma_t = \frac{F}{l \cdot s} \leq \sigma'_{Dt} \quad (5)$$

- c) Namáhání na ohyb

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} \leq \sigma'_{Do} \rightarrow \sigma_o = \frac{M_o}{\frac{l \cdot s^2}{6}} \leq \sigma'_{Do} \quad (6)$$

1.2.3 Bodový svar

Bodové svařování (Obrázek 4) se používá především při svařování plechů o malé tloušťce, kde dojde k úplnému provaření a zároveň spojení obou plechů. [8]



Obrázek 4 Bodový svar

*(zdroj: [13])*Typy bodových svarů:

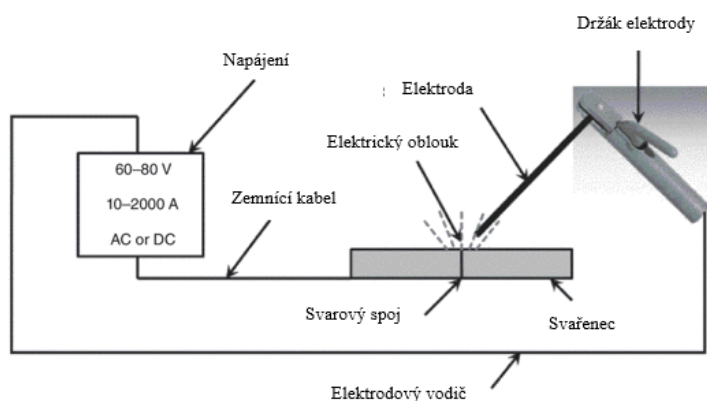
- g) Jednoduchý bodový svar.
- h) Vícenásobný bodový svar – více svarů na jednom místě, využívá se z důvodů zpevnění spoje.
- i) Vícevrstvý bodový svar – provaření více vrstev materiálu.

1.3 Metody tavného svařování

Hlavní princip těchto metod spočívá v tom, že dochází ke spojení součástí vlivem roztavení styčných ploch a přídavného materiálu. [9]

1.3.1 Svařování elektrickým obloukem

Obloukové svařování probíhá tak, že se mezi elektrodou a svařencem vytvoří elektrický oblouk (Obrázek 5). Při tomto procesu vznikají extrémní teploty, které často přesahují 3600 °C, což vede k tavení kovů ve spoji. Roztavený kov pak po ochlazení tuhne a vytváří pevný spoj mezi obrobky. [3]



Obrázek 5 Schéma svařování elektrickým obloukem

(zdroj: vlastní)

Provozní napětí oblouku se obvykle pohybuje v rozmezí 10–40 V. Napětí závisí na délce oblouku (delší oblouky mají vyšší napětí, zatímco kratší oblouky nižší). [3]

Ochrana svaru je nezbytná k zabránění kontaminace atmosférickými plyny (např. kyslíkem, dusíkem, vodíkem). Používají se buď ochranné plyny (argon, helium, CO₂), nebo tavidla, která chrání svarovou lázeň a odstraňují nečistoty. [3]

Důležité součásti zařízení:

- j) **Elektroda**, která může být spotřební (taje a přidává přídavný materiál) nebo nespotební (netaje). [3]
- k) **Zdroj energie**, který zajišťuje buď stejnosměrný (DC), nebo střídavý proud (AC) pro vytvoření oblouku. [3]
- l) **Ochrana**, pro kterou se používají různé plyny nebo tavidla sloužící k ochraně svarové lázně před kontaminací z okolního prostředí. [3]

Nejběžnější procesy obloukového svařování:

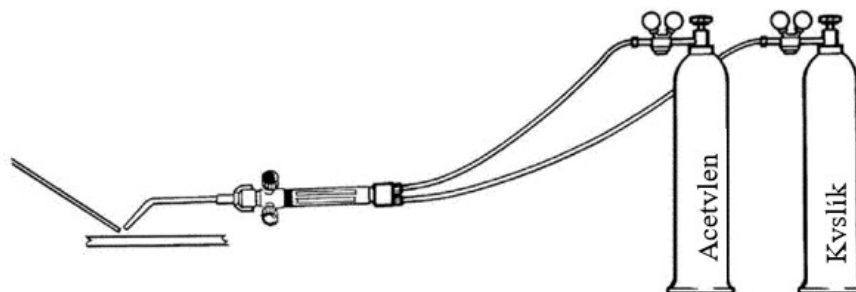
- m) ruční obloukové svařování s obalenou elektrodou,
- n) plynem chráněné obloukové svařování (MIG/MAG),
- o) obloukové svařování wolframovou elektrodou (TIG),
- p) plazmové obloukové svařování,
- q) svařování pod tavidlem.

1.3.2 Svařování plamenem

Svařování kyslíkem a acetylenem je jednou z nejstarších metod svařování a po mnoho let byla nejpoužívanější svařovací technikou. Dnes se používá mnohem méně. Přesto se jedná o univerzální metodu, která využívá jednoduché a relativně levné vybavení. Je vhodná pro opravy a stavební práce, pro svařování trubek a konstrukcí s tloušťkou stěny 0,5 až 6 mm a pro materiály zvláště náchylné k praskání, jako je litina. Používá se také pro svařování neželezných kovů. [10; 3]

Kromě svařování se tato technika často používá k řezání a je také velmi užitečná pro ohřev a rovnání materiálů. Teplo vzniká spalováním acetyleny v kyslíku, což dává plamen o teplotě přibližně 3100 °C. To je nižší teplota než u elektrického oblouku a vytváří také

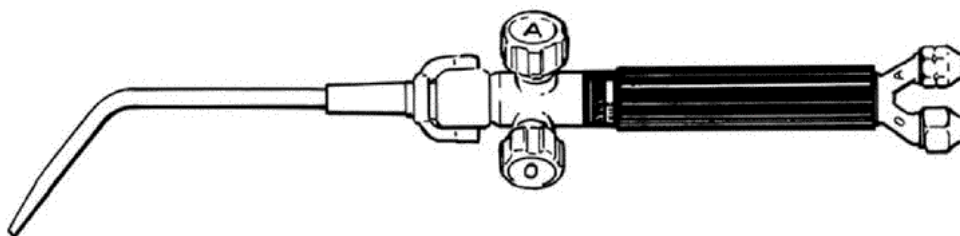
méně koncentrované teplo. Plamen je veden na povrchy spoje, které se roztaví, a poté lze podle potřeby přidávat výplňový materiál. [3]



Obrázek 6 Schéma plamenového svařování

(zdroj: [3])

Tavenina je chráněna před vzduchem redukčními vnějšími zónami plamene. Plamen by proto měl být po dokončení svaru pomalu odstraněn. Méně koncentrovaný plamen má za následek pomalejší ochlazování, což je výhodou při svařování ocelí, které mají tendenci tvrdnout, i když díky tomu je metoda relativně pomalá, s vyšším tepelným příkonem a zvýšeným rizikem tepelných pnutí a deformací. [11; 3]



Obrázek 7 Svařovací hořák

(zdroj: [3])

Rozlišujeme dva typy svařovacích hořáků: injektorové hořáky pro nízkotlaký acetylen a středotlaké hořáky pro vysokotlaký acetylen. U vysokotlakých hořáků jsou proudy acetylenu a kyslíku poháněny tlakem v jejich zásobních lahvích a mísí se v části hořáku se směšovací komorou. U nízkotlakých hořáků proudí kyslík do hořáku středovým paprskem a vytváří vstřikovací efekt, který nasává acetylen z okolního připojení. Odtud plyny před spalováním pokračují do směšovací části svařovacího hořáku. [11; 3; 7]

1.3.3 Elektronové svařování

Svařování elektronovým svazkem je proces, který vytváří svazek urychlených a zaostřených elektronů. Intenzivní ohřev vznikající při svařování je spojen s kinetickou energií, která vzniká při dopadu elektronů urychlených na přibližně 70 % rychlosti světla, na svařovaný díl. Objem elektronů vytvářejících tento ohřev je překvapivě nízký, protože proudy svazku jsou obvykle nižší než 1 A. Elektrony jsou urychlovány přes sloupec pistole působením extrémně vysokého napětí (až 200 kV) mezi katodou a anodou. [13]

Svařování se obvykle provádí ve vakuu, což omezuje jeho použití v prostředí s vysokou výrobou. Při svařování titanu však může být vakuum výhodné, protože je známo, že titan je při svařování obloukovými procesy velmi citlivý na křehnutí. Elektronové paprsky při dopadu na svařovaný díl produkují nebezpečné rentgenové záření, proto musí být svařovací komory řádně stíněny. [13]

Elektronové svařování paprskem je jedním z nejefektivnějších metod tavného svařování, pokud jde o hloubku průvaru při jednom průchodu. Tato metoda umožňuje jednoplošné svařování kovů o tloušťce větší než 254 mm, v závislosti na materiálu. Výsledné svary jsou nejen funkční, ale často také esteticky velmi kvalitní. [13]

Zařízení pro elektronové svařování paprskem se vyrábějí buď jako vysokonapěťové systémy (např. 150 kV), nebo nízkonapěťové systémy (např. 60 kV). Cena těchto zařízení závisí na velikosti komory a výkonu stroje. Vysokonapěťové systémy jsou nejdražší, ale umožňují nejhlubší průvary. Stroje s většími komorami umožňují svařování větších dílů, avšak jsou nákladnější a vyžadují delší dobu pro odsávání vzduchu z komory. [13]

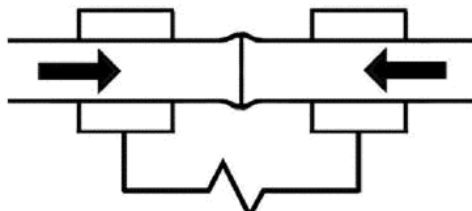
1.4 Metody tlakového svařování

Metoda tlakového svařování je proces, při kterém se spojení materiálů dosahuje působením tlaku. Tento proces může být prováděn za studena nebo za tepla, které pomáhá usnadnit spojení materiálů. Hlavním principem je mechanické spojení povrchů, často prostřednictvím plastické deformace nebo jiných fyzikálních změn, bez nutnosti použití přídavného materiálu. [3]

1.4.1 Odporové svařování stykové

Odporové svařování konců (Obrázek 8) se používá pro svařování tyčí nebo drátů, například při svařování drátěných košů, nákupních vozíků nebo drátěných regálů používaných v

pecích. Tato metoda může být využita pro svařování oceli, mědi, hliníku a jeho slitin, stejně jako pro zlato, stříbro a zinek. [14; 3]



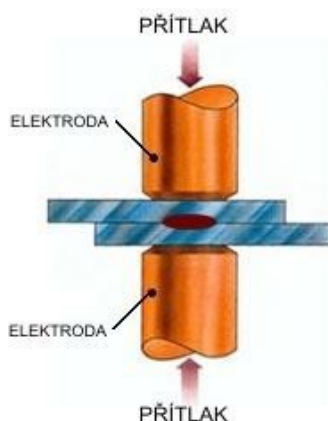
Obrázek 8 Odporové svařování stykové

(zdroj: [3])

Konce materiálů jsou stlačeny k sobě a prochází jimi elektrický proud. Teplota na kontaktní odporové ploše vzroste natolik, že materiál změkne do plastického stavu a obě části mohou být spojeny. Maximální kontaktní plocha je obvykle uváděna na přibližně 150 mm². Horní limit je určen schopností svářecího zařízení zajistit rovnoměrné rozložení tepla na všechny části spoje. Dolní limit je stanoven praktičností manipulace s materiálem, kdy v případě ocelového drátu se za nejmenší velikost považuje přibližně průměr 0,2 mm. [14; 3]

1.4.2 Bodové svařování

V principu se jedná o to, že dvě elektrody, kterými prochází elektrický proud, přitlačí k sobě dva plechy a vlivem odporu dojde vytvoření pevného spoje (Obrázek 9). Bodové svařování je nejznámější metodou odporového svařování. Používá se k spojování tenkých plechů pomocí přesahových spojů a je široce využíváno, například v automobilovém průmyslu. [10; 3]



Obrázek 9 Bodové svařování

(zdroj: [15])

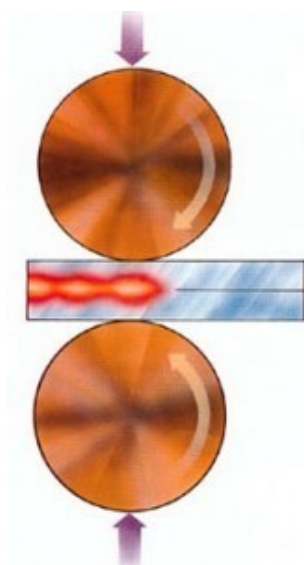
Bodové svařování má tedy několik výhod oproti jiným metodám svařování plechů, například:

- r) **Malá deformace pracovního kusu**, protože tepelná energie je více či méně omezena na bezprostřední okolí svaru. [3; 16]
- s) **Velmi vysoká výrobní rychlost** pro mechanizované procesy. Například bodové svařování plechu o tloušťce 1 + 1 mm trvá přibližně 0,20 s. [3; 16]
- t) **Nízké energetické nároky** a minimální znečištění, protože nejsou potřeba žádné přídavné materiály. Tato technika má tedy menší dopad na životní prostředí než svařování obloukem. [16]

1.4.3 Odporové svařování švové

Odporové svařování švové se používá podobně jako bodové svařování a funguje v základu na stejném principu. Rozdíl spočívá v tom, že jsou použity dvě kola-elektrody, které se pohybují podél (a obvykle i posouvají) pracovního kusu (Obrázek 10). [14]

Obě kola by měla mít stejnou velikost, aby se zabránilo odchylce směrem k jednomu z nich. Skutečný profil kontaktu lze navrhnout různými způsoby, aby vyhovoval tvaru svařovaného dílu. Proud může během svařování protékat nepřetržitě, nebo přerušovaně, čímž se vytvoří řada bodů, které jsou tak blízko sebe, že vytvářejí jeden kontinuální svar. [14]



Obrázek 10 Odporové svařování švové

(zdroj: [17])

Jak elektrody (kola) rotují, není nutné je zvedat mezi jednotlivými body, jak je tomu u bodového svařování. Pokud svařování nemusí být kontinuální, lze svary také umístit v pravidelných vzdálenostech od sebe. To znamená, že svařování může probíhat rychleji než běžné bodové svařování. [14]

1.5 Základní parametry svařování

Pro vytvoření kvalitního svarového spoje je důležité průběžně kontrolovat svar před, během a po svařování a parametry svařování mohou tomuto procesu napomoci. Parametry jsou proměnné, neboť řídí rychlost a kvalitu ukládání svarového materiálu. Při svařování je klíčové správně nastavit několik základních parametrů, které ovlivňují kvalitu a pevnost svaru. Mezi tyto parametry patří: [18]

- u) Svařovací proud, který ovlivňuje hloubku průvaru a kvalitu svaru. Přesné nastavení proudu je zásadní pro dosažení požadovaných vlastností. [18]
- v) Délka oblouku, která určuje stabilitu oblouku a vzhled svaru. Pokud je oblouk příliš dlouhý, může dojít k rozstříku a tvorbě pórů, zatímco příliš krátký oblouk vede k nestabilnímu svařovacímu procesu. [18]
- w) Využití výkonu svařovacího nástroje, který vyjadřuje (v procentech) jak moc bude stroj pro určitý typ svaru využitý. [18]
- x) Úhel elektrody nebo hořáku (vůči materiálu), který má přímý vliv na průvar a geometrii svaru. Optimální úhel je klíčový pro získání kvalitního svarového spoje. [18]
- y) Pohyby během svařování (správná technika pohybu elektrody nebo hořáku zajišťuje rovnoměrnou kvalitu svaru). [18]
- z) Rychlost svařování, která ovlivňuje množství tepla přeneseného do materiálu. Příliš vysoká rychlost může vést k nedostatečné penetraci, zatímco příliš pomalá rychlost způsobuje nadměrné přehřívání. [18]

Faktory ovlivňující svařitelnost materiálu

- aa) Chemické složení: Přítomnost prvků, jako je uhlík, chrom a nikl, ovlivňuje kalitelnost a náchylnost k praskání. [19; 20; 20]
- bb) Tepelný příkon: Množství tepla aplikovaného během svařování ovlivňuje rychlost ochlazování, což má vliv na tvrdost a riziko praskání. [19; 20]

cc) Svařovací proces: Různé procesy (např. MIG, TIG) generují různé množství vodíku, což ovlivňuje kvalitu svaru. [19; 20]

dd) Tloušťka materiálu: Tlustší materiály vyžadují odlišný přístup oproti tenčím polotovarům, protože u nich hrozí větší riziko vzniku vad. [19; 20]

1.6 Materiály a jejich svařitelnost

Svařitelnost označuje schopnost materiálu být svařen bez vzniku vad, jako jsou trhliny, a zároveň dosáhnout požadovaných mechanických vlastností pro dané použití. Tato vlastnost se výrazně liší mezi jednotlivými materiály a je ovlivněna chemickým složením, mikrostrukturou a použitým svařovacím procesem. [19; 20]

1.6.1 Ocel

ee) Nízkouhlíková ocel je obecně snadno svařitelná, s minimálním rizikem trhlín. Při vyšších tloušťkách je však nutné přijmout opatření, jako je např. předehřev. [19; 20]

ff) Vysokouhlíková ocel je náročnější na svařování kvůli vyšší kalitelnosti, která zvyšuje náchylnost k trhlinám při tuhnutí. Obvykle je vyžadován předehřev a tepelná úprava po svaření. [19; 20]

gg) Nerezová ocel: Austenitické nerezové oceli mají obvykle vyšší svařitelnost, ale snadno se deformují vlivem vysoké tepelné roztažnosti. Feritické a martenzitické třídy vyžadují zvláštní postupy a předehřev. [19; 20]

1.6.2 Hliníkové slitiny

Hliník představuje výzvu při svařování kvůli vysoké tepelné vodivosti a náchylnosti k praskání při vysokých teplotách. K omezení těchto problémů pomáhají techniky, jako je zvýšení rychlosti svařování a správné navrhování svarových spojů. [19; 20]

1.6.3 Titan

Titan je známý svou pevností a odolností proti korozi, ale jeho svařování je obtížné kvůli vysoké reaktivitě při zvýšených teplotách. Často se používají speciální metody, jako je svařování wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře. [19; 20]

1.6.4 Měď a mosaz

Tyto materiály jsou snadno obrobitelné, ale náchylné k praskání při svařování kvůli vysoké tepelné vodivosti. Problémům lze předcházet použitím TIG svařování s kompatibilními přídavnými materiály. [19; 20]

1.7 Defekty svarů

Kvalita je relativní pojem, což znamená, že různé svařované součásti a jednotlivé svary mohou mít odlišné úrovně kvality v závislosti na požadavcích konkrétní aplikace. Kvalita zahrnuje faktory, jako je tvrdost, chemické složení a mechanické vlastnosti. [21; 13]

Přijatelná kvalita znamená, že svařovaná konstrukce splňuje následující kritéria:

- hh) Je adekvátně navržena tak, aby splňovala požadované provozní podmínky po stanovenou dobu životnosti. [21; 13]
- ii) Je vyrobena ze specifikovaných materiálů a odpovídá navrženým konstrukčním zásadám. [21; 13]
- jj) Je provozována a udržována správně, aby byla zajištěna její funkčnost a životnost. [21; 13]

Kvalita svaru a následně i svařenců je navržena již v počáteční fázi procesu technického návrhu. Technická specifikace nebo norma stanovuje minimální přijatelnou úroveň vad ve svaru, což znamená maximální délku, plochu a hloubku určitých typů vad, které lze akceptovat, aniž by byla ohrožena funkčnost svařence. To je možné pouze za předpokladu, že návrháři mají znalosti o metodách zkoušení, jejich omezeních a požadavcích na funkčnost svařence. [21; 13]

K dispozici je několik směrnic a povinných specifikací pro kontrolu a zkoušení svarů, které se zaměřují na různé technické oblasti. Mezi významné příklady patří:

- kk) ČSN EN ISO 17637, která se věnuje vizuální zkoušce tavných svarů [11],
- ll) ČSN EN ISO 6520, která se věnuje geometrickým vadám kovových materiálů [11],
- mm) ČSN EN 13480, která se věnuje kovovým průmyslovým potrubním systémům [11],
- nn) ČSN EN 12732, která stanovuje požadavky na svařování ocelových potrubí pro přepravu hořlavých kapalin a plynů [11],

oo) ČSN EN 1090-2, která stanovuje technické požadavky na provádění ocelových konstrukcí [11].

1.8 Aplikace v průmyslu

Pokroky ve svařovací technice dále zvýšily její význam v průmyslových aplikacích. Tyto pokroky vedly k vývoji účinnějších a přesnějších svařovacích technik, což vedlo ke zvýšení produktivity a kvality. [22]

1.8.1 Automobilový průmysl

Svařování hraje klíčovou roli při výrobě vozidel a jejich jednotlivých komponentů, přičemž jeho hlavní aplikace zahrnují spojování dílů podvozku a rámu, což zajišťuje strukturální pevnost vozidla. Další důležitou oblastí je svařování karoserií (Obrázek 11), které je nezbytné nejen pro estetiku, ale také pro aerodynamiku vozů. Neméně důležité je i využití svařování při výrobě výfukových systémů, které jsou klíčové pro kontrolu emisí. [22]



Obrázek 11 Svařování karoserie

(zdroj: [23])

1.8.2 Stavebnictví

Ve stavebnictví se svařování intenzivně využívá při budování i údržbě různorodé infrastruktury. Mezi nejčastější aplikace patří svařování ocelových nosníků, které poskytují nezbytnou podporu budovám a mostům. Další zásadní oblastí je spojování kovových potrubí, což se využívá v instalatérství, kde je klíčová těsnost spojů. Svařování také umožňuje efektivní opravy poškozených konstrukcí, což je důležité pro prodloužení životnosti staveb. [22]



Obrázek 12 Svařené ocelové konstrukce

(zdroj: [24])

1.8.3 Výrobní průmysl

V oblasti výroby je svařování nezbytné při výrobě strojů a spotřebního zboží. Například při svařování dílů průmyslových strojů se zajišťuje jejich funkčnost a dlouhodobá spolehlivost. Svařování se také běžně využívá při výrobě domácích spotřebičů, jako jsou lednice, sporáky nebo mikrovlnné trouby, a přispívá k jejich robustnosti. Důležitou roli hraje také při montáži elektronických zařízení, kde umožňuje spojování klíčových komponent, jako jsou desky plošných spojů. [22]

1.8.4 Ropný a plynárenský průmysl

Svařování je v ropném a plynárenském sektoru klíčové, neboť umožňuje konstrukci robustních struktur. Jednou z hlavních aplikací je svařování potrubí, které je nezbytné pro bezpečný transport ropy a plynu na dlouhé vzdálenosti. Další klíčovou oblastí je výroba skladovacích nádrží, které zajišťují bezpečné uchování nebezpečných materiálů. Neméně důležitá je i údržba offshore platforem, kde svařování hraje roli při zajištění provozu v náročných mořských podmínkách. [22]

1.8.5 Letecký průmysl

V letectví je svařování nenahraditelné, neboť vyžaduje vysokou preciznost a dodržování přísných bezpečnostních standardů. Mezi aplikace patří svařování součástí letadel, které zajišťuje jejich strukturální integritu a odolnost v extrémních podmínkách. Další oblastí je

výroba součástí vesmírných lodí, kde jsou nutné speciální techniky pro zpracování lehkých a vysoce odolných materiálů. [22]

1.8.6 Lodní průmysl

V lodním průmyslu je svařování tradiční metodou, která se používá již od průmyslové revoluce. Jednou z klíčových aplikací je tvorba vodotěsných povrchů, které jsou nezbytné pro bezpečnost plavidel (Obrázek 13). Důležité je také upevnění vnitřních komponent, jako jsou poklopy, potrubí nebo ovládací panely, které jsou klíčové pro provoz lodi. [22]



Obrázek 13 Svařování v lodním průmyslu

(zdroj: [27])

1.8.7 Zemědělská technika

Svařování se v zemědělství široce využívá při výrobě strojů, které podporují produkci potravin. Jednou z hlavních aplikací je svařování rámu zemědělských strojů, což zajišťuje jejich odolnost při těžkém nasazení. Další důležitou oblastí je spojování komponent speciálních nástrojů, jako jsou mlátičky nebo rozmetadla, které umožňují efektivní zpracování plodin. [22]

2 LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ

Laserové svařování je pokročilá metoda spojování, která využívá vysoce energetický laserový paprsek k tavení materiálů, především kovů a termoplastů. Díky své přesnosti, rychlosti a schopnosti vytvářet silné spoje s minimálními tepelně ovlivněnými zónami, je stále více preferována v různých průmyslových odvětvích. [16; 28]

2.1 Princip

Proces laserového svařování spočívá v zaostření koncentrovaného laserového paprsku na spoj mezi dvěma nebo více materiály. Intenzivní energie z laseru zahřívá materiály na jejich bod tavení. Vzniká tavná lázeň, která po vychladnutí ztvdne a vytvoří silné spojení. Mezi hlavní kroky procesu patří příprava, která zahrnuje čisté a přesné umístění svařovaných dílů bez mezer. Dalším krokem je zaostření laseru na svařovanou oblast pomocí optického zařízení. Při svařování se laserový paprsek pohybuje podél spoje a taje přední hrana materiálu. Po dokončení svařování necháme materiál přirozeně vychladnout nebo použijeme dodatečné chlazení. [28]

Laserové svařování může probíhat v různých režimech podle hustoty použité energie. V režimu vedení pracuje laser pod bodem vypařování materiálu. To vede k mělkému průvaru a širším svarům, které jsou vhodné pro spoje, které nevyžadují vysokou pevnost. V režimu „klíčové díry“ se používají vysoké hustoty energie k vypaření malého objemu kovu, což umožňuje vytvářet hluboké a úzké svary. Tento režim je efektivní pro silnější materiály a vytváří minimální deformace. [28]

2.2 Typy laserů

Pro tento proces existuje několik typů laserů, které se liší svými vlastnostmi a aplikacemi. Mezi nejběžnější typy laserů používané v laserovém svařování patří pevné lasery, jako jsou lasery s pevným médiem a plynové lasery, jako jsou CO₂ lasery. Každý z těchto typů laserů má své výhody a limity, které je nutné zvážit v závislosti na materiálu, tloušťce svařovaných dílů a požadavcích na kvalitu svaru. [28] V následující tabulce 2 bude možné vidět přehled typů laserů a jeho charakteristika.

Tabulka 2.: Přehled typů laserů

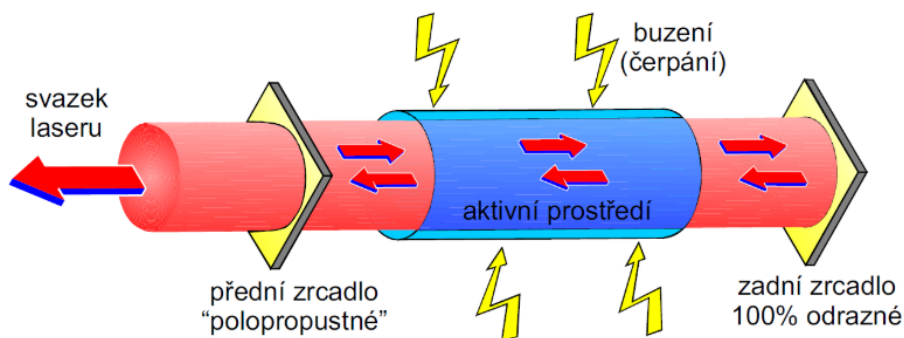
Typ laseru	Charakteristika laseru
CO ₂ laser	Vlnová délka: 10,6 μm Laserové médium: plyn Výkon: 50 kW (max.), 1-15 kW (norm.) Životnost: až 20 000 hodin
Nd:YAG	Vlnová délka: 1,06 μm Laserové médium: pevné Výkon: 10 kW (max.), 50 W–7 kW (norm.) Životnost: až 10 000 hodin
Diodový laser	Vlnová délka: 0,8–1,1 μm Laserové médium: pevné Výkon: 10 kW- 15 kW (maximální) Životnost: až 15 000 hodin
Diskový laser	Vlnová délka: 1,03 μm Laserové médium: pevné Výkon: 16 kW Životnost: 10 000 hodin
Vláknový laser	Vlnová délka: 1,07 μm Laserové médium: pevné Výkon: 100 kW Životnost: 100 000 hodin

(zdroj: [28])

2.2.1 CO₂ laser

CO₂ laser generuje světlo v trubici, kterou protéká směs plynů (včetně CO₂), produkuje vlnovou délku 10,6 μm (Obrázek 14 a 15). Energetický vstup je zajištěn elektrickým výbojem skrz plyn. Laser dokáže dosáhnout vysokého výkonu, a proto je oblíbený pro aplikace svařování a řezání. [28; 29]

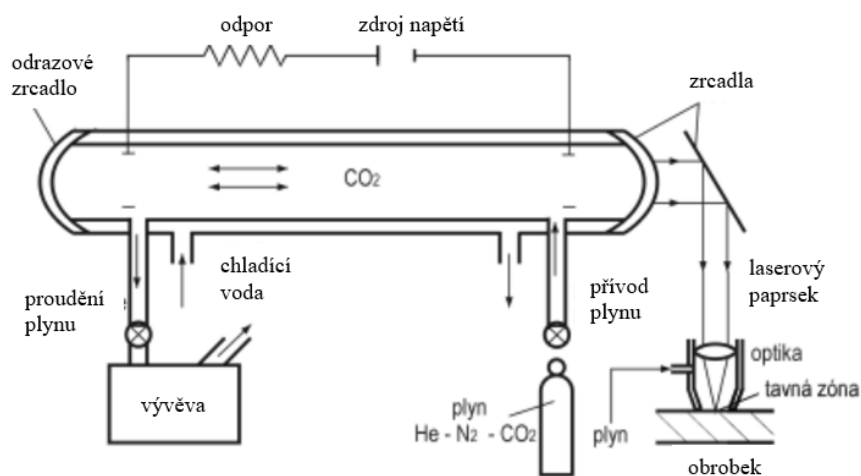
Světlo je obvykle vedeno ke svařovací hlavě a zaostřováno pomocí zrcadel. K ochraně čočky a svaru se používá ochranný plyn (často helium nebo směs argonu a helia). Tento plyn pomáhá omezit množství energie absorbuující plazmy, která se tvoří nad povrchem spoje. Pro tento účel je preferováno helium kvůli své vysoké ionizační energii. [28; 29]



Obrázek 14 Základní schéma laseru

(zdroj: [30])

V současné době dostupné CO₂ lasery mají vyšší výkon než Nd:YAG lasery. Protože rychlost svařování je úměrná výkonu, CO₂ lasery mohou svařovat rychleji. Vyšší výkon také umožňuje svařovat desky o tloušťce až 26 mm. Nevýhodou však je vysoký podíl energie paprsku, který se odráží od některých materiálů. Různé vlnové délky jsou absorbovány v různé míře, což znamená, že světlo z CO₂ laserů se odráží snadněji než světlo z YAG laserů. To je zvláště patrné při svařování materiálů, jako jsou slitiny hliníku nebo hořčíku. Pomocí CO₂ laserů jsou dále obtížně svařovatelné materiály jako zlato, stříbro, aj. [28; 29]



Obrázek 15 Schéma CO₂ laseru

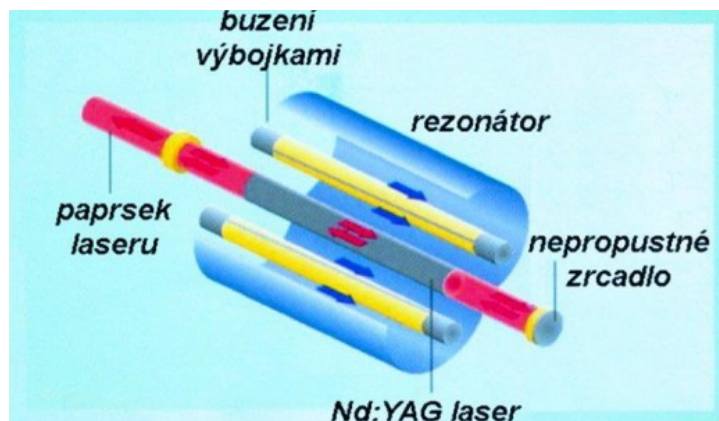
(zdroj: [31])

Celkové provozní náklady se skládají z nákladů na elektrickou energii, ochranný plyn, laserový plyn a údržbu optického systému, např. zrcadel. Celková účinnost je nízká, pouze kolem 10 %. Pro osobní ochranu postačuje jednoduchý pár brýlí, který dokáže absorbovat světlo z CO₂ laseru a chránit rohovku před poškozením. [28; 29]

2.2.2 Nd:YAG laser

Nd:YAG laser (neodymium-doped yttrium aluminum garnet) je pevnolátkový laser obvykle ve tvaru tyče, pracující na vlnové délce 1,06 μm (Obrázek 16). Aktivní složkou jsou ionty neodymu, přítomné v malých koncentracích v YAG krystalu. Laser může pracovat v režimu kontinuálního nebo pulzního výstupu s celkovou účinností v rozmezí 3–5 %. Tento typ laseru se v průmyslu využívá díky své účinnosti, výkonu a spolehlivosti ve srovnání s jinými pevnolátkovými lasery.

Laserové tyče mají obvykle průměr 6 mm a délku 100 mm, přičemž největší komerčně dostupné tyče mají průměr 10 mm a délku 200 mm. Díky menší velikosti krystalu jsou Nd:YAG lasery mnohem kompaktnější než CO₂ lasery.



Obrázek 16 Nd:YAG laser

(zdroj: [32])

Laserový efekt se dosahuje optickým buzením krystalu lampami, které jsou umístěny v jeho těsné blízkosti. Lampy mají emisní spektrum překrývající absorpční pásma Nd:YAG krystalu při 700 nm a 800 nm. Aby bylo možné do tyče přenést maximální množství světla z lamp a získat z ní maximální laserový výkon, jsou tyče a lampy umístěny ve speciálně navržených a vyrobených dutinách.

2.2.3 Diodový laser

Diodové lasery produkují záření o vlnové délce 808 nm až 940 nm. Obvykle je nutné chladit vodou. Jejich relativně nízká kvalita paprsku znamená, že nemohou být použity k vytváření tak malých velikostí bodu jako Nd:YAG nebo vláknové lasery. To však bývá zřídka problém při laserovém svařování plastů, kde relativně nízké náklady na pořízení a provoz vzbudily velký zájem.

Paprsek může být dodáván optickým vláknem, ale diodový laser je dostatečně malý a lehký, takže je často možné použít přímý systém, ve kterém je dioda zahrnuta s čočkovým systémem v jednom zařízení. Toto zařízení lze snadno namontovat na portálový systém nebo robotickou ruku k manipulaci s paprskem.

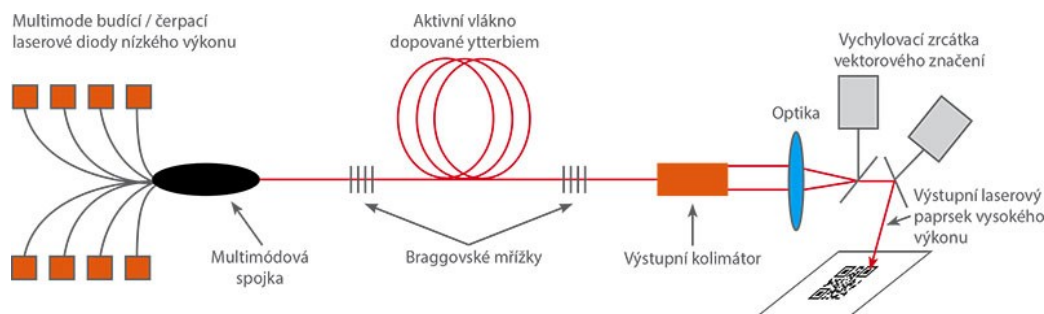
2.2.4 Diskový laser

Diskový laser je diodově napájený Yb:YAG (Ytterbium: Yttrium Aluminium Garnet) laser. Aktivní laserové médium je tenká disková deska, která je excitačně stimulována diodovými lasery z přední strany. Zadní povrch disku je připevněn k chladicímu bloku, který má vysoce odrazivý povrch a funguje jako zrcadlo v laserovém rezonátoru.

Tenké diskové lasery jsou zvláště atraktivní pro generování ultrakrátkých pulzů při velmi vysokých výkonových úrovních. Kromě schopnosti dosahovat vysokého výkonu jsou hlavními výhodami v tomto kontextu: snadnost dosažení difrakčně omezeného provozu (což je nezbytné pro režim uzamčení), široká zisková šířka pásma Yb:YAG (dosud nejvhodnější ziskové médium pro tenké diskové lasery) a velmi malá nelinearita tenkého disku, která pomáhá vyhnout se nadměrným nelineárním fázovým posunům, i přes vysoké intenzity uvnitř dutiny, a v mnoha případech umožňuje použití mnohem jednodušších technik.

2.2.5 Vláknový laser

Vláknové lasery (Obrázek 17 a 18) a zesilovače byly původně vyvinuty pro telekomunikace, ale s rostoucími výkony byly přizpůsobeny pro průmyslové aplikace, jako je řezání a svařování. Podobně jako u Nd:YAG laserů, mohou být ionty dopovány do křemíku nebo jiných materiálů, které jsou taženy do tenkých vláken. Povrch vlákna, nazývaný obal, má vyšší index lomu, což způsobuje, že se chová jako zrcadlo. Laserové záření se odráží od stěn vlákna, ale může procházet jeho jádrem téměř bez ztrát. Jádro vlákna je obvykle menší než 20 μm , přičemž celkové vlákno včetně obalu má průměr 125 μm . Vláknem je chráněno armovaným pláštěm, který zajišťuje bezpečnost při manipulaci.



Obrázek 17 Schéma vláknového laseru

(zdroj: [33])

Vláknové Braggovské mřížky fungují jako zrcadla rezonátoru a určují laserovou dutinu ve vláknu. Na obou koncích vlákna, které obsahuje aktivní ionty, jsou umístěny mřížky. Tyto mřížky vznikají změnou indexu lomu vlákna pomocí intenzivního ultrafialového záření. Odráží světlo určité vlnové délky, zatímco světlo jiných vlnových délek prochází bez většího vlivu. Mřížky fungují jako zrcadla specifická pro danou vlnovou délku. Na jednom konci vlákna je mřížka, která zcela odráží světlo, a na druhém konci je slabší mřížka, která umožňuje únik části laserového světla.

Ionty ve vláknovém laseru jsou rozbuzeny světlem z diod s kratší vlnovou délkou. Světlo z diody může být dodáno buď skrz obal vlákna, nebo na jeho konec, a prochází Braggovou mřížkou, která selektivně prochází jen určitou vlnovou délkou. Mřížka odráží laserové světlo, ale dovoluje průchod světla, které laser aktivuje.



Obrázek 18 Vláknový laser

(zdroj: [34])

Délka vlákna, která tvoří vláknový laser, může být připojena k dalšímu vláknu, které přenáší paprsek na jiná místa. Paprsek, který vychází z vlákna, je obvykle velmi kvalitní a

může být zaostřen na malý bod. Vláknové lasery mohou být buď stále zapnuté, nebo vysílat pulzy. Existují lasery s jednou vlnovou délkou až 10 kW a lasery s více vlnovými délkami až 50 kW. Tyto lasery jsou vytvořeny spojením výstupů několika jednotlivých laserů. Účinnost vláknového laseru (poměr elektrického výkonu k optickému výkonu) je 20 % nebo vyšší.

Vláknové lasery mají vynikající kvalitu paprsku pro vysokovýkonné průmyslové lasery. Paprsky s jednou vlnovou délkou mohou být přenášeny na materiál pomocí malých vláken o průměru 15 μm nebo větších vláken pro jiný tvar paprsku, který je vhodný pro svařování. Vláknové lasery dokážou řezat tenké materiály ($<6\text{ mm}$) velmi rychle a dávají efektivní svary s vysokým poměrem velikosti klíčové díry. Delší ohniskové čočky umožňují snazší zpracování.

2.3 Aplikace

2.3.1 Letecký průmysl

Laserové svařování se široce používá k svařování kritických komponent, jako jsou turbínové lopatky, části trupu a součásti motorů. Jeho přesnost a minimální deformace jsou klíčové pro zachování integrity a výkonu leteckých struktur. Tato technologie se také využívá k opravám poškozených turbínových lopatek, kdy obnovuje jejich strukturální integritu přesným tavením a spojováním materiálů. [35]

2.3.2 Automobilový průmysl

V automobilové výrobě je laserové svařování nezbytné pro spojování karosářských panelů, rámců a výfukových systémů. Zvyšuje pevnost a tuhost vozidel, přičemž přispívá k redukci hmotnosti a zlepšení palivové účinnosti. Laserové svařování se také používá při sestavování bateriových modulů pro elektrická vozidla, kde zajišťuje kvalitní spoje, které jsou klíčové pro výkon a bezpečnost. [35]

2.3.3 Elektropřůmysl

Tato technologie se široce používá k svařování jemných elektronických komponent, jako jsou tištěné obvody a senzory. Její přesnost umožňuje spolehlivé připojení v kompaktních elektronických zařízeních, což splňuje požadavky miniaturizace. Laserové svařování poskytuje hermetická těsnění pro elektronické obaly, chránící citlivé komponenty před vnějšími vlivy. [35]

2.3.4 Lékařství

V oblasti medicíny je laserové svařování nezbytné pro sestavování chirurgických nástrojů a implantátů. Zajišťuje sterilní podmínky a minimalizuje riziko kontaminace vytvářením čistých, hermetických těsnění. Schopnost svařovat složité tvary bez mechanického kontaktu činí laserové svařování ideálním pro lékařské aplikace, kde je přesnost klíčová. [35]

2.4 Výhody a nevýhody

Laserové svařování nabízí vysokou přesnost, což je klíčové pro průmysly jako letectví, elektronika a výroba lékařských přístrojů, kde jsou potřeba těsné tolerance. Tento proces je výrazně rychlejší než tradiční svařovací metody, což zvyšuje výrobní kapacitu a zkracuje čas realizace. Díky soustředěnému laserovému paprsku je tepelný vliv na okolní materiály minimální, což snižuje zakřivení nebo deformaci pracovního kusu. Laserové svařování je také velmi univerzální, dokáže spojovat různé materiály, včetně hliníku a mědi, a je vhodné pro svařování různých tloušťek materiálů. Čisté svary často eliminují potřebu post-processingu, což snižuje výrobní náklady. Tento bezkontaktní proces je ideální pro práci s delikátními materiály, protože minimalizuje riziko kontaminace. Navíc lze laserové svařování snadno integrovat s robotickými a CNC systémy, což zvyšuje efektivitu a konzistenci výroby. [36] Laserové svařování má několik nevýhod. Za prvé, počáteční investice do vybavení může být vysoká, což může některé firmy, zejména malé výrobce, odradit od použití této technologie. Dále je pro správnou obsluhu zařízení potřeba specializované školení a odborné dovednosti, aby byly zajištěny optimální výsledky a bezpečnost. Laserové svařování je také efektivní především pro tenké materiály, u velmi silných částí může být jeho účinnost nižší, pokud nejsou použity specifické techniky (například svařování klíčovou dírou). Kvalita svaru může být negativně ovlivněna povrchovými kontaminanty, jako je olej nebo rez, což vyžaduje důkladné čištění před svařováním. I když laserové svařování obecně vykazuje nízký tepelný vstup, v některých případech může dojít k nadměrnému zahřátí, pokud není správně kontrolováno, což může ovlivnit vlastnosti materiálu. Při použití laserového svařování je nutné brát v potaz také bezpečnostní hledisko, které souvisí s použitím této technologie v praxi. [37]

3 RUČNÍ LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ

Ruční laserová svařovací zařízení (Obrázek 19) využívají technologii svařování bez kontaktu. Laserový paprsek okamžitě roztaví materiál bez použití tlaku, poté se ochladí a ztuhne, čímž vytvoří silný svar. Ruční laserové svařovací zařízení modernizuje tradiční model laserového svařování tím, že přináší flexibilitu pevné světelné dráhy do ručního použití. Díky tomu lze svařovat bez omezení prostředím nebo úhlem obrobku. Při svařování nerezové oceli, železa, hliníku, mědi, uhlíkové oceli a dalších kovových plechů je tepelné ovlivnění materiálu malé, svar vykazuje vysokou kvalitu, a laserové svařovací zařízení je snadno ovladatelné a nabízí vysokou rychlost svařování. [39; 40]



Obrázek 19 Ruční laserový svařovací stroj

(zdroj:[41])

3.1 Princip

Ruční laserové svařování a klasické (nebo stolní) laserové svařování jsou obě technologie, které využívají laserové paprsky k tavení a spojování materiálů. Nicméně, existují klíčové rozdíly v jejich aplikacích, flexibilitě a způsobu použití. [39; 40]

U ručního laserového svařování (Obrázek 20) je hlavní výhodou jeho mobilita. Uživatel drží ruční svařovací zařízení a může se pohybovat kolem materiálu. To umožňuje svařování v těžko přístupných nebo složitých prostorech, například u oprav nebo údržby. Ruční zařízení může být přenášeno na různá místa práce. [39; 40]

Oproti tomu klasické laserové svařování je obvykle fixní, což znamená, že materiál musí být umístěn na specifickém pracovišti, kde je laserová stanice umístěna. [39; 40]



Obrázek 20 Ruční laserová svařování

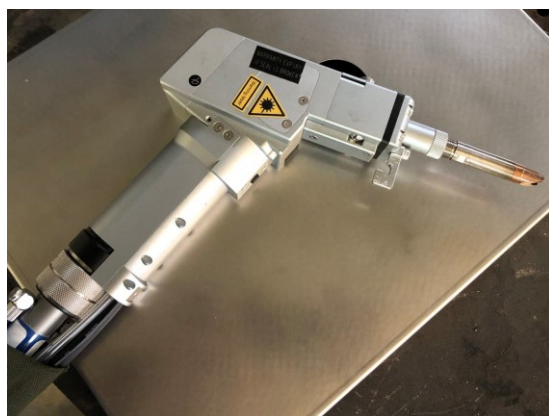
(zdroj:[42])

3.2 Technologické vybavení pro ruční laserové svařování

Vybavení pro ruční laserové svařování zahrnuje různé komponenty, které spolupracují na efektivním a bezpečném provádění svařovacích operací. Tato zařízení se liší v závislosti na konkrétních požadavcích dané aplikace. [39]

3.2.1 Svařovací pistole

Pistole pro ruční laserové svařování (Obrázek 21) je zařízení, které slouží k vedení a ovládání laserového paprsku při svařování kovových materiálů. Tyto pistole využívají výhod ručního laserového svařování, což znamená, že operátor může manuálně vést paprsek laseru pod různými úhly a v různých směrech, čímž získává flexibilitu pro svařování v těžko přístupných místech a pro specifické aplikace. [40; 39]



Obrázek 21 Pistole pro ruční laserové svařování

(zdroj:[43])

3.2.2 Laserový zdroj

Laserový zdroj je klíčovým komponentem, který generuje vysokou intenzitu laserového paprsku potřebného k tavení materiálu. Tento paprsek se následně používá k vytvoření kvalitních a silných svarů na různých typech kovových materiálů. Výběr vhodného laserového zdroje závisí na konkrétní aplikaci, materiálu, požadavcích na výkon a efektivitu. Existují různé typy laserových zdrojů, které se používají pro ruční svařování. Typy laserů používané v těchto zdrojích jsou zmíněné v předchozí kapitole (Kapitola 2.2). [40]

3.2.3 Chladicí zařízení

Chladicí zařízení pro ruční laserové svářečky je klíčové, protože zajišťuje optimální fungování zařízení a prevenci přehřátí. Laserové svařovací jednotky generují velké množství tepla, a to jak v samotném laserovém zdroji, tak v dalších komponentech, jako jsou optické kabely, svařovací pistole. Aby se zajistil správný výkon a životnost zařízení, je nezbytné efektivní chlazení. Na současném trhu se vyskytují vodní, vzduchové a popř. kombinované chladicí systémy. [44; 45]

3.3 Parametry pro ruční laserové svařování

Ruční laserové svařování je přesná metoda, která vyžaduje pečlivé nastavení parametrů (výkon laseru, rychlost svařování, pozice zaostření, velikost bodu a proud ochranného plynu) k dosažení vysoce kvalitních svarů. Správné pochopení těchto parametrů a jejich vlivu je zásadní pro úspěšné svařovací operace. [46]

Výkon laseru

Definice: výkon laseru, měřený ve wattech (W), určuje množství energie dodané na svařovaný materiál.

Vliv: vyšší výkon zajišťuje hlubší průnik a rychlejší svařování, avšak zvyšuje riziko deformací. Například u materiálů tenčích než 1,0 mm postačí výkon 500–1500 W, zatímco materiály s vyšší tloušťkou (>5,0 mm) vyžadují 3000–6000 W a více.[46]

Rychlost svařování

Definice: rychlost, jakou se laserový paprsek pohybuje po povrchu materiálu, měřená v milimetrech za sekundu (mm/s).

Vliv: vyšší rychlost vede k menší hloubce průniku, zatímco pomalejší rychlost umožňuje hlubší průnik a vyšší přísun tepla. Optimální rychlost musí být sladěna s výkonem tak, aby nedošlo k propálení nebo nedostatečnému spojení. [46]

Pozice zaostření

Definice: vzdálenost, na kterou je laserový paprsek zaostřen na povrchu materiálu.

Vliv: správné zaostření ovlivňuje velikost bodu a koncentraci energie na materiálu. Dobře zaostřený paprsek zvyšuje hloubku průniku a kvalitu svaru. [46]

Velikost bodu

Definice: průměr zaostřeného laserového paprsku na materiálu.

Vliv: menší bod koncentruje energii pro hlubší průnik, zatímco větší bod distribuuje teplo na širší plochu, což ovlivňuje geometrii svaru. [46]

Proud ochranného plynu

Definice: průtok ochranného plynu kolem svarové oblasti.

Vliv: správný průtok plynu zabráňuje oxidaci a kontaminaci během svařování, čímž zlepšuje kvalitu a vzhled svaru. [46]

3.4 Výhody a nevýhody

Ruční laserové svařování vyniká svou vysokou přesností a schopností vytvářet čisté, estetické svary s minimálními tepelnými deformacemi, což je klíčové pro zachování kvality materiálů. Nabízí vysokou flexibilitu, protože svářeči mohou upravovat parametry během práce bez nutnosti přeprogramování, což je výhodné zejména při zakázkové nebo malosériové výrobě. Další předností je relativně nižší počáteční investice ve srovnání s automatizovanými systémy, což jej činí dostupnějším pro menší podniky nebo začínající firmy. Ruční laserové svářečky jsou navíc snadno ovladatelné a díky své přenosnosti je lze využívat v různých pracovních prostředích. [39]

Na druhé straně je třeba počítat s vyššími náklady na zařízení, zejména pokud jde o systémy s vysokým výkonem, což může být pro některé firmy překážkou. Ruční provoz také klade nároky na dovednosti operátorů, kteří musí být zkušení, aby dosáhli požadované kvality svarů, a současně může vést k fyzické únavě při delším použití. Svařování pomocí laseru zahrnuje také určitá bezpečnostní rizika, vyžadující ochranné vybavení a přísné dodržování bezpečnostních postupů. Kromě toho je tato metoda méně efektivní při svařování

silnějších materiálů a citlivá na přesné zarovnání dílů, protože jakákoliv nepřesnost může negativně ovlivnit kvalitu svaru. [39]

3.5 Kvalita a jakost svaru

Ruční laserové svařování je ceněno pro vysokou kvalitu svarů v různých aplikacích. Jedná se především o estetiku, přesnost, minimální vady, pevnost aj.

Vynikající estetika a přesnost

Ruční laserové svařování umožňuje vytvářet vizuálně atraktivní svary. Díky preciznímu řízení laserového paprsku lze dosáhnout čistých a jednotných svarových profilů. Tato přesnost minimalizuje teplem ovlivněnou zónu, což omezuje tepelné deformace a zajišťuje, že okolní materiály zůstávají téměř nedotčeny. [47; 39]

Minimální vady

Svary vytvořené ručním laserovým svařováním vykazují nízký výskyt vad, jako jsou praskliny, neúplné spojení nebo pórovitost. Technologie schopná dosáhnout úplného průvaru dále zvyšuje integritu svarových spojů. [47; 39]

Srovnání pevnosti

Laserové svary mohou být stejně pevné nebo dokonce pevnější než samotné základní materiály. Tato pevnost je výsledkem efektivního využití tepla během svařovacího procesu. [47; 39]

Konzistence napříč materiály

Ruční laserové svařování lze použít na širokou škálu materiálů a tloušťek, přičemž výsledky jsou konzistentní bez ohledu na rozdíly v konfiguraci spojů nebo typech materiálů. Tato univerzálnost jej činí vhodným pro průmyslová odvětví, jako je automobilový, letecký a elektronický průmysl, kde se často využívají různé materiály. [47; 39]

Vliv dovedností operátora

Ačkoli je ruční laserové svařování snazší se naučit než tradiční metody, jako je svařování MIG nebo TIG, úroveň dovedností operátora může stále ovlivnit kvalitu svaru. Funkce, jako je „kmitání paprsku“, pomáhají kompenzovat odchylky ve slícování dílů a zlepšují konzistenci. Nicméně i přesto je kvalifikovaný operátor nezbytný pro dosažení optimálních výsledků. [47; 39]

4 ROBOTICKÉ LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ

Robotické laserové svařování (Obrázek 22) kombinuje přesnost laserové technologie s všestranností robotiky, což z něj činí vysoce efektivní metodu spojování materiálů. Tento proces je zvláště výhodný v průmyslových odvětvích, kde je rozhodující rychlost a přesnost. [48]



Obrázek 22 Robotický laserový svařovací zařízení

(zdroj:[49])

4.1 Komponenty systému robotického svařování

Robotické systémy pro laserové svařování se skládají z několika klíčových komponent, které společně zajišťují efektivní a kvalitní svařování. Níže jsou uvedeny hlavní součásti těchto systémů. [48]

4.1.1 Laserový zdroj

Laserový zdroj je jádrem systému, generující vysokovýkonný laserový paprsek potřebný pro svařování. Nejčastěji se používají pevné lasery (např. Nd lasery) a vláknové lasery, které vynikají vysokou účinností a nízkými nároky na údržbu. [48]

4.1.2 Systém pro přenos paprsku

Tento systém přenáší laserový paprsek ze zdroje na svařovací hlavu, obvykle prostřednictvím optických vláken. Vlákná umožňují flexibilní polohování a efektivní přenos energie, což usnadňuje přístup k různým částem obrobku. [48]

4.1.3 Robotické rameno a svařovací hlava

Robotické rameno (Obrázek 23) funguje jako mobilní platforma pro svařovací hlavu. Díky pokročilým servomotorům a zpětnovazebním systémům poskytuje přesné pohyby ve více osách, což umožňuje přesné svařování složitých geometrií. [48]



Obrázek 23 Robotické rameno

(zdroj:[50])

Svařovací hlava (Obrázek 24) obsahuje optický systém, který zaostřuje laserový paprsek na obrobek. Parametry jako ohnisková vzdálenost a průměr bodu lze upravit podle materiálu a tloušťky, což zajišťuje přizpůsobivost pro různé svařovací úkoly. [48]



Obrázek 24 Svařovací hlava

(zdroj:[51])

4.1.4 Řídicí a chladicí systém

Pokročilý řídicí systém programuje svařovací dráhu, reguluje parametry laseru a monitoruje proces svařování v reálném čase. Tato automatizace optimalizuje kvalitu svařování a snižuje výskyt defektů. V rámci reálné aplikace je dále nutné použít také chladicí systém (Kapitola 3.2.3). [48]

4.1.5 Bezpečnostní prvky a pomocná zařízení

Vzhledem k vysokému výkonu laseru jsou nezbytná robustní bezpečnostní opatření, včetně ochranných štítů, speciálních ochranných brýlí a monitorovacích systémů, které zajišťují bezpečný provoz a kontrolu kvality během svařování.

Další komponenty, jako jsou polohovadla, upínací přípravky a pracovní stanice, slouží k pevnému uchycení obrobků během svařování a zvyšují celkovou produktivitu. [48]

4.2 Programování robotického laserového svařování

Robotické laserové svařování využívá automatizované systémy ke svařování s vysokou přesností a efektivitou. Programování těchto robotických systémů se může výrazně lišit v závislosti na typu robota a konkrétní aplikaci. [53]

4.2.1 Automatizované offline programování

AOLP umožňuje generovat programy pro robotické svařování přímo z modelů vytvořených pomocí počítačem podporovaného návrhu (CAD), čímž minimalizuje lidský zásah. Tato

metoda je obzvláště přínosná pro malé a střední podniky, protože výrazně snižuje náklady na programování. [53; 54]

Proces zahrnuje několik klíčových fází:

- a) Vytvoření 3D CAD modelu: návrh dílů, které mají být svařovány.
- b) Definování procesu: určení svarových drah a parametrů.
- c) Plánování procesu: generování pohybů robota pro svařování.
- d) Plánování trajektorie: naplánování pohybů mezi jednotlivými svary.
- e) Kalibrace: úprava drah na základě skutečných poloh dílů.
- f) Postprocessing: optimalizace pohybů a jejich převod do kódu robota. [53; 54]

4.2.2 Manuální programování

Manuální programování spočívá v přímé interakci operátora s robotem. Operátor může buď vést robotickou ruku po požadované dráze, nebo zadávat pohyby prostřednictvím programovacího panelu. Tento typ programování se hodí zejména pro jednodušší aplikace, jako je prototypová výroba, kde není nutné používat pokročilé technologie. [53; 54]

Mezi hlavní výhody manuálního programování patří jeho jednoduchost, protože nevyžaduje složité softwarové nástroje ani 3D modely. Operátor má také plnou kontrolu nad pohyby robota, což umožňuje přizpůsobit dráhu svařování přímo na místě. Manuální programování je navíc flexibilní a ideální pro jednorázové zakázky nebo časté změny svařovacích konfigurací. [53; 54]

Mezi nevýhody manuálního programování patří časová náročnost, zejména při programování složitých trajektorií. Kvalita programu je rovněž závislá na zkušenostech operátora, což může být nevýhoda v případě méně kvalifikovaných pracovníků. Při složitých geometriích nebo těžko přístupných místech je navíc dosažení vysoké přesnosti obtížné. [53; 54]

4.2.3 Programování kolaborativních robotů (cobotů)

Kolaborativní roboty, známé jako coboty, jsou navrženy tak, aby mohly bezpečně pracovat vedle lidí bez nutnosti ochranných bariér. Jejich programování je intuitivní a často využívá pohybovou výuku, při které operátor uchopí robota a manuálně jej vede po požadované dráze. Robot si tuto trajektorii zaznamená a následně ji opakuje. [53; 54]

Pokročilé funkce cobotů zahrnují blokové programování, které umožňuje využívat předdefinované příkazy pro nastavení trajektorie, rychlosti, svařovacích parametrů a dalších funkcí. Díky jednoduchému rozhraní lze snadno přidávat další prvky, jako je nastavení ochranného plynu nebo synchronizace s externími zařízeními. [53; 54]

Výhodou cobotů je rychlost nasazení, protože programování a učení robota trvá výrazně kratší dobu než u tradičních průmyslových robotů. Bezpečnost je zajištěna senzory, které detekují kolize, což umožňuje bezpečný provoz. Intuitivnost cobotů znamená, že operátoři nepotřebují pokročilé technické znalosti, což usnadňuje jejich zaučení. Další výhodou je mobilita, protože coboty lze snadno přesunout na jiné pracoviště a rychle přizpůsobit novým úkolům. [53; 54]

Nicméně coboty mají některé nevýhody, například nižší nosnost a rychlost pohybu ve srovnání s tradičními roboty. Také nejsou vždy vhodné pro složité nebo vysoce přesné aplikace. Přesto jsou coboty ideální pro malé a střední podniky, které oceňují flexibilitu a snadnou obsluhu, a nacházejí uplatnění například v automobilovém průmyslu, při výrobě elektroniky nebo v malosériové výrobě. [53; 54]

4.3 Výhody a nevýhody

Robotické laserové svařování se vyznačuje vysokou přesností a čistotou svarů. Vznikají čisté a kvalitní spoje, přičemž precizní řízení laserového paprsku výrazně snižuje potřebu dodatečných úprav. Proces také vytváří velmi malou tepelně ovlivněnou oblast, což minimalizuje deformace a zachovává integritu okolních materiálů, což je ideální zejména pro tenké a citlivé komponenty. Další výhodou je rychlost a efektivita – robotické systémy mohou pracovat nepřetržitě bez přestávek, což zvyšuje výrobní kapacitu. Rychlý tepelný cyklus umožňuje rychlé dokončení svarů, což přispívá ke zkrácení celkového výrobního času. Robotické laserové svařování je navíc velmi univerzální, protože jej lze využít na široké spektrum materiálů a tloušťek, včetně exotických kovů, které jsou obtížně svařitelné tradičními metodami. Automatizace procesu zvyšuje také bezpečnost, protože drží operátory mimo nebezpečné prostředí a umožňuje svařování i v těžko přístupných nebo uzavřených prostorech. Další významnou výhodou je konzistence a opakovatelnost – robotické systémy poskytují stabilní kvalitu svarů napříč celou výrobní sérií, což je klíčové pro udržení vysokých standardů produktů. [53; 54]

Navzdory svým výhodám má robotické laserové svařování i své nevýhody. Mezi hlavní patří vysoké počáteční náklady spojené s pořízením zařízení, instalací a programováním

systému. Tyto investice mohou být překážkou zejména pro menší výrobce. Další nevýhodou je složitost nastavení a údržby. Robotické systémy vyžadují odborné znalosti pro správné uvedení do provozu a jejich pravidelná údržba může být náročná, což klade zvýšené nároky na kvalifikaci personálu. Robotické laserové svařování také nemusí být vhodné pro všechny aplikace. Například při výrazných mezerách mezi díly nebo v případech, kdy jsou tradiční metody efektivnější, není tato technologie ideálním řešením. Pro jednodušší nebo méně náročné úkoly může být robotické laserové svařování zbytečně sofistikované a neekonomické. Kromě toho výkon systému značně závisí na stabilním napájení a optimálních podmínkách prostředí. Pokud nejsou tyto faktory správně řízeny, může dojít ke zhoršení kvality svarů. [53; 54]

4.4 Budoucí trendy robotických svařovacích strojů

Robotické laserové svařování je oblast, která se rychle vyvíjí díky novým technologickým pokrokům a rostoucím požadavkům na vyšší přesnost a efektivitu ve výrobních procesech. V tomto odvětví se objevují nové trendy, které ovlivňují jeho směr a aplikace v různých průmyslových odvětvích. [55]

4.4.1 Zvýšená automatizace a inteligence

V budoucnu budou robotické svařovací systémy vybaveny pokročilými senzory a umělou inteligencí, která umožní automatické přizpůsobení svařovacích procesů v reálném čase. Díky těmto technologiím budou svařovací systémy schopné reagovat na změny v okolním prostředí a výrobních podmínkách, což zvýší jejich flexibilitu a efektivitu. To znamená, že roboty budou schopny provádět svařování s větší přesností a menšími chybami. [55; 56]

4.4.2 Vyšší přesnost a kvalita

S integrací pokročilých algoritmů pro řízení robotů se zlepší přesnost svařování, což umožní vykonávat i náročnější svařovací úkoly s vysokými nároky na kvalitu. Tyto algoritmy pomohou dosáhnout lepších výsledků v aplikacích, kde je potřeba zajistit dokonalou kontrolu kvality, například v leteckém nebo automobilovém průmyslu. [55; 56]

4.4.3 Flexibilní výrobní systémy

Vzhledem k rostoucím požadavkům na personalizovanou výrobu a zvyšující se poptávce po variabilních výrobních procesech se budou svařovací systémy stávat stále flexibilnějšími. To znamená, že roboti budou schopni rychle přizpůsobit své chování a konfiguraci podle

různých výrobních potřeb, což je ideální pro výrobu menších sérií nebo jedinečných produktů. [55; 56]

4.4.4 Optimalizace na základě dat

Využití umělé inteligence a strojového učení pro analýzu historických dat povede k optimalizaci svařovacích parametrů. Tato data pomohou nejen ke zlepšení kontroly kvality, ale také k prediktivní údržbě strojů. To znamená, že roboti budou schopni detekovat problémy dříve, než dojde k poruše, což výrazně sníží prostoje a náklady na opravy. [55; 56]

4.4.5 Modulární a multifunkční návrhy

Robotické svařovací systémy budou stále více modulární, což umožní snadnou změnu jejich konfigurace podle specifických potřeb výrobního procesu. Modulární designy umožní přizpůsobení robotických systémů různým typům produktů a svařovacích operací. Tento trend zvýší univerzálnost robotů a jejich použití v širokém spektru aplikací. [55; 56]

4.4.6 Ekologická udržitelnost

V souvislosti s rostoucími environmentálními nároky budou nové robotické laserové svařovací technologie zaměřeny na zvyšování energetické účinnosti. Výrobci budou hledat způsoby, jak snížit množství odpadu a emisí během svařování. Tento trend bude důležitý nejen pro ekologické aspekty výroby, ale také pro splnění přísných regulací v oblasti ochrany životního prostředí. [55; 56]

4.4.7 Rozšíření do dalších odvětví

Jak technologie laserového svařování postupně zraje, očekává se, že se rozšíří do dalších průmyslových odvětví, jako jsou elektronika, zdravotnické přístroje nebo obnovitelné zdroje energie. Robotické laserové svařování se stane běžnou metodou pro svařování materiálů, které dříve bylo obtížné svařovat tradičními metodami, což otevře nové možnosti pro inovace a vývoj produktů. [55; 56]

II PRAKTICKÁ ČÁST

5 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je porovnat kvalitu svarových spojů u plechů při použití dvou způsobů ručního laserového svařování (s/bez použití přídavného materiálu) realizovaného ve firmě THT Polička a jednoho způsobu robotického laserového svařování, které je dodáváno externí firmou. Pro ověření kvality bude měřena únosnost svarových spojů, za využití statické tahové zkoušky a výsledky následně porovnat s normou, a následně bude provedena metalografická analýza společně s analýzou chemického složení v místě svaru a měření mikrotvrdomosti.

6 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Pro testování kvality svarů bylo nejprve nutné navrhnout rozměry a druh polotovaru, který bude následně svařen a ze kterého budou poté připravena zkušební tělesa.

6.1 Volba materiálu a polotovaru

Pro výrobu vzorků byl zvolen materiál 1.4404 (ČSN 17349, AISI 316L, DIN X2 CrNiMo). Jedná se o austenitickou, svařitelnou ocel s velmi nízkým obsahem uhlíku, která je odolná proti mezikrystalové korozi. Tato ocel je vhodná především pro neoxidační prostředí obsahující silné organické kyseliny (např. mravenčí, octová) a silné anorganické kyseliny (např. sírová, fosforečná) při nižších až středních koncentracích a teplotách. Leštitelnost materiálu je velmi dobrá. Tento materiál byl zvolen z toho důvodu, že ho firma THT Polička používá v rámci svého portfolia výrobků (např. pro výrobu nádrží do hasičských vozů).

Chemické složení oceli 1.4404 je podobné jako u nerezové oceli jakosti 1.4301/7, avšak navíc je legována sírou. Díky tomu má vynikající obrobiteľnosť a je známá pod označením „automatová“. Nicméně přítomnost síry snižuje odolnost materiálu proti plošné korozi a v oblastech ovlivněných teplem je náchylná k mezikrystalické korozi.

Jako polotovar byl zvolen plech o tloušťce 3 mm, který byl nařezán na rozměry 150 mm x 600 mm.

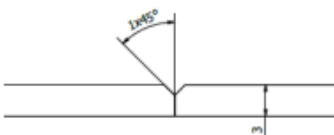
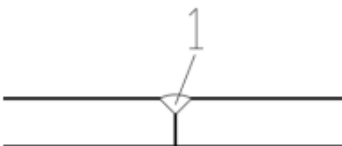
6.2 Svaření plechů

V rámci zajištění jednotné kvality svarů byla navržena specifikace postupu svařování (Obrázek 25), ve které jsou mimo jiné uvedeny jednotlivé parametry svařování, a také samotný vzhled svařence (Obrázek 26).

Specifikace postupu svařování (pWPS) – obloukové svařování

Výrobce:	Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně		
WPS č.:		WPQR č.:	
Metoda(y) svařování:	52	Označení základního materiálu (skupina):	17349(1.4404)
Způsob přenosu kovu:		Tloušťka materiálu (mm):	Plech t=3
Druh spoje a druh svaru:	tupý	Vnější průměr (mm):	-
Způsob přípravy a čištění:	Bez úpravy, svarové plochy řezané laserem nebo vodním paprskem	Poloha svařování:	PA

Podrobnosti přípravy svaru (náčrt)*

Návrh spoje	Sled klázení svarových housenek
	

Podrobnosti svařování

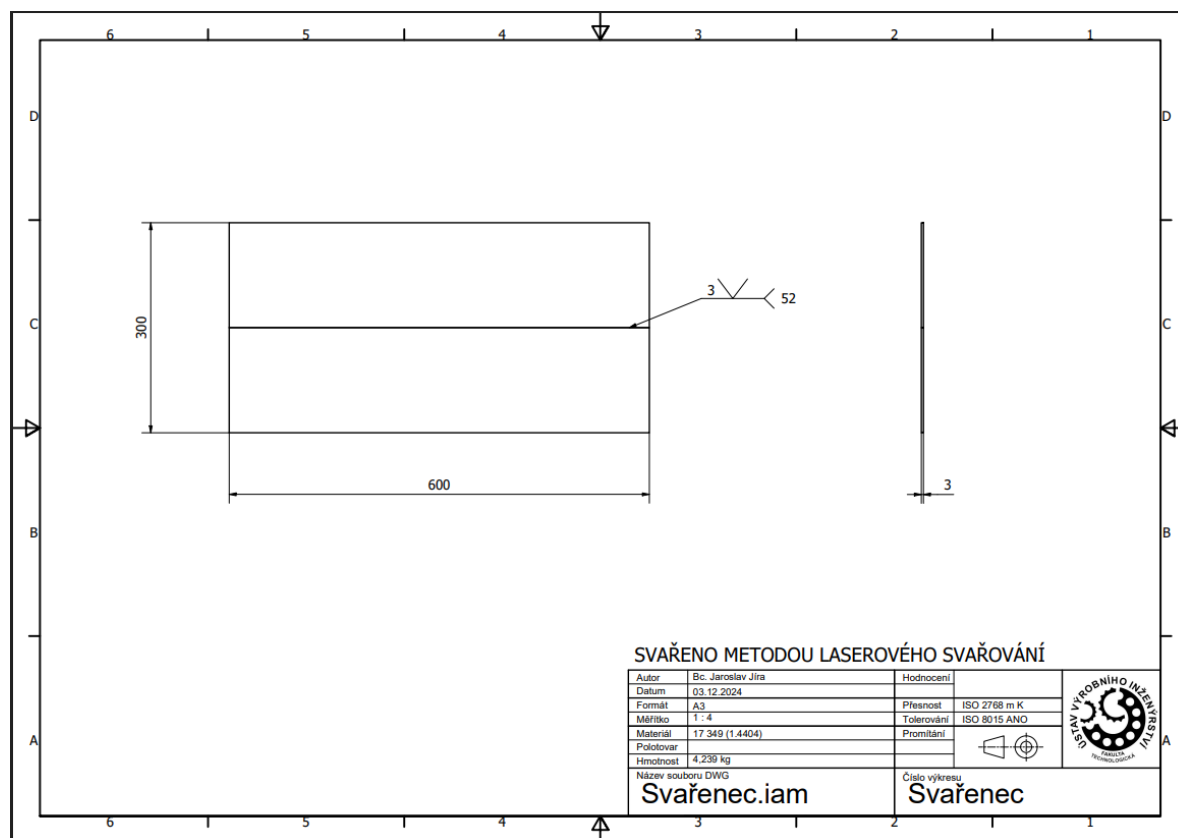
Housenka	Metoda svařování	Rozměr přídav. materiálu	Max. výkon laserového zařízení W	Použitý výkon %	Druh proudu/polarita	Rychlost podávání drátu	Délka housenky/ Postup. rychlost	Teplotní příkon*
1	52	1	2000	100				

Označení přídavného kovu a obchodní značka:	Ok AUTROD 16.32	Další údaje*, například:	
Speciální sušení při vyšší teplotě nebo sušení:		- Rozkvyv (max. šířka housenky):	
Označení plynu/tavidla: - ochranného:	N2 (F1)	- Oscilace: amplituda, frekvence, prodleva	
- pro ochranu kofene:		- Podrobnosti pulzního svařování:	
Průtoková rychlost plynu: - ochranného:	11 – 13 l/min	- Vzdálenost napájecího průvlaku od prac. kusu:	
- pro ochranu kofene:		- Podrobnosti plazmového svařování:	
Podrobnosti k drážkování/ ochraně kofene:		- Úhel sklonu hořáku:	
Teplota předehřevu:		- Jiné údaje:	
Interpass teplota:		Výrobce : (jméno, datum, podpis)	Fakulta technologická, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Dodatečný ohřev (dohřev):		Jaroslav Jira	
Udržovací teplota předehřevu:		6.12.2024	
Teplotné zpracování po svařování a/nebo stárnutí: doba, teplota, metoda, rychlost ohřevu a ochlaz.°:			

* je-li požadováno

Obrázek 25 Předpokládaný postup pro ruční laserové svařování

(zdroj: vlastní)



Obrázek 26 Výkres svařence

(zdroj: vlastní)

6.2.1 Svaření plechu pomocí ručního laserového svařování

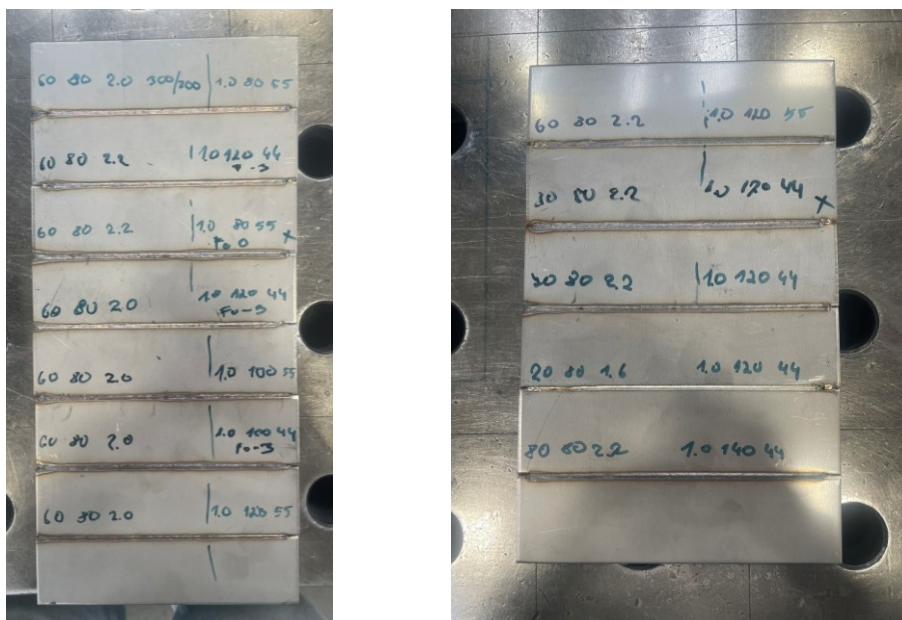
Pro ruční svařování byla použita laserová svářečka LARISA ADVANCE s výkonem 2kW (Obrázek 27).



Obrázek 27 Ruční laserová svářečka LARISA ADVANCE

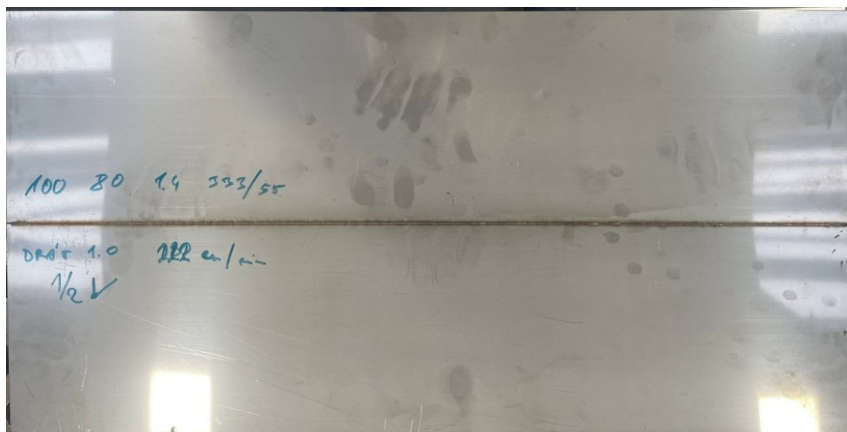
(zdroj: vlastní)

V rámci prvotního ověření a nastavení optimálních podmínek svařování bylo vytvořeno široké spektrum kontrolních svarových spojů (Obrázek 28) a na jejich základě byly následně stanoveny optimální podmínky svařování pro ruční svařování s/bez přídavného materiálu (Obrázek 29 a 30, Tabulka 3).



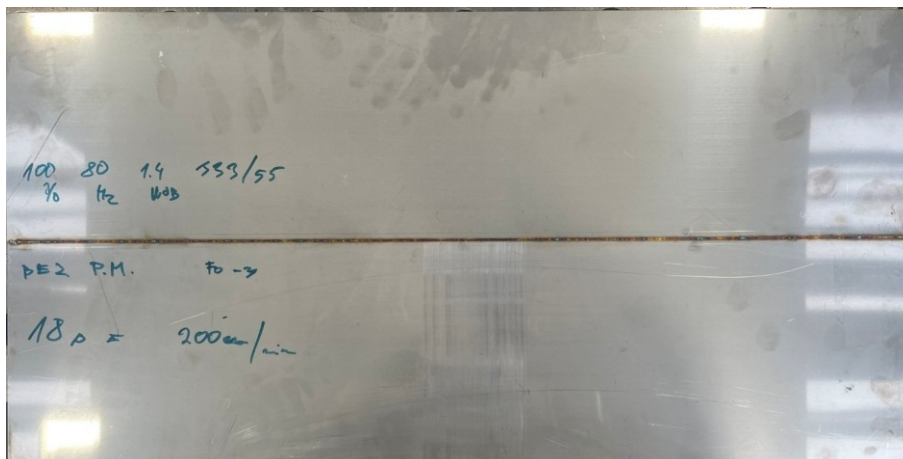
Obrázek 28 Ověření procesních parametrů v rámci ručního svařování

(zdroj: vlastní)



Obrázek 29 Výsledný svařenec – ruční laserové svařování s přídavným materiálem

(zdroj: vlastní)



Obrázek 30 Výsledný svařenec – ruční laserové svařování bez přídavného materiálu

(zdroj: vlastní)

Tabulka 3.: Procesní parametry pro zvolené metody ručního laserového svařování

	Ruční laserové s přídavným materiálem (HD)	Ruční laserové bez přídavného materiálu (HB)
Výkon [kW]	2	2
Frekvence [Hz]	80	80
Rozkmit paprsku [mm]	1,4	1,4
Průměr drátu [mm]	1,0	-
Rychlost [cm/min]	180-200	222

(zdroj: vlastní)

6.2.2 Svařování plechů pomocí robotického laserového svařování

Robotické svařování bylo realizováno ve spolupráci s firmou LaserTherm se sídlem v Plzni. Robotické laserové pracoviště bylo složeno z robota FANUC M-20/35s, laserového systému LT-LW-3.000 (IPG YLR 3000, IPG wobble D30 laser process head) a bezpečnostní laserové kabiny LaserTherm.

Procesní parametry pro zvolenou metodu laserového svařování byly následující:

- výkon: 4 kW,
- rychlost: 1000 cm/min,
- ochranná atmosféra: dusík.

Na následujícím obrázku (Obrázek 31) je znázorněn výsledný svařenec, který byl vyroben pomocí laserového svařování za použití výše uvedených procesních parametrů.

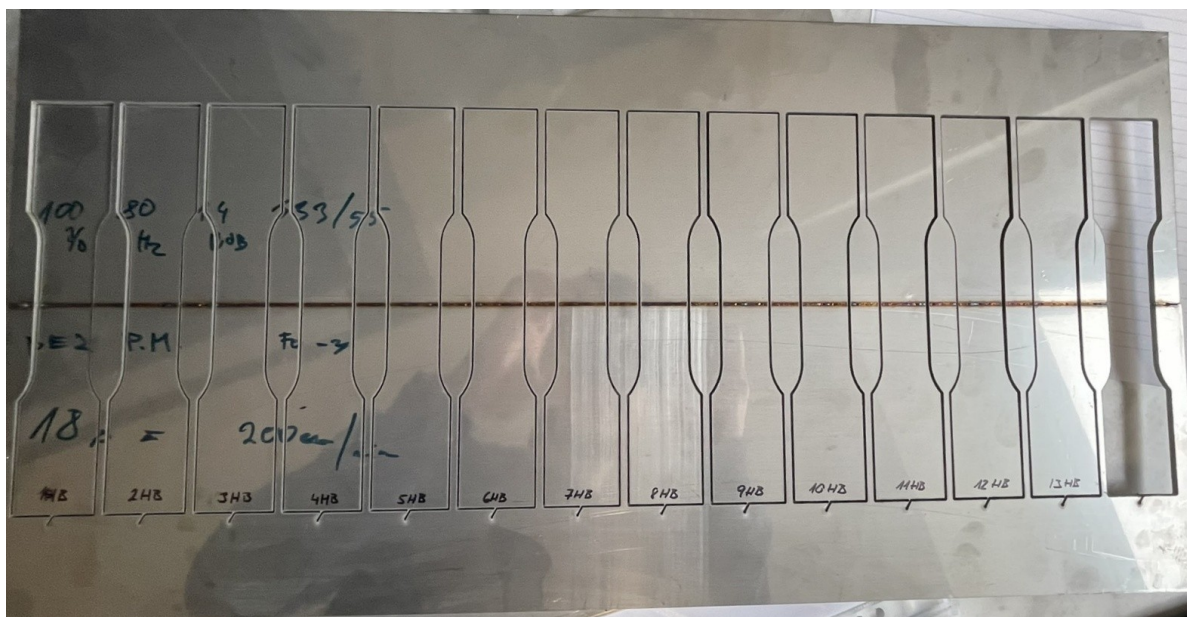


Obrázek 31 Výsledný svařenec – robotické laserové svařování

(zdroj: vlastní)

6.3 Příprava zkušebních těles pro zkoušky mechanických vlastností

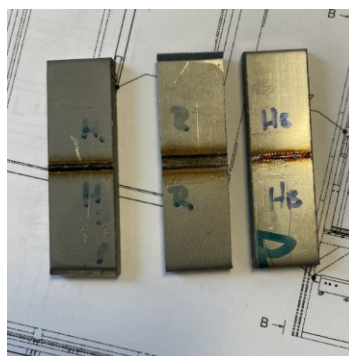
Po vytvoření svařenců bylo provedeno vyřezání zkušebních těles (Obrázek 32) pomocí vodního paprsku Bystronic ByJet Classic L6030. Tvar a rozměry zkušebních těles pro zkoušku tahem byly dány dle normy ČSN EN ISO 4136.



Obrázek 32 Vyřezaná zkušební tělesa

(zdroj: vlastní)

Pro měření mikromechanických vlastností bylo nutné z vyřezaných zkušebních těles připravit (pomocí vodního paprsku a hydraulických nůžek) vzorky o šířce 10 mm a délce 40 mm (Obrázek 33).



Obrázek 33.: Připravené vzorky pro měření mikromechanických vlastností.

(zdroj: vlastní)

Takto připravené vzorky byly následně (pro lepší manipulaci a upínání) zapouzdřeny do požadovaného tvaru (Obrázek 36) na metalografickém lisu Buehler SimpliMet 1000 (Obrázek 34). Posledním krokem v přípravě bylo vyleštění testovaného povrchu na leštičce Buehler AutoMet 250 (Obrázek 35).



Pracovní komora

Obrázek 34 Lis pro zapouzdření vzorků

(zdroj: vlastní)



Obrázek 35 Leštička vzorků

(zdroj: vlastní)



Obrázek 36 Vzorky připravené pro měření mikromechanických vlastností

(zdroj: vlastní)

6.4 Příprava zkušebních těles pro metalografickou analýzu a určení chemického složení

6.4.1 Příprava metalografických preparátů

Rozřezání dodaných součástí bylo provedeno pomocí přesného metalografického dělicího zařízení QATM Qcut 200. Metalografické výbrusy byly připraveny s využitím zařízení pro přípravu metalografických preparátů QATM Qpol 300 A1 konvenčními technikami – broušením za mokra a leštěním diamantovými suspenzemi. Finální doleštění bylo provedeno pomocí mechanicko-chemického procesu. Mikrostruktura byla vyvolána chemickým leptáním pomocí leptadla Vilella-Bain.

6.4.2 Světelná mikroskopie (LM)

Pozorování a dokumentace vzorků byly prováděny na 3D opto-digitálním mikroskopu s vysokým rozlišením OLYMPUS DSX510. Vybrané snímky byly s ohledem na velikost vzorků a použité zvětšení mikroskopu (zv. 200x) získány skládáním z více zorných polí. Tyto snímky jsou ve zprávě dále označeny jako „mapa“.

6.4.3 Rastrovací elektronová mikroskopie (SEM)

Mikrostruktura oceli byla pozorována a snímkována pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu (SEM) společnosti TESCAN LYRA3 XMH (v cca 1/3 tloušťky plechu).

6.4.4 Analýza chemického složení

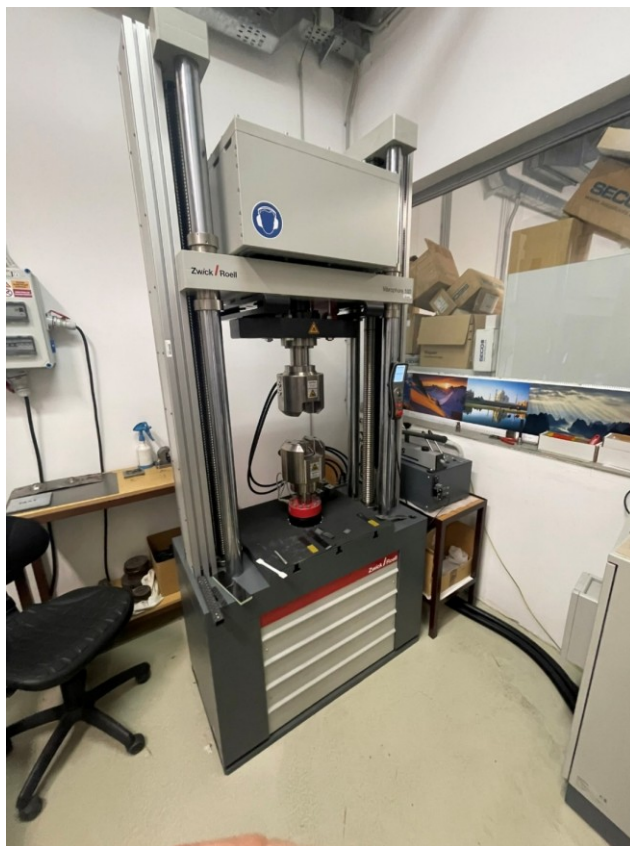
Analýza chemického složení byla provedena na jiskrovém optickém emisním spektrometru (OES) s vysokým rozlišením Q4 TASMAN výrobce BRUKER.

7 MECHANICKÉ ZKOUŠKY

Pro zkoušky mechanických vlastností svarového spoje byla zvolena zkouška tahem a pro ověření mikromechanických vlastností zkouška mikrotvrdosti.

7.1 Tahová zkouška

Tahová zkouška probíhala na univerzitním zkušebním stroji Zwick Roell Vibrophore 100 (Obrázek 37). V rámci zkoušky bylo primárně měřeno napětí a tažnost na mezi pevnosti. Modul pružnosti byl měřen bez extenzometru – z tohoto důvodu jeho naměřené hodnoty slouží pouze pro vzájemné porovnání. Dle normy ČSN EN 10088-22 jsou pro materiál 1.4404 předepsané hodnoty napětí na mezi pevnosti 530–680 MPa a tažnosti na mezi pevnosti 40-45 %.



Obrázek 37 Univerzální zkušební stroj Zwick

(zdroj: vlastní)

7.1.1 Výsledky svarů – ruční laserové svařování s přídavným materiálem (HD)

V následující tabulce (Tabulka 4) a na následujícím obrázku (Obrázek 38) jsou shrnuty výsledky tahové zkoušky u svarů připravených pomocí ručního laserového svařování s přídavným materiálem.

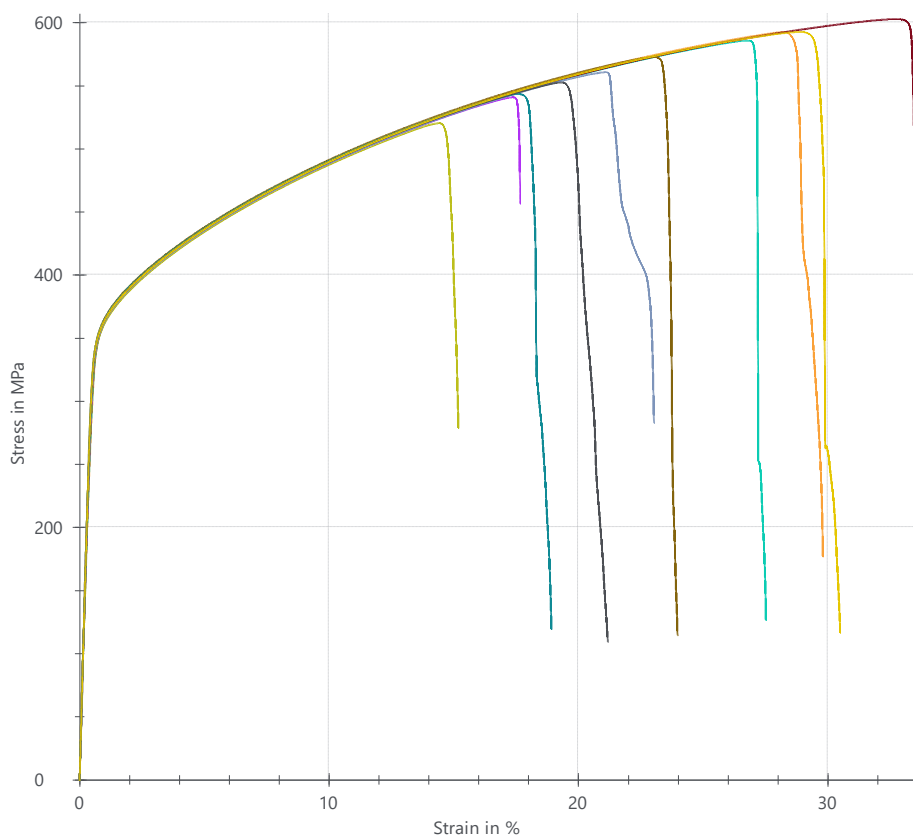
Tabulka 4 Výsledky tahové zkoušky – ruční laserové svařování s přídavným materiálem

	Modul pružnosti	Mez pevnosti	Tažnost
Číslo zkušebního tělesa	MPa	MPa	%
1H _D	66600	592	28,3
2H _D	67300	586	26,7
3H _D	68100	603	32,7
4H _D	68600	520	14,4
5H _D	69300	541	17,4
6H _D	70000	572	23,1
7H _D	69800	561	21,1
8H _D	70200	543	17,5
9H _D	70400	552	19,3
10H _D	70500	593	28,9
Průměr	69100	566	23
Směrodatná odchylka	1390	27,2	6
Variační koeficient [%]	2,01	4,8	26,11

(zdroj: vlastní)

Většina naměřených hodnot u napětí na mezi pevnosti leží v uvedeném rozsahu předepsaných hodnot. Nicméně u některých zkušebních těles (4HD, 5HD a 8HD) se přibližují naměřené hodnoty spodní hranici a díky tomu existuje potenciální riziko nedostatečné pevnosti. Tento jev může být zapříčiněn lokální vadou svaru (póry, neprovaření).

Naopak všechny naměřené hodnoty tažnosti na mezi pevnosti nedosahovaly předepsaných hodnot. Naměřené hodnoty se pohybují výrazně pod jejich spodní hranicí. U svarových spojů je tento jev nežádoucí, protože nízké prodloužení může vést k prasknutí svaru při malé deformaci. Jedním z možných vysvětlení tohoto nežádoucího jevu je vznik křehkých fází, což může být zapříčiněno nedostatečným ochlazováním.



Obrázek 38 Naměřené tahové křivky – ruční laserové svařování s přídavným materiálem

(zdroj: vlastní)

Hodnoty modulu pružnosti se příliš neliší, což nám dokazuje hodnota variačního koeficientu (2,01).

7.1.2 Výsledky svarů – ruční laserové svařování bez přídavného materiálu (HB)

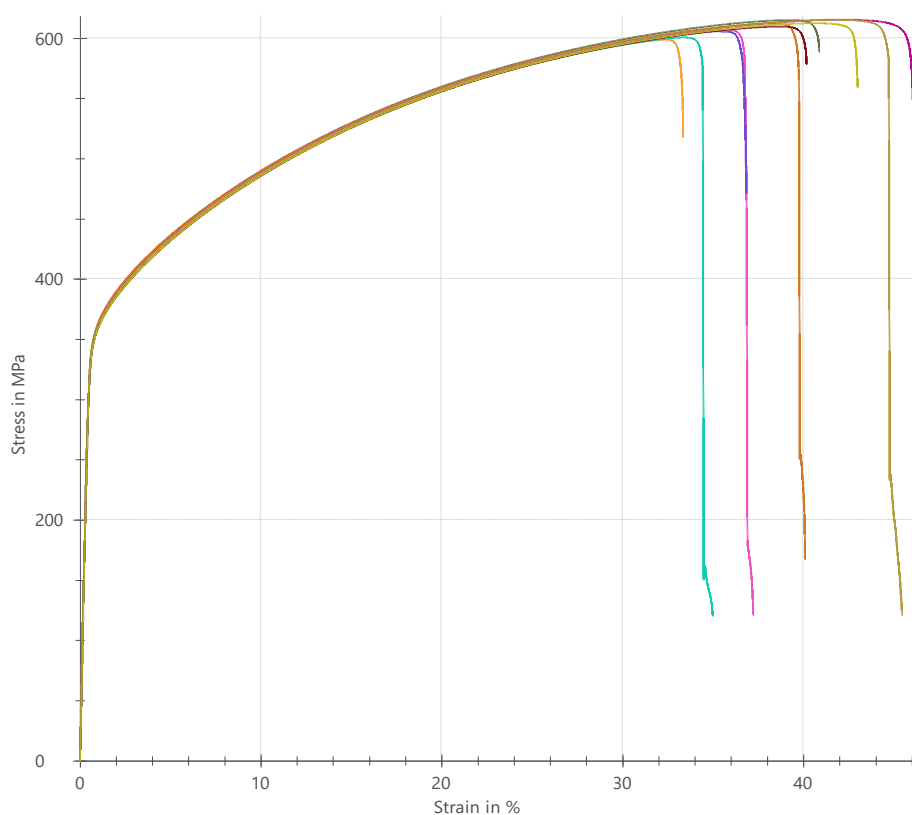
V následující tabulce (Tabulka 5) a na následujícím obrázku (Obrázek 39) jsou shrnuty výsledky tahové zkoušky u svarů připravených pomocí ručního laserového svařování bez přídavného materiálu.

Tabulka 5 Výsledky tahové zkoušky – ruční laserové svařování bez přídavného materiálu

	Modul pružnosti	Mez pevnosti	Tažnost
Číslo zkušebního tělesa	MPa	MPa	%
1H _B	69800	615	39,1
2H _B	69700	612	38,3
3H _B	70000	607	35,6
4H _B	69900	606	35,2
5H _B	69800	615	42,3

6H _B	70000	615	41,8
7H _B	69700	599	32,3
8H _B	70000	601	33,4
9H _B	70100	610	38,5
10H _B	70300	612	40,7
Průměr (10)	70000	609	37,7
Směrodatná odchylka	198	6,03	3,5
Variační koeficient [%]	0,28	0,99	9,19

(zdroj: vlastní)



Obrázek 39 Naměřené tahové křivky – ruční laserové svařování bez přídavného materiálu

(zdroj: vlastní)

Výsledky napětí na mezi pevnosti pro tuto řadu zkušebních těles vykazují pozitivní trend, protože všechny naměřené hodnoty se nachází v rozmezí předepsaných hodnot. Některé hodnoty se sice blíží ke spodní hranici, ale vzhledem k variačnímu koeficientu lze konstatovat, že tyto hodnoty jsou stabilní.

Výsledky tažnosti těchto zkušebních těles v porovnání s tělesy, kde byl použit při tvorbě svaru i přídavný materiál, vykazují výrazně lepší výsledky a přibližují se

předepsaným hodnotám, které jsou dány normou (40-45 %). Nicméně i v tomto případě se hodnoty nachází pod spodní hranicí. Jedním z hlavních důvodů může být zbytkové pnutí ve svaru vlivem rychlého ochlazování. Tyto výsledky se mohou považovat za částečně vyhovující. Vysoká hodnota variačního koeficientu odráží lokální rozdíly v hodnotách. Hodnoty modulu pružnosti jsou stále a nevykazují velké rozdíly.

7.1.3 Výsledky svarů – robotické svařování (R)

V následující tabulce (Tabulka 6) a na následujícím obrázku (Obrázek 40) jsou shrnuty výsledky tahové zkoušky u svarů připravených pomocí robotického svařování.

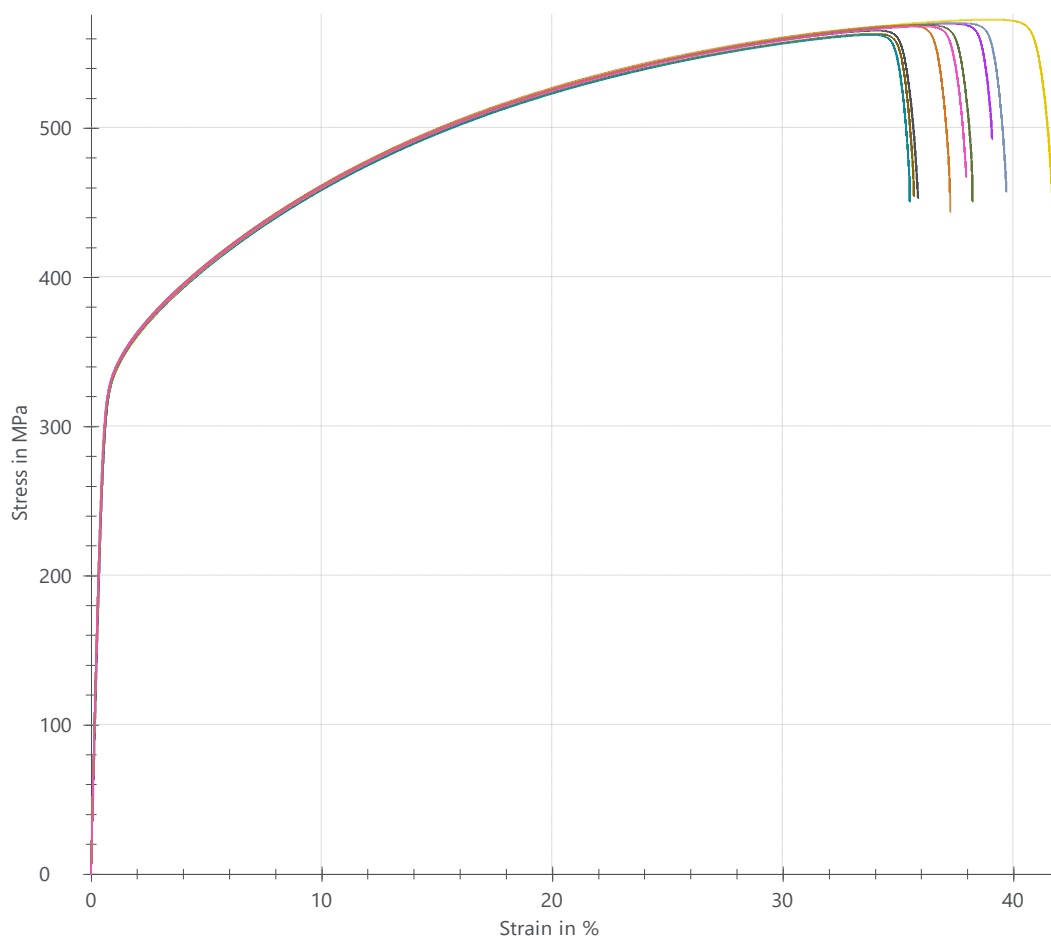
Tabulka 6 Výsledky tahové zkoušky – robotické svařování

	Modul pružnosti	Mez pevnosti	Poměrné prodloužení
Číslo vzorku	MPa	MPa	%
1R	60100	570	37,1
2R	60100	563	33,9
3R	62700	570	37,5
4R	60300	562	33,8
5R	61000	565	34,1
6R	62700	573	39,1
7R	62600	569	36,1
8R	62600	569	35,2
9R	62400	568	36
10R	62600	569	36,1
Průměr (10)	61600	568	35,9
Směrodatná odchylka	1220	3,43	1,8
Variační koeficient [%]	1,98	0,6	5,09

(zdroj: vlastní)

Výsledky napětí na mezi pevnosti jsou u těchto vzorků velice stabilní, k čemuž pravděpodobně přispěl stabilní proces, který je dosažen použitím robota. Oproti ruční laserové svářečce se nestane, že by změnil rychlost svařování. Hodnoty napětí na mezi pevnosti jsou u těchto vzorků v normě a nedochází u nich k výrazným výkyvům. Jedná se o velmi pozitivní jev a je žádoucí. Zajišťuje opakovatelné výsledky a zároveň kvalitu svaru. Při porovnání hodnot modulu pružnosti je vyhodnoceno, že se neobjevují velké rozdíly.

Výsledky tažnosti jsou mírně pod normou, ale pozitivním aspektem je, že hodnoty jsou stabilní.



Obrázek 40 Naměřené tahové křivky – robotické svařování

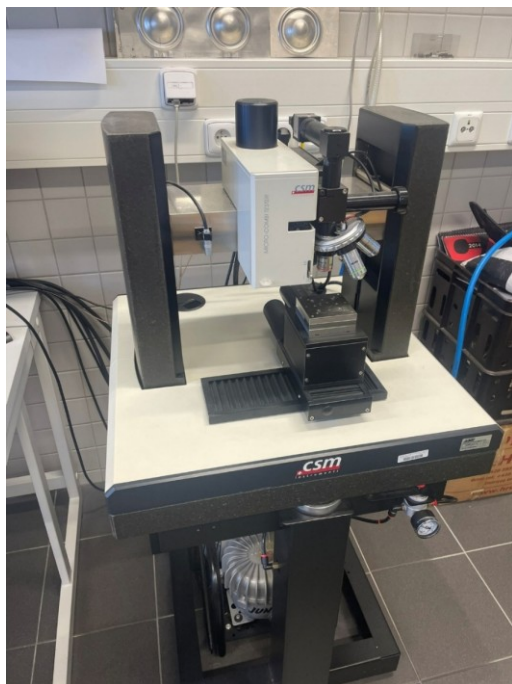
(zdroj: vlastní)

7.2 Zkouška mikromechanických vlastností

Pro měření mikromechanických vlastností (vtiskové tvrdosti, modulu pružnosti a hloubky vtisku) bylo použito zařízení Micro Combi Tester (Obrázek 41).

Nastavené parametry zkoušky:

- zatížení: 1 N,
- výdrž: 12 s,
- rychlost: 2 N/min



Obrázek 41 Micro Combi Tester

(zdroj: vlastní)

7.2.1 Výsledky vtiskové tvrdosti

V následující tabulce (Tabulka 7) a na následující obrázcích (Obrázek 42, 43 a 44) jsou uvedeny výsledky vtiskové tvrdosti. Měření probíhalo na každém vzorku vždy ve dvou oblastech (oblast základního materiálu – plechu a oblast svaru).

Tabulka 7 Výsledky měření vtiskové tvrdosti

Číslo měření	Označení místa měření a druh vzorku					
	HB_svar [HV]	HB_plech [HV]	R_svar [HV]	R_plech [HV]	HD_svar [HV]	HD_plech [HV]
1	212,1	191,4	216,1	194,3	229,5	189,5
2	211,2	192,4	210,8	188,4	235,8	182,7
3	200,6	197,9	216,3	193,8	235,3	192,7
4	206,9	184,3	219,3	190,6	229,3	184,6
5	196,3	186,1	208,0	192,0	228,8	191,0
Průměr	205,4	190,4	214,1	191,9	231,7	188,1
Směrodatná odchylka	6,8	5,4	4,6	2,4	3,5	4,3

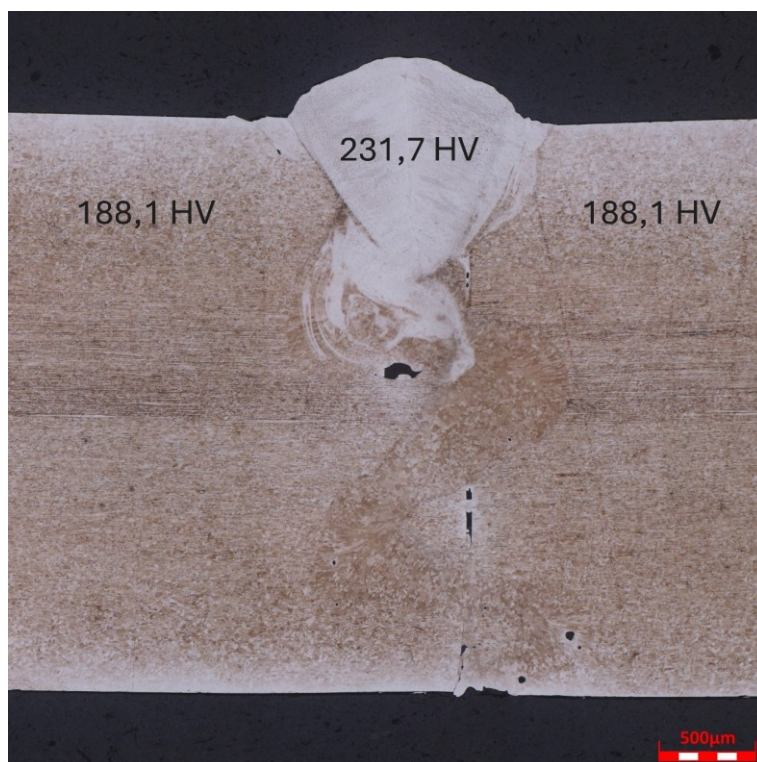
(zdroj: vlastní)

Ruční laserové svařování bez přídavného materiálu (HB) vykázalo ze všech hodnocených metod nejnižší hodnoty vtiskové tvrdosti. Tento výsledek je dán charakterem procesu, kde

absence přídavného materiálu a manuální vedení svařovací hlavy vedou k pomalejšímu ochlazování a tvorbě měkčích strukturálních fází. Výraznější rozptyl naměřených hodnot současně poukazuje na vyšší citlivost této metody na změny procesních parametrů a individuální přístup obsluhy.

Ruční laserové svařování s přídavným materiálem (HD) naopak dosáhlo nejvyšších hodnot vtiskové tvrdosti ze všech testovaných metod. Použití přídavného materiálu s optimalizovaným chemickým složením spolu s charakteristicky rychlým tuhnutím laserového svaru vytvořilo podmínky pro vznik výrazně tvrdší mikrostruktury. Tato metoda však vyžaduje přesné dávkování přídavného materiálu, neboť nerovnoměrnost v jeho distribuci může vést k lokálním změnám mechanických vlastností.

Robotické laserové svařování (R) prokázalo vyvážené výsledky, které leží na pomezí obou metod ručního svařování. Automatizace procesu zde zajišťuje vysokou stabilitu tepelného cyklu a tím i konzistentní mikrostrukturní charakteristiky svarového spoje. Tento přístup minimalizuje typické problémy ručního svařování a nabízí optimální kombinaci mechanických vlastností a procesní reliability.



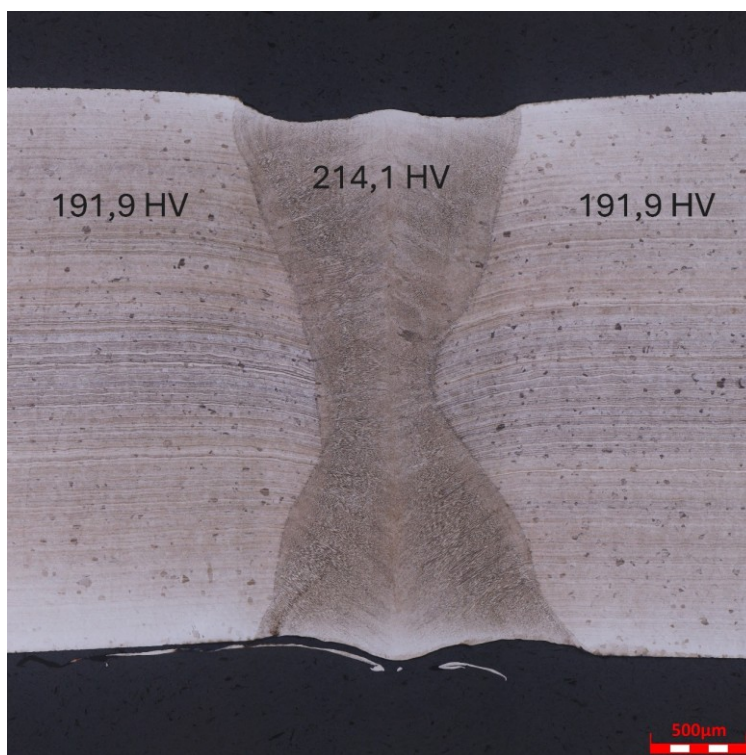
Obrázek 42 Kompoziční snímek svaru s hodnotami vtiskové tvrdosti pro vzorky HD

(zdroj: vlastní)



Obrázek 43 Kompoziční snímek svaru s hodnotami vtiskové tvrdosti pro vzorky HB

(zdroj: vlastní)



Obrázek 44 Kompoziční snímek svaru s hodnotami vtiskové tvrdosti pro vzorky R

(zdroj: vlastní)

7.2.2 Výsledky modulu pružnosti

Při této zkoušce byl naměřen i modul pružnosti, který je zaznamenán v následující tabulce (Tabulka 8). Jedná se o stanovení schopnosti materiálu elasticky (vratně) se deformovat při působení mechanického napětí.

Tabulka 8 Výsledky měření modulu pružnosti

Číslo měření	Označení místa měření a druh vzorku					
	HB_svar [GPa]	HB_plech [GPa]	R_svar [GPa]	R_plech [GPa]	HD_svar [GPa]	HD_plech [GPa]
1	175,6	162,8	182,9	176,0	202,0	190,5
2	176,7	179,8	156,3	189,6	183,9	203,1
3	179,6	172,8	182,8	165,1	173,2	167,3
4	174,4	194,2	164,8	167,4	182,1	169,9
5	182,4	170,7	173,9	167,4	160,3	191,5
Průměr	177,7	176,1	172,1	173,1	180,3	184,5
Směrodatná odchylka	3,2	11,8	11,6	10,1	15,3	15,3

(zdroj: vlastní)

Ruční laserové svařování bez přídavného materiálu vykazuje nejhomogennější rozložení modulu pružnosti v oblasti svaru, s minimálními odchylkami od základního materiálu. Tato metoda prokazuje schopnost zachovat původní elastické vlastnosti spojovaných materiálů, což ji činí vhodnou pro aplikace citlivé na změny tuhosti. Stabilita výsledků naznačuje dobrou kontrolu tepelného ovlivnění během procesu.

Robotické laserové svařování bez přídavného materiálu vykazuje vyrovnané hodnoty modulu pružnosti mezi svarem a základním materiálem, avšak s větší variabilitou měřených hodnot. Tento jev může odrážet složitější interakci mezi automatizovaným procesem a lokálními změnami mikrostruktury. I přes vyšší rozptyl výsledků metoda zachovává základní elastické charakteristiky spojovaných materiálů.

Ruční laserové svařování s přídavným materiálem představuje technologii s největším potenciálem pro úpravu modulu pružnosti, ale zároveň s nejvyšší mírou variability. Použití přídavného materiálu umožňuje cíleně ovlivňovat elastické vlastnosti spoje, avšak nároky na přesnost procesu jsou výrazně vyšší. Tato metoda by vyžadovala další optimalizaci pro dosažení konzistentnějších výsledků.

7.2.3 Výsledky hloubky vrypu

Posledním parametrem vyhodnocovaným v rámci měření mikromechanických vlastností byla hloubka vrypu (Tabulka 9). Jedná se o metodu testování mechanických vlastností materiálů, při které se do povrchu zatlačuje speciální hrot (obvykle diamantový) a průběžně měří hloubka jeho průniku při působícím zatížení.

Tabulka 9 Výsledky měření hloubky vrypu

Číslo měření	Označení místa měření a druh vzorku					
	HB_svar [nm]	HB_plech [nm]	R_svar [nm]	R_plech [nm]	HD_svar [nm]	HD_plech [nm]
1	4400,4	4647,0	4359,2	4592,0	4223,2	4626,4
2	4415,1	4602,4	4437,9	4638,3	4195,7	4697,8
3	4519,4	4549,1	4358,0	4622,5	4207,1	4611,7
4	4466,8	4684,9	4408,3	4647,8	4242,0	4703,7
5	4557,6	4686,9	4439,4	4656,8	4338,5	4607,8
Průměr	4471,9	4634,1	4400,5	4631,5	4241,3	4649,5
Směrodatná odchylka	67,0	58,7	40,3	25,5	57,1	47,4

(zdroj: vlastní)

Ruční laserové svařování bez přídavného materiálu vykazuje střední hodnoty odolnosti proti plastické deformaci s přiměřenou stabilitou výsledků. Tato metoda zachovává relativně vyrovnaný poměr mechanických vlastností mezi svarovou oblastí a základním materiálem, přičemž vykazuje typickou variabilitu spojenou s manuálním procesem. Výsledky naznačují, že tepelný vliv laserového svařování vede k mírnému zvýšení odolnosti svaru, aniž by výrazně narušil homogenitu materiálu.

Robotické laserové svařování bez přídavného materiálu prokazuje vyšší konzistenci výsledků než ruční verze, s výrazně nižší variabilitou měřených hodnot. Automatizovaný proces zajišťuje rovnoměrnější rozložení mechanických vlastností v svarové oblasti, přičemž zachovává podobný vztah mezi svařovanou a základní částí jako u ruční metody. Tato technologie vykazuje optimální kombinaci zvýšené odolnosti svaru a procesní stability.

Ruční laserové svařování s přídavným materiálem dosahuje nejlepších výsledků z hlediska odolnosti proti plastické deformaci, ačkoliv s o něco vyšší variabilitou než robotická metoda. Použití přídavného materiálu umožňuje výrazně modifikovat mechanické vlastnosti svarové oblasti, což vede k významnému zvýšení její pevnosti. Tato metoda představuje

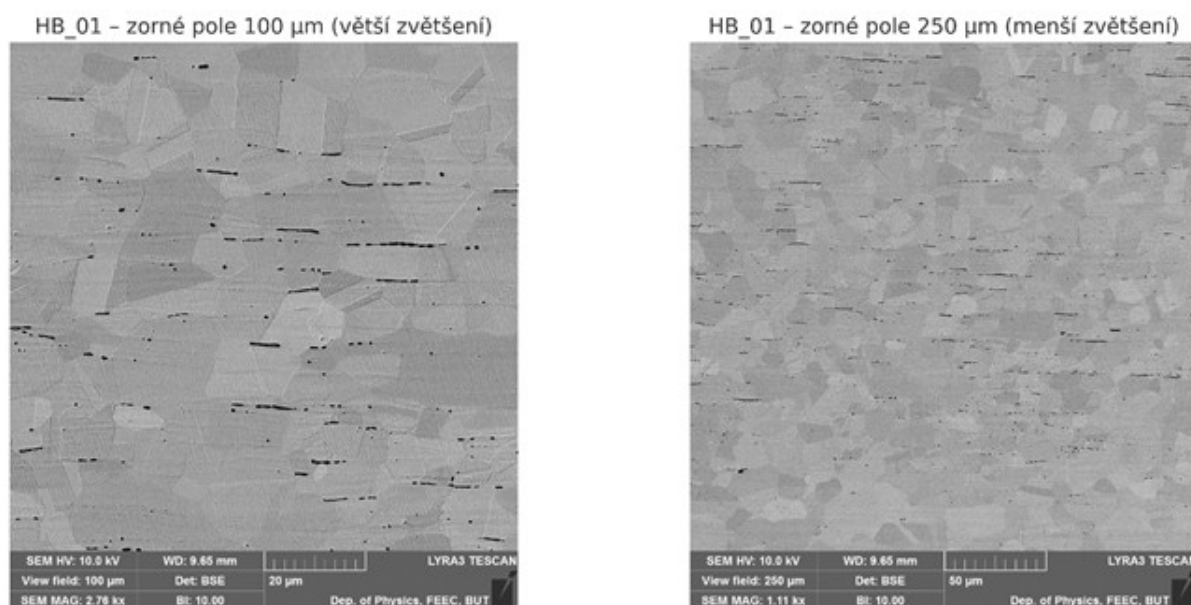
účinný způsob, jak cíleně vylepšit vlastnosti svarového spoje, avšak vyžaduje pečlivější kontrolu procesních parametrů.

7.3 Metalografická analýza

Pro detailnější zhodnocení kvality svarových spojů byla provedená metalografická analýza, v rámci které byla hodnocena mikro a makro struktura jednotlivých svarů.

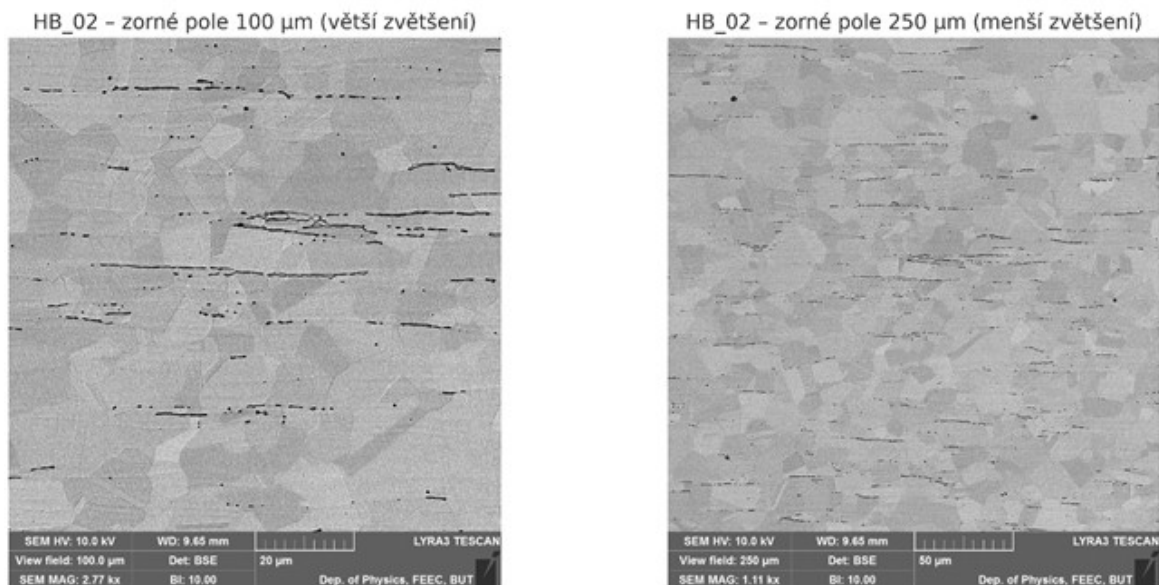
7.3.1 Vyhodnocení mikrostruktury

Na následujících obrázcích (Obrázek 45, 46 a 47) jsou zobrazeny výsledky mikrostruktury jednotlivých svarů. Struktura byla sledována pod elektronovým mikroskopem ve dvou úrovních přiblížení (100 a 250 mikrometrů).



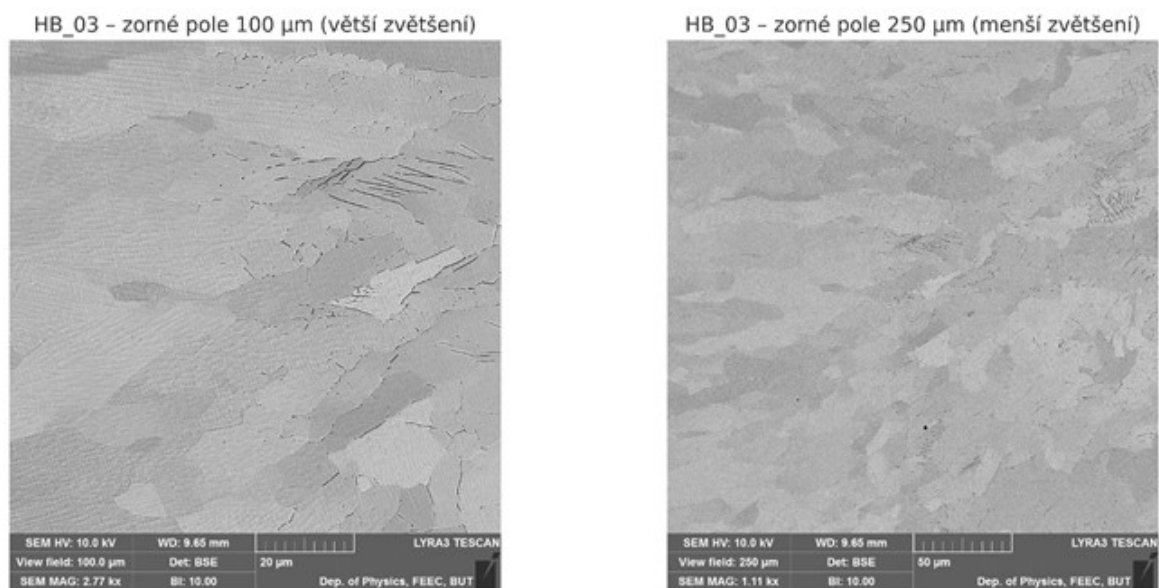
Obrázek 45 Výsledné snímky mikrostruktury HB_01– ruční laserové svařování bez
přídavného materiálu

(zdroj: vlastní)



Obrázek 46 Výsledné snímky mikrostruktury HB_02– ruční laserové svařování bez
přídavného materiálu

(zdroj: vlastní)



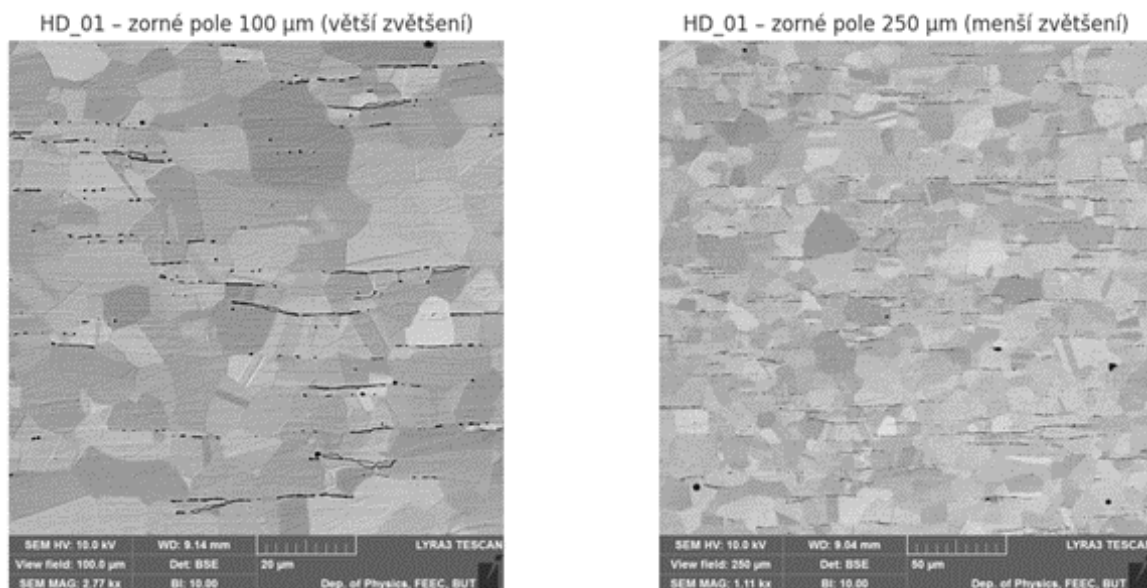
Obrázek 47 Výsledné snímky mikrostruktury HB_03– ruční laserové svařování bez
přídavného materiálu

(zdroj: vlastní)

Na obrázcích výše (Obrázek 45 a Obrázek 46 a Obrázek 47) je znázorněna mikrostruktura svaru, který vznikl ručním svařováním bez použití přídavného materiálu. Na snímcích je vidět, že kov po svaření ztuhnul do jemné a rovnoměrné struktury. V některých částech se objevují protáhlá zrna, ale nejsou tak výrazně uspořádaná. To je dané tím, že ruční svařování není tak přesné a proces může být méně stabilní. V oblasti přechodu mezi svarovým kovem

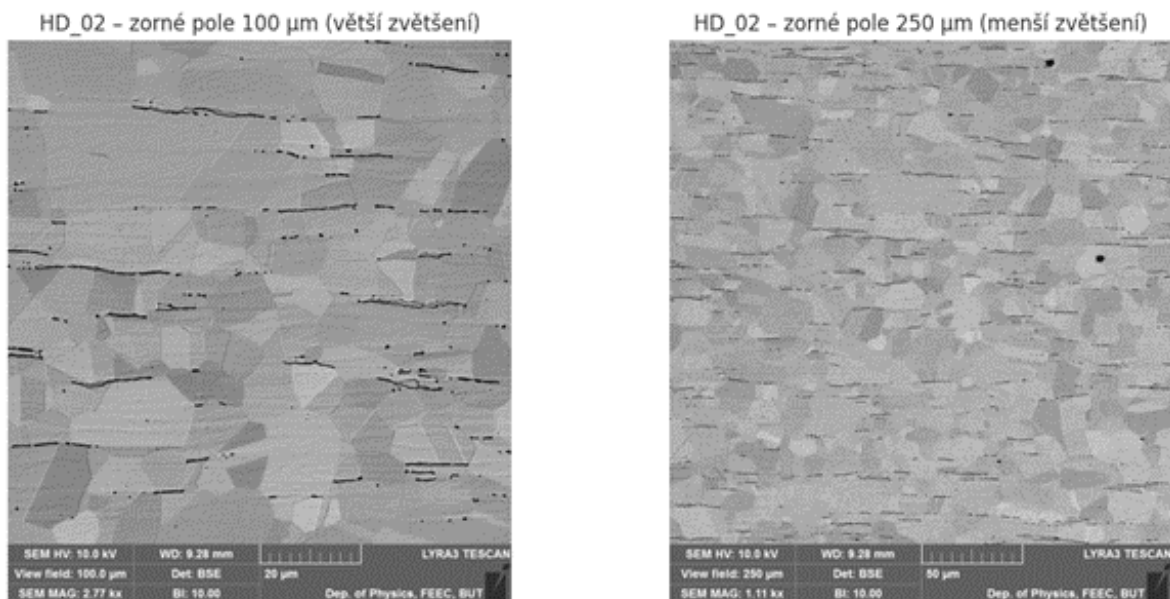
a původním materiálem jsou krystaly menší, hustší a dobře rozložené. I když je svar vytvořen ručně, snímky neukazují žádné vážné chyby jako póry, praskliny nebo cizí částice.

Na obrázcích níže (Obrázek 48, Obrázek 49 a Obrázek 50) je znázorněna mikrostruktura svaru, která vznikla ručním svařováním s použitím přídavného materiálu. Na rozdíl od předchozí metody není struktura tak pravidelná. Přídavný materiál ovlivnil způsob tuhnutí – kov ztuhl do smíšené struktury, která nevytváří tak výrazná protáhlá zrna jako u metody bez přídavku. Zrna jsou často menší, různě orientovaná a někde mají složitější tvar. To nutně nemusí znamenat, že má svar horší kvalitu. Tato metoda může být výhodná pro určité případy, kde je třeba vyplnit mezeru, protože přídavný materiál umožňuje lepší spojení. Na snímcích se neobjevují žádné závažné chyby. Svar je celkově čistý, bez prasklin nebo pórů.



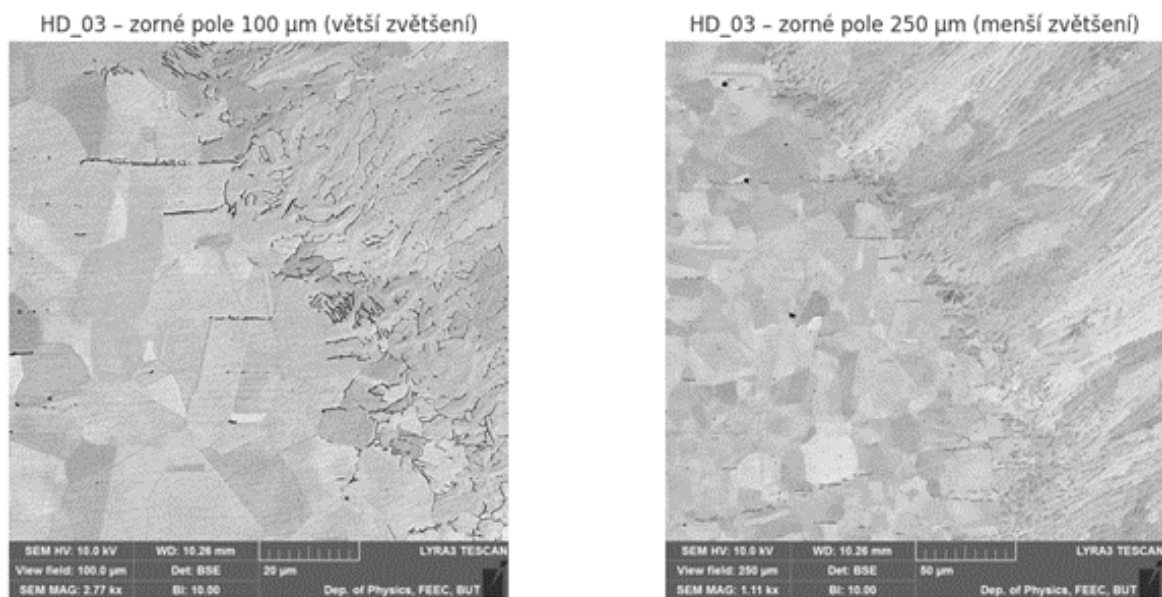
Obrázek 48 Výsledné snímky mikrostruktury HD_01 – ruční laserové svařování s přídavným materiálem

(zdroj: vlastní)



Obrázek 49 Výsledné snímky mikrostruktury HD_02 – ruční laserové svařování s
přídavným materiálem

(zdroj: vlastní)

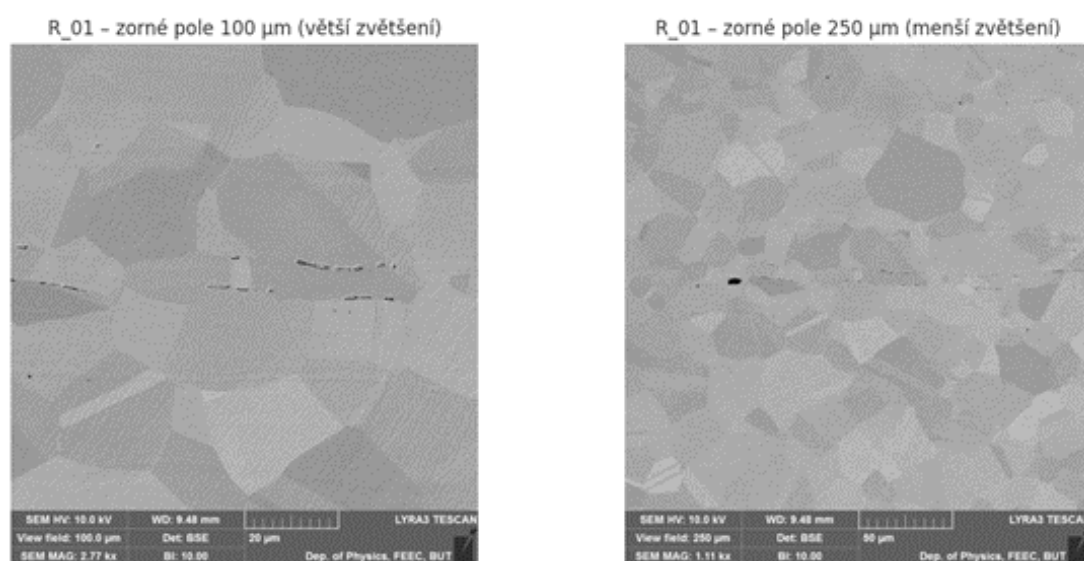


Obrázek 50 Výsledné snímky mikrostruktury HD_03 – ruční laserové svařování s
přídavným materiálem

(zdroj: vlastní)

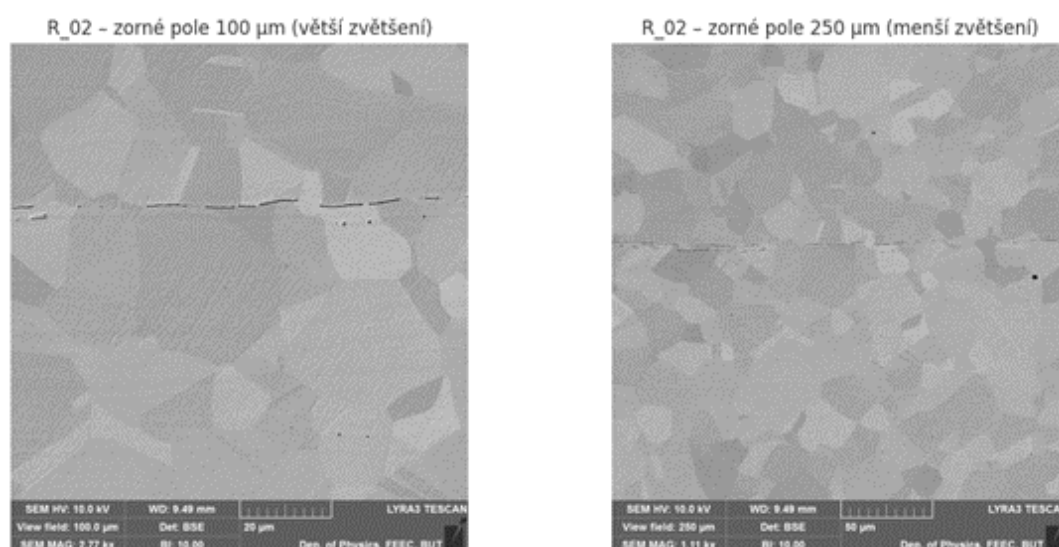
Na obrázku níže (Obrázek 51, Obrázek 52, Obrázek 53) je znázorněna mikrostruktura svaru, který pomocí robotického svařování. Na všech snímcích je vidět velmi pravidelná a klidná struktura. V oblasti, kde kov po svaření ztuhnul, se vytvořily protáhlé krystaly, které rostou směrem od okrajů do středu svaru. Vypadají jako táhlé proužky nebo "vlákna", které

jdou jedním směrem – to je pravděpodobně důsledek velmi rychlého ochlazení během svařování. Tato struktura je rovná, uspořádaná a bez větších nepravidelností. Díky tomu má svar velmi dobré vlastnosti – je pevný a bez zbytečných vnitřních napětí. V místech, kde svar přechází zpět do původního materiálu, jsou krystaly menší a jemnější. Na snímcích nejsou vidět žádné chyby jako praskliny, póry (dírký) nebo nečistoty. Svar je zcela čistý. To ukazuje na to, že robotické svařování bez přídavného materiálu je velmi přesné a dává velmi kvalitní výsledek.



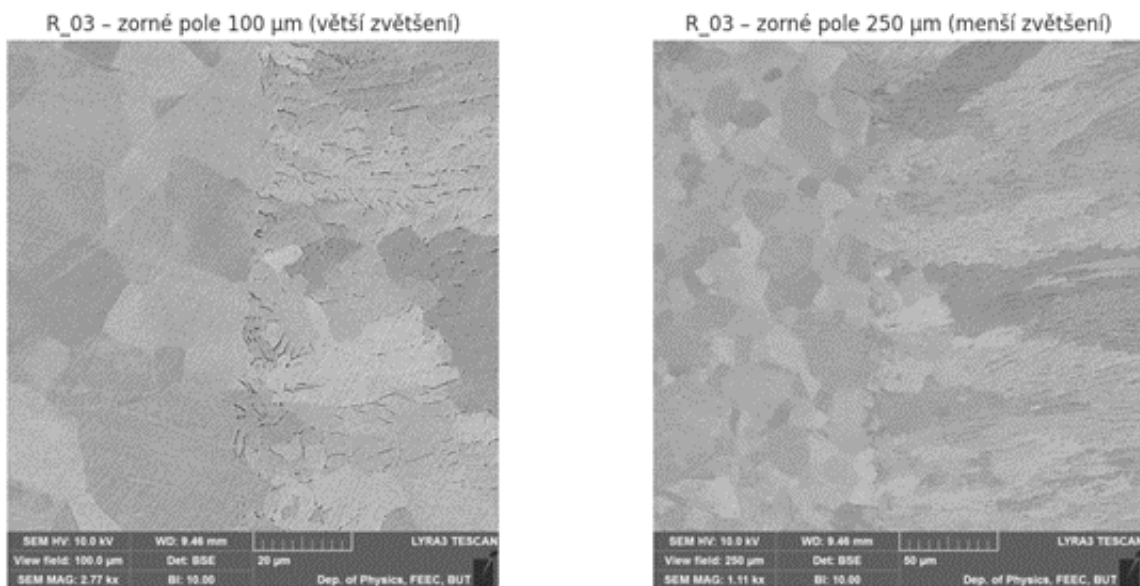
Obrázek 51 Výsledné snímky mikrostruktury R_01 – robotické svařování

(zdroj: vlastní)



Obrázek 52 Výsledné snímky mikrostruktury R_02 – robotické svařování

(zdroj: vlastní)

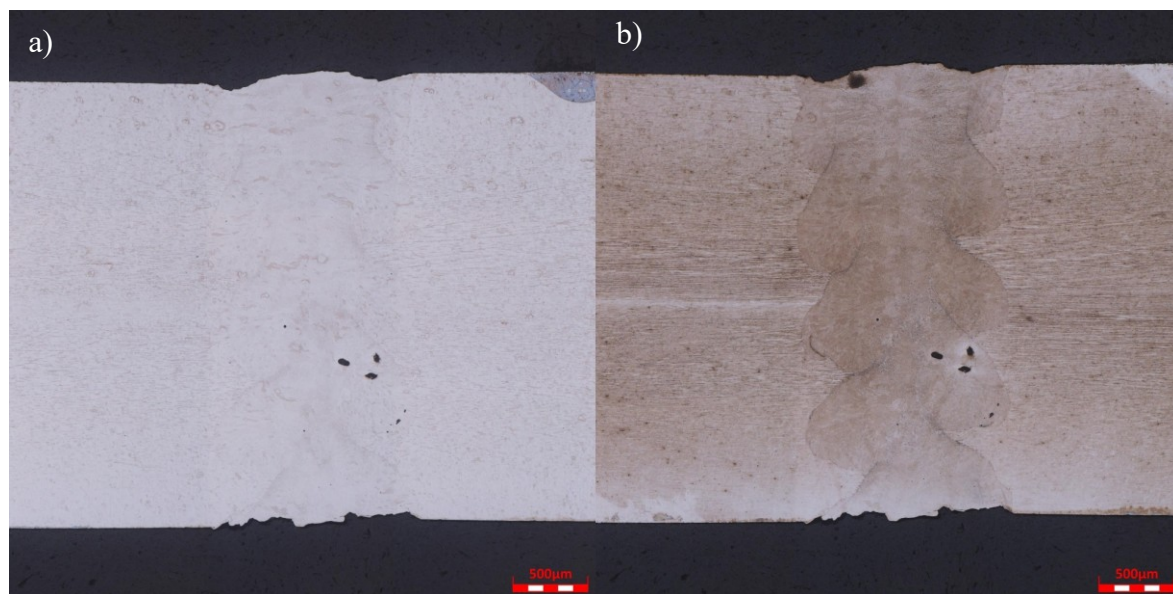


Obrázek 53 Výsledné snímky mikrostruktury R_03 – robotické svařování

(zdroj: vlastní)

7.3.2 Vyhodnocení makrostruktury

Na obrázku níže (Obrázek 54) je zachycen svar vytvořený ručním laserovým svařováním bez použití přídavného materiálu. Tento způsob spočívá v ručním vedení laserového paprsku, což může ovlivnit pravidelnost a stabilitu svaru v závislosti na zkušenostech operátora.

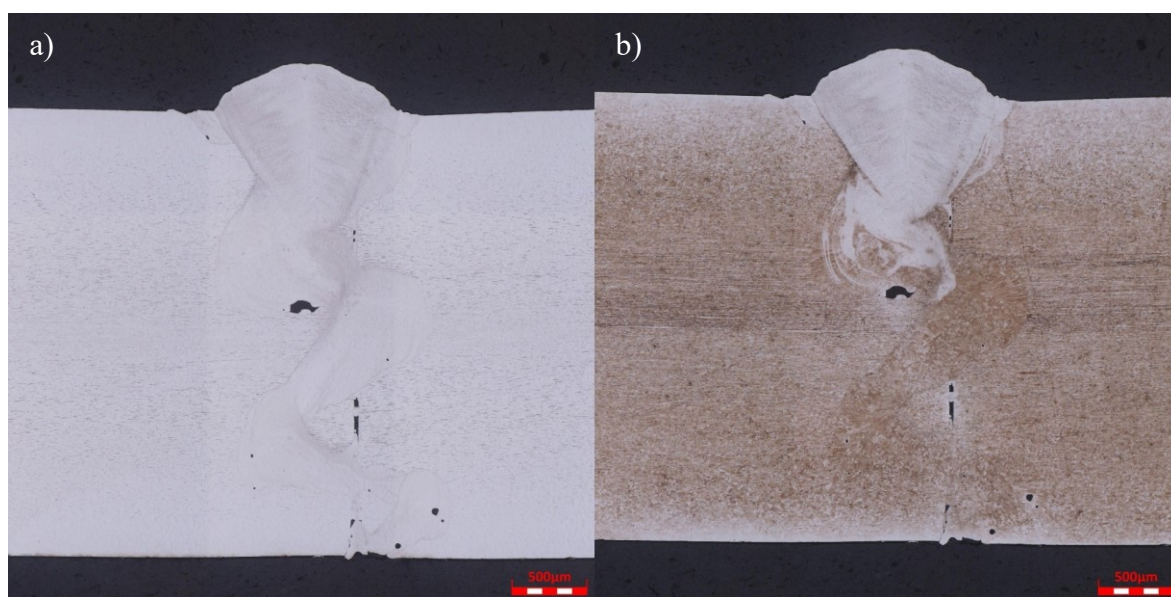


Obrázek 54 Výsledné snímky makrostruktury – ruční laserové svařování bez přídavného materiálu: a) před leptáním, b) po leptání

(zdroj: vlastní)

Mikrostruktura ukazuje opakovaně navazující oblasti taveniny s viditelným členěním v místě průchodu paprsku. Ve spodní části svaru jsou patrné drobné pórovité dutiny, které mohou být důsledkem neideálních podmínek během svařování – například kolísání rychlosti pohybu nebo kolísání výkonu. Tyto nepravidelnosti mohou vést ke vzniku vad, které mají dopad na kvalitu spoje.

Přechod mezi svarovým kovem a základním materiálem je poměrně ostře ohraničený, což odpovídá vysoké koncentraci tepelné energie laseru. Struktura svaru působí jemnozrně a celkově kompaktně, s výjimkou uvedených lokálních vad. Absence přídavného materiálu se může projevit i ve tvaru průvaru, který je úzký a protáhlý.



Obrázek 55 Výsledné snímky makrostruktury – ruční laserové svařování s přídavným materiálem. a) před leptáním, b) po leptání

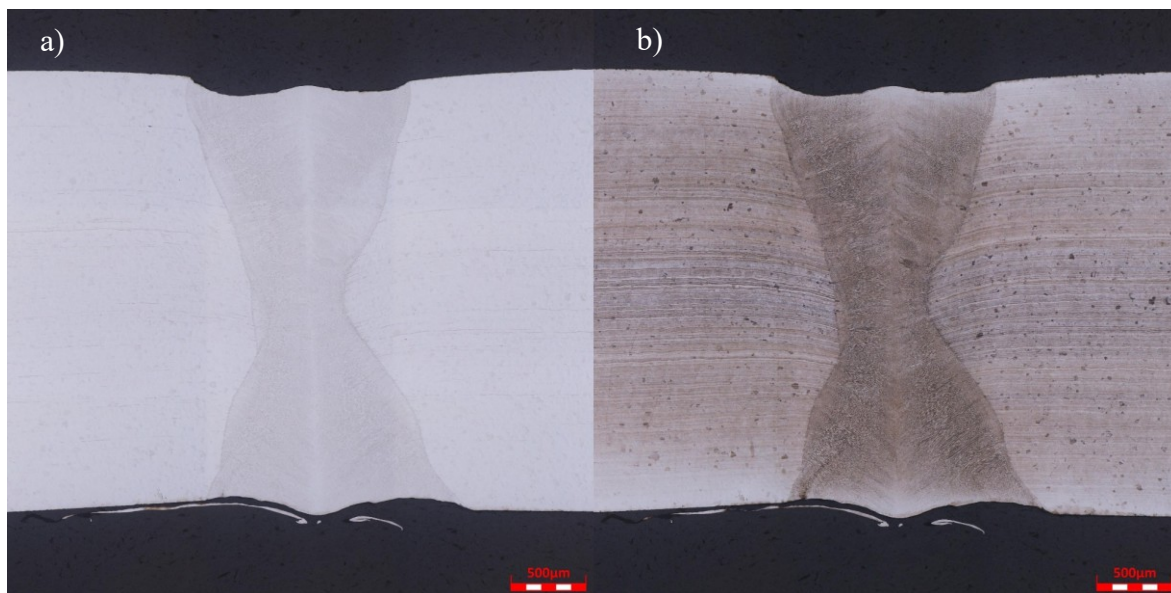
(zdroj: vlastní)

Na obrázku 55 je zaznamenán svar vytvořený ručním laserovým svařováním s přídavným materiálem. Tento způsob umožňuje lépe řídit tvar svarového spoje a často přináší zlepšení mechanických vlastností díky doplnění materiálu do svarové lázně.

V porovnání s předchozím svarovým spojem je zde zřetelný nános přídavného materiálu v horní části spoje, který výrazně mění geometrii svaru. Spoj je zde robustnější a v horní části dosahuje větší šířky. Makrostruktura v této části působí velmi kompaktně a homogenně, což může být výsledkem lepšího prohrátí a mísení základního a přídavného materiálu. Ve spodní části svaru se však objevuje několik výraznějších vad – póry a jedna větší dutina, která by mohla být považována za vadu typu nedostatečného provaření nebo

zachycení plynu. V oblasti přechodu mezi jednotlivými vrstvami taveniny jsou také patrné jemné kontury, které naznačují ne zcela plynulé navázání jednotlivých průchodů laseru.

Z hlediska celkové struktury svar působí méně rovnoměrně než svar bez přídavného materiálu, nicméně horní část spoje díky dodanému materiálu nabízí lepší překrytí a potenciálně vyšší pevnostní rezervu.



Obrázek 56 Výsledné snímky makrostruktury – robotické svařování. a) před leptáním, b) po leptání

(zdroj: vlastní)

Obrázek výše (Obrázek 50) zachycuje svar vytvořený robotickým laserovým svařováním bez použití přídavného materiálu. Tato metoda vyniká vysokou přesností, opakovatelností a stabilitou procesu, díky čemuž je vhodná pro aplikace, kde je klíčová kvalita a konzistence svarového spoje.

Svarová zóna má velmi souměrný tvar s výrazným průvarem a rovnoměrným profilem po celé své výšce. V porovnání s ručně vedeným svařováním (HB a HD) působí svar kompaktněji a bez viditelných vad, jako jsou póry nebo přerušení. Struktura svaru je jemná, s rovnoměrným rozložením bez známek poruch nebo odchylek. Přechody mezi tavnou zónou a základním materiálem jsou plynulé, což naznačuje stabilní vedení paprsku a optimální řízení procesních parametrů. V horní ani spodní části svaru nejsou patrné žádné vady nebo deformace, což svědčí o velmi dobře zvládnutém procesu.

V porovnání s ručním svařováním bez přídavného materiálu (HB) zde zcela chybí lokální dutiny a nepravidelnosti. Oproti metodě HD není svar sice tak široký v horní části,

avšak jeho vnitřní kompaktnost a přesnost tvaru jej předurčují k vysoké spolehlivosti v provozním zatížení.

7.3.3 Vyhodnocení chemické analýzy

Chemická analýza svarových spojů vytvořených třemi různými metodami laserového svařování ukazuje velmi blízké složení ve většině hlavních legujících prvků (Cr, Ni, Mo), což odpovídá základnímu materiálu třídy 1.4404 (X2CrNiMo17-12-2). Přesto lze ve výsledcích pozorovat některé drobné, avšak významné rozdíly, které mohou souviset s použitím přídavného materiálu, stabilitou procesu či intenzitou mísení během tavení.

U metody HD (ruční svařování s přídavným materiálem) byla zjištěna mírně vyšší koncentrace prvků Mo (2,094 %), Cr (16,72 %) a Ni (10,10 %) oproti ostatním vzorkům. To svědčí o tom, že přídavný materiál měl obohacené složení, které mohlo být zvoleno pro zlepšení korozní odolnosti a pevnosti spoje. Výrazně vyšší hodnota mikrotvrlosti, pozorovaná u této metody, může být právě důsledkem zvýšeného obsahu těchto legujících prvků. Zároveň byla ale zaznamenána vyšší variabilita v některých složkách, jako je měď (Cu), což může být důsledkem nestejněmírného promíchání kovové lázně.

Naopak u metody HB (ruční svařování bez přídavného materiálu) bylo složení relativně stabilní a odpovídající základnímu materiálu, nicméně u prvků jako Cr (16,53 %), Mo (2,120 %) a Ni (9,644 %) byly hodnoty mírně nižší než u HD, což odpovídá absenci přídavného kovu a čistě tepelnému zpracování původního materiálu. Ve srovnání s HD bylo složení homogennější, ale s mírně nižší průměrnou tvrdostí a větším rozptylem v hodnotách železa (Fe), což může být způsobeno nestejněmírností tavení při ručním vedení paprsku.

Metoda R (robotické svařování bez přídavného materiálu) prokázala nejvyrovnanější složení napříč všemi měřenými prvky. Průměrné hodnoty Mo (2,130 %), Cr (16,61 %) a Ni (9,682 %) byly velmi blízké těm u HB, avšak s nižšími směrodatnými odchylkami, což potvrzuje vysokou procesní stabilitu. Zajímavostí je o něco vyšší obsah kobaltu (Co: 0,333 %) a dusíku (N: 0,042 %), což může souviset s nižší rychlostí ochlazování nebo charakteristikou ochranné atmosféry během robotizovaného procesu. Vyšší průměr Fe (68,68 %) a nižší variabilita naznačují lepší homogenitu kovové struktury v oblasti svaru.

Z hlediska mikrolegujících prvků (např. V, W, Nb, Ti) se jejich obsah napříč metodami výrazně nelišil, přičemž žádný ze vzorků nevykazoval kritické koncentrace, které by negativně ovlivňovaly vlastnosti spoje. Mírně vyšší obsah Nb u HD a R by mohl přispět k vyšší tvrdosti a stabilitě struktur v oblasti tepelného ovlivnění.

8 DISKUZE NAD VÝSLEDKY

Při analýze mechanických vlastností svarových spojů, které byly vytvořeny třemi odlišnými technikami – konvenčním laserovým svařováním s přídavným materiálem, konvenčním laserovým svařováním bez přídavného materiálu a robotickým laserovým svařováním – byly identifikovány významné odchylky v pevnostních charakteristikách a tažnosti těchto spojů. Konvenční metoda s přídavným materiálem vykazovala přesto dostatečnou průměrnou pevnost dosahující 566 MPa, avšak s vyšší variabilitou (4,8 %) a kriticky nízkou tažností (23,2 %), která nebyla schopna splnit požadovaných 40 % (Tabulka 4). Tento jev pravděpodobně souvisí s heterogenitou struktury, jež je způsobena přidáním cizího materiálu a možností vzniku vad ve spoji.

Naopak konvenční svařování bez přídavného materiálu demonstrovalo vyšší a stabilnější pevnost, a to na úrovni 609 MPa s variabilitou jen 0,99 %, spolu s lepší tažností (37,7 %), přičemž výsledek zůstal stále těsně pod nastavenou normou (Tabulka 5). Tento výsledek naznačuje, že absence přídavného materiálu napomáhá vytvoření homogennějšího přechodu mezi základním materiálem a svarovou zónou.

Nejpřesnější a nejkonzistentnější výsledky ovšem poskytlo robotické laserové svařování, jež se vyznačovalo vyváženou pevností (568 MPa) s minimálním rozptylem (0,6 %) a tažností blízkou požadovaným hodnotám (35,9 %) - (Tabulka 6). I přes mírně nižší tažnost vzhledem k normativním požadavkům se tato metoda vyznačuje vysokou reprodukovatelností, což je zásadní pro její aplikaci v průmyslovém prostředí. Z hlediska stability procesu a kvality spojů se proto ukazuje jako nejlepší volbou, zatímco konvenční svařování bez přídavného materiálu by mohlo být vhodné pro aplikace, které vyžadují vyšší pevnost. U konvenční metody s přídavným materiálem je žádoucí provést další optimalizaci parametrů, zejména s cílem zlepšení tažnosti.

Výsledky měření mikrotvrdosti prokázaly významné rozdíly mezi jednotlivými metodami laserového svařování. Ruční svařování s přídavným materiálem dosáhlo nejvyšších hodnot tvrdosti s průměrem 231,7 HV (Tabulka 7), což je způsobeno kombinací dvou faktorů: jednak přítomností legujících prvků v přídavném materiálu, jednak charakteristickým rychlým tuhnutím typickým pro laserové svařování, které podporuje vznik tvrdých fází v kovové struktuře. Tato metoda však může vést ke zvýšené křehkosti svarového spoje.

Robotické svařování bez přídavného materiálu vykazovalo střední hodnoty tvrdosti kolem 214,1 HV, ale s výrazně menší variabilitou výsledků ($\pm 4,6$ HV) ve srovnání s ručními metodami (Tabulka 7). Tato vyšší stabilita je přímým důsledkem přesnější regulace tepelného vstupu a konzistentnější trajektorie pohybu, kterou zajišťuje robotizovaný proces. Z hlediska opakovatelnosti a předvídatelnosti výsledků se proto tato metoda jeví jako nejspolehlivější.

Nejnižší hodnoty tvrdosti (205,4 HV) s největším rozptylem ($\pm 6,8$ HV) byly zaznamenány u ručního svařování bez přídavného materiálu (Tabulka 7). Tento výsledek odráží omezení ručního procesu, včetně nestejnoměrného rozložení tepla a kolísání rychlosti pohybu svařovací hlavy. Tyto faktory vedou k nerovnoměrnému ochlazování a vzniku heterogenní mikrostruktury s převahou měkčích fází.

Z praktického hlediska tyto rozdíly ukazují, že volba svařovací metody musí vycházet z požadavků konkrétní aplikace. Pro aplikace vyžadující maximální pevnost může být vhodné svařování s přídavným materiálem, zatímco pro kritické aplikace s požadavky na stabilitu vlastností je vhodnější robotické svařování. Ruční metoda pak nachází uplatnění tam, kde jsou přípustné určité tolerance ve vlastnostech spoje. Tato zjištění mají významné implikace pro optimalizaci výrobních procesů v průmyslové praxi.

Výsledky meze pružnosti ukázaly výrazné rozdíly mezi jednotlivými svařovacími metodami. Robotické svařování dosáhlo nejvyšších hodnot, což potvrzuje jeho schopnost vytvářet homogenní spoje s vynikající odolností proti plastické deformaci. Tato metoda zároveň vykazovala minimální rozptyl naměřených hodnot, což dokládá vysokou stabilitu a reprodukovatelnost procesu. Konvenční metody svařování vykazovaly nižší hodnoty meze pružnosti, přičemž variabilita výsledků byla výraznější, zejména u metody s přídavným materiálem.

Měření hloubky vrypu odhalilo odlišné trendy v porovnání s mezí pružnosti. Nejnižší hodnoty hloubky vrypu (a tedy nejvyšší odolnost proti plastické deformaci) byly zaznamenány u ručního svařování s přídavným materiálem. Tento výsledek lze přičíst vlivu přídavného materiálu na mikrostrukturu svaru, který vedl k vytvoření kompaktnější a odolnější struktury. Robotické svařování vykazovalo střední hodnoty hloubky vrypu, ale s výrazně menší variabilitou než ruční metody, což opět potvrzuje jeho procesní stabilitu. Ruční svařování bez přídavného materiálu dosáhlo nejvyšších hodnot hloubky vrypu, což indikuje nižší odolnost proti plastické deformaci.

Vyhodnocení svarových spojů vytvořených třemi různými metodami laserového svařování ukázalo rozdíly v kvalitě, rovnoměrnosti i přítomnosti vad. U svaru zhotoveného ručním vedením laserového paprsku bez použití přídavného materiálu byla pozorována větší proměnlivost ve tvaru průvaru a lokální výskyt pórů, zejména ve spodní části spoje. Tento způsob vykazuje závislost na zručnosti operátora, přičemž i drobné odchylky v pohybu nebo nastavení mohou ovlivnit výslednou kvalitu. Přidání přídavného materiálu vedlo k výraznějšímu vyplnění horní části spoje a robustnějšímu vzhledu svaru, nicméně v mikrostruktuře se objevily známky nepravidelného mísení a větší výskyt vnitřních vad, jako jsou dutiny nebo neúplné navázání jednotlivých průchodů. Naproti tomu svar vytvořený robotickým laserovým svařováním bez přídavného materiálu působil nejkompaktněji a nejrovnoměrněji. Jeho struktura byla jemnozrnná, přechody plynulé a bez známek poruch. Díky automatizovanému vedení laseru a konstantním parametrům bylo dosaženo vysoké opakovatelnosti a minimálního výskytu vad.

Z provedeného hodnocení je zřejmé, že volba vhodné metody laserového svařování nelze posuzovat izolovaně na základě jediné vlastnosti, ale vyžaduje komplexní pohled zohledňující celý soubor mechanických, mikrostrukturních a technologických parametrů. Každá ze zkoumaných metod nabízí určité výhody i omezení, přičemž jejich relevance se může lišit v závislosti na konkrétních požadavcích aplikace.

Ruční metody vykazují větší náchylnost k odchylkám, avšak mohou být vhodné tam, kde není možné nasadit robotizovaná zařízení nebo kde je požadována flexibilita. Použití přídavného materiálu sice přináší určité zpevnění svarové zóny, jak ukazuje zvýšená tvrdost i nižší hloubka vrypu, ale zároveň komplikuje strukturu a zvyšuje riziko vzniku vad. Naopak metoda bez přídavného kovu nabízí homogennější metalurgické spojení, a tedy lepší tažnost a vyšší mezní vlastnosti, byť výsledky stále mírně zaostávají za přísnými normami.

Robotické svařování představuje optimalizovaný kompromis – poskytuje konzistentní kvalitu, vysokou procesní stabilitu a zároveň vyvážené mechanické charakteristiky. Jeho schopnost udržet minimální variabilitu ve všech hodnocených parametrech potvrzuje, že právě kontrola tepelného cyklu a přesnost trajektorie hrají klíčovou roli v ovlivnění konečných vlastností svarového spoje.

Z hlediska průmyslové využitelnosti je tak vhodné zaměřit se nejen na výběr samotné technologie, ale i na optimalizaci konkrétních parametrů procesu pro daný účel. Výsledky rovněž ukazují, že i drobné změny v technologickém postupu mohou mít zásadní dopad na

výsledné vlastnosti spoje, což podtrhuje význam dalšího výzkumu v oblasti parametrické optimalizace, automatizace procesů a kontroly kvality svarových spojů.

Elementární analýza chemického složení svarových spojů ukázala, že všechny vzorky vykazují základní shodu s materiálem typu 1.4404, avšak mezi jednotlivými metodami svařování došlo k dílčím rozdílům, které mohou mít vliv na výsledné vlastnosti spoje. V některých případech byl zaznamenán vyšší obsah legujících prvků, jako je chrom, molybden a nikl, což naznačuje přítomnost přídavného materiálu nebo zvýšené promíchání základního kovu. Rozdíly byly patrné i v koncentracích prvků, které ovlivňují tvrdost a stabilitu struktury, například kobalt nebo vanad. Právě obsah těchto mikrolegur spolu s homogeností prvků hlavních může hrát roli v jemnosti zrna a tvorbě tvrdších fází ve svarové zóně. Stablnější hodnoty byly pozorovány u metod s řízeným vedením paprsku, zatímco u ručně vedených svarů se častěji objevovaly menší výkyvy, a to zejména u prvků s nízkou koncentrací. Výsledky potvrzují, že rovnoměrnost chemického složení úzce souvisí se stabilitou svařovacího procesu a že i drobné odchylky mohou mít vliv na mechanické i mikrostrukturní vlastnosti výsledného spoje.

V případě firmy, která aktuálně disponuje ručním laserovým zařízením a zvažuje investici do robotizovaného systému, se jako nejvhodnější řešení jeví postupná implementace obou metod v závislosti na konkrétních požadavcích výroby.

Na základě provedené analýzy lze říci, že ruční svařování s přídavným materiálem může být výhodné v situacích, kdy je kladen důraz na zvýšenou pevnost a odolnost proti plastické deformaci – například u spojů namáhaných v tahu nebo smyku. Je však nutné počítat s vyšší variabilitou výsledků a nižší tažností, což vyžaduje buď velmi zkušenou obsluhu, nebo důkladnou kontrolu kvality. Tato metoda tak může být efektivní v malosériové nebo zakázkové výrobě, kde se akceptuje určitá míra individuálního přístupu.

Ruční svařování bez přídavného materiálu poskytuje lepší homogenitu spoje a vyšší tažnost, přičemž mechanické vlastnosti se blíží normativním požadavkům. Pokud firma plánuje sériově vyrábět spoje s důrazem na kvalitu, ale ještě nemá k dispozici robotické zařízení, může být tato metoda vhodným výchozím bodem – zvláště při optimalizovaném nastavení parametrů a dobrém školení obsluhy.

Nicméně pokud podnik uvažuje o rozšíření výroby, zvýšení produktivity a snížení variability kvality, pak výsledky jednoznačně ukazují, že robotické laserové svařování představuje nejefektivnější a nejspolehlivější variantu. Výrazně nižší rozptyl výsledků, vyšší

stabilita procesu a schopnost dosáhnout kvalitních svarových spojů bez nutnosti přídavného materiálu, dělají z této metody ideální volbu pro automatizovanou a precizní výrobu s důrazem na opakovatelnost a kontrolu nákladů.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývala vlivem různých metod svařování na výsledné vlastnosti svarových spojů, přičemž byl důraz kladen na moderní technologie využívající přesné řízení parametrů a automatizaci. V teoretické části byly shrnuty základní principy svařování, jednotlivé typy svarů a rozdělení metod podle způsobu přenosu energie. Popsány byly metody tavného i tlakového svařování, včetně jejich výhod, nevýhod, využití v průmyslu i specifikací podle druhu materiálu. Dále byla věnována pozornost parametrům ovlivňujícím kvalitu svaru a častým vadám, které se mohou během svařovacího procesu vyskytnout.

Praktická část byla zaměřena na porovnání tří metod – ručního svařování s přídavným materiálem (HD), ručního bez přídavného materiálu (HB) a robotického bez přídavného materiálu (R). Plechy z korozivzdorné oceli 1.4404 byly svařeny a následně podrobeny tahovým a mikromechanickým zkouškám a metalografické analýze. Výsledky ukázaly, že změna použité technologie měla výrazný vliv na mechanické i mikrostrukturní vlastnosti svarů.

Robotické svařování bez přídavného materiálu (R) dosahovalo nejlepších výsledků z hlediska pevnosti a konzistence svaru. Ruční metoda bez přídavného materiálu (HB) vykazovala rovněž dobré hodnoty, zejména v oblasti tažnosti a rovnoměrnosti struktury. Naopak metoda s přídavným materiálem (HD) se vyznačovala vyšší variabilitou v kvalitě svaru a nižší stabilitou procesu. Metalografické vyhodnocení potvrdilo rozdíly v jemnosti a homogenitě zrn mezi jednotlivými přístupy.

Z provedeného výzkumu vyplynulo, že volba vhodné svařovací technologie zásadně ovlivňuje nejen mechanickou pevnost, ale i kvalitu a spolehlivost celého výrobku. Zatímco ruční metody mohou být vhodné pro flexibilní nasazení a zakázkovou výrobu, pro opakovatelné výsledky a vysokou jakost je nejvhodnější volbou automatizované robotické svařování.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] SIMMONS, C. H.; MAGUIRE, D. E. a PHELPS, Neil. *Manual of engineering drawing: British and international standards*. Fifth edition. Oxford, United Kingdom: Butterworth-Heinemann, Elsevier, [2020]. ISBN 978-0-12-818482-0.
- [2] HODIS, Zdeněk. *Strojírenská technologie*. Brno: Masarykova univerzita, 2013. ISBN 978-80-210-6256-6.
- [3] WEMAN, Klas. *Welding processes handbook*. 2nd ed. Woodhead Publishing in materials. Oxford: Woodhead Publishing, 2012. ISBN 978-0-85709-510-7.
- [4] HICKS, John. *Welded joint design*. 3rd ed. New York: Industrial Press, 1999. ISBN 0-8311-3130-6.
- [5] KLETEČKA, Jaroslav a FOŘT, Petr. *Technické kreslení*. 2. opr. vyd. Učebnice (Computer Press). Brno: Computer Press, 2007. ISBN 978-80-251-1887-0.
- [6] *Svarové spoje*. Online. In: MitCALC. Dostupné z: https://www.mitcalc.com/doc/welding/help/cz/weldingtxt.htm?fbclid=IwY2xjawIX9uhleHRuA2FlbQIxMAABHRiWvvjafso3YXfqAWiPnZ5HNzE8FBxHys2jskxecCczbxIPpd8UhdIuDg_aem_Bs56yAoZjed0aVMYQuFq5g. [cit. 2025-02-11].
- [7] SYMBOLS, American Welding Society (AWS) A2 Committee on Definitions and. *Standard Symbols for Welding, Brazing, and Nondestructive Examination (7th Edition) - AWS A2.4:2012: 2012*. American Welding Society (AWS). ISBN 978-0-87171-796-2. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSSWBNE05/standard-symbols-welding/standard-symbols-welding>.
- [8] SINGH, Ramesh. *Designing Weldments*. In: . John Wiley. ISBN 978-1-119-86515-5. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt013EQH7E/designing-weldments/butt-joints>.
- [9] MALLICK, P. K. *Materials, Design, and Manufacturing for Lightweight Vehicles (2nd Edition)*. In: . Elsevier. ISBN 978-0-12-818712-8. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt012LXUM4/materials-design-manufacturing/arc-welding>.
- [10] TECHNOLOGY, Hobart Institute of Welding. *Gas Metal Arc Welding (3rd Edition): (EW-473, 2012): (EW-473, 2012)*. In: . Hobart Institute of Welding Technology. ISBN 978-1-936058-17-4. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00U4VOW1/gas-metal-arc-welding/narrow-gap-welding>.
- [11] SINGH, Ramesh. *Applied Welding Engineering - Processes, Codes, and Standards (3rd Edition)*. In: . Elsevier. ISBN 978-0-12-821348-3. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt012M16V1/applied-welding-engineering/brazing-soldering>.
- [12] FICKLEN, Carter B.; FLEEGER, Allan K. a LILLQUIST, Dean L. *Industrial Hygiene Reference and Study Guide (4th Edition)*. In: . American Industrial Hygiene Association (AIHA). ISBN 978-1-935082-97-2. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt01328R18/industrial-hygiene-reference/gas-welding>.
- [13] PHILLIPS, David H. *Welding engineering: an introduction*. Second edition. Hoboken, New Jersey: Wiley, [2023]. ISBN 978-1-119-85872-0.

- [14] LAUGHTON, M.A. a WARNE, D.F. *Electrical Engineer's Reference Book* (16th Edition). In: . Elsevier. ISBN 978-0-7506-4637-6. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt004K0PW5/electrical-engineers/resistance-butt-flash>.
- [15] *Odporové bodové svařování*. Online. In: Trade Weld. Dostupné z: https://www.tradeweld.cz/odporove-bodovani/?fbclid=IwY2xjawIX9mxleHRuA2FlbQIxMAABHRiWvvjafso3YXfqAWiPnZ5HNzE8FBxHys2jskxecCczbxIPpd8UhdIuDg_aem_Bs56yAoZjed0aVMYQ_uFq5g#gallery1-2. [cit. 2025-02-11].
- [16] MALLICK, P. K. *Materials, Design, and Manufacturing for Lightweight Vehicles* (2nd Edition). In: . Elsevier. ISBN 978-0-12-818712-8. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt012LXPS1/materials-design-manufacturing/spot-welding>.
- [17] *Švové svařování*. Online. In: Schinkmann. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/svove-svarovani>. [cit. 2025-02-11].
- [18] *What are the 5 Parameters of Welding?* Online. In: The Refrigeration School. 2023. Dostupné z: <https://www.rsi.edu/blog/skilled-trades/what-are-the-5-parameters-of-welding/>. [cit. 2025-01-12].
- [19] HUGHES, Steven E. *Quick Guide to Welding and Weld Inspection*. In: . Woodhead Publishing. ISBN 978-1-84569-641-2. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt008WPDV3/quick-guide-welding-weld/carbon-equivalency>.
- [20] REIS, António J. a PEDRO, José J. Oliveira. *Bridge Design - Concepts and Analysis*. In: . John Wiley. ISBN 978-0-47084-363-5. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt01257WP3/bridge-design-concepts/materials-weldability>.
- [21] (AWS), American Welding Society. *Resistance Welding Pocket Handbook (1st Edition) - AWS RWPH:2011: 2011*. American Welding Society (AWS). ISBN 978-0-87171-785-6. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpRWPHEAW5/resistance-welding-pocket/resistance-welding-pocket>.
- [22] *Industries Where Welding Is Commonly Used*. Online. In: DNA secheron. 21.12. Dostupné z: <https://www.dnhsecheron.com/blogs/industries-where-welding-is-commonly-used>. [cit. 2025-01-16].
- [23] FREI, Martin. *Moderní auta stárnou a potřebují kvalitní servis. Neznalý opravář jim snadno uškodí*. Online. In: Aktuálně.cz. 2022. Dostupné z: <https://zpravy.aktualne.cz/ekonomika/auto/moderni-auta-starnou-a-potrebuji-kvalitni-servis-neznaly-opr/r~af4d32c4069411ed82b7ac1f6b220ee8/>. [cit. 2025-02-11].
- [24] *Posuzování a certifikace EN 1090*. Online. In: Domzo 13. Dostupné z: https://www.domzo13.cz/certifikace-en-1090?fbclid=IwY2xjawIX9LFleHRuA2FlbQIxMAABHe16If654jwICTiFt2pl-p12PcgfY8fSubkyEJBwOnROG0ZbrezDTjPjRA_aem_4xKtocXNGc_GI9d2H5Js6Q. [cit. 2025-02-11].
- [25] *Produkty svařování*. Online. In: VPAZ. Dostupné z: <http://www.vpaz.cz/en/kategorie/production-of-weldments.aspx?fbclid=IwY2xjawIX9DxleHRuA2FlbQIxMAABHe16If654jwICTiFt2pl->

- p12PcgfY8fSubkyEJBwOnROG0ZbrezDTjPjRA_aem_4xKtocXNGc_GI9d2H5Js6Q. [cit. 2025-02-11].
- [26] *Plynová nádrž*. Online. In: Cenový radar. Dostupné z: https://cenovyradar.cz/wp-content/uploads/2020/03/plynova-bomba_1090484242-768x576.jpg. [cit. 2025-02-11].
- [27] *Pulse check: When to consider a move to pulsed MIG welding*. Online. In: FSM Direct. Dostupné z: https://fsmdirect.com/pulse-check/?fbclid=IwY2xjawIX80hleHRuA2FlbQIxMAABHdHHhpQ39GRYinQi7g8Eo9-E0Lxcz1mYGaf4vLmfxm6KQ9C8F18a08ZjNw_aem_nzG-wrMRWQ_a9LqfTU3d4Q. [cit. 2025-02-11].
- [28] KATAYAMA, Seiji (ed.). *Handbook of laser welding technologies*. Woodhead Publishing series in electronic and optical materials. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013. ISBN 978-0-85709-264-9.
- [29] OLSEN, Flemming Ove. *Hybrid Laser-Arc Welding*. In: . Woodhead Publishing. ISBN 978-1-84569-370-1. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt008WRQRA/hybrid-laser-arc-welding/disc-and-fibre-laser>.
- [30] *VYUŽITÍ LASERU V PRŮMYSLU – MINULOST A SOUČASNOST*. Online. In: OptiXs. Dostupné z: https://www.optixs.cz/novinky/vyuziti-laseru-v-prumyslu-minulost-a-soucasnost?fbclid=IwY2xjawH7B1hleHRuA2FlbQIxMAABHQf6rTFYpvcY1fwpiQHFx1qFjk9XqOULS1mf4LRR9XWe98de2mE-r6tUBQ_aem_yjNSTJimf63lL85wmERc0w. [cit. 2025-01-20].
- [31] *Využití technologie obrábění paprskem laseru v dřevařství*. Online. In: Dřevařský magazín. 2021. Dostupné z: https://drevmag.com/cs/2021/02/22/vyuziti-technologie-obrabeni-paprskem-laseru-v-drevarstvi/?fbclid=IwY2xjawH7AEFleHRuA2FlbQIxMAABHd8bQKDrw5ASUqyc0_nCJ9bXbPEV2pxFBoLTAqXrguwAhB09gRuwX84yhQ_aem_CUL-IEpADG6hjzCqI9PZ8w. [cit. 2025-01-20].
- [32] TEPLÝ, Jan. *ANALÝZA SVAŘOVÁNÍ LASERHYBRIDEM*. Online, bakalářská, vedoucí ING. PETR KOVÁŘ. Brno: Vysoké učení technické Brno, 2010. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28219&fbclid=IwY2xjawIX7sJleHRuA2FlbQIxMAABHdHHhpQ39GRYinQi7g8Eo9-E0Lxcz1mYGaf4vLmfxm6KQ9C8F18a08ZjNw_aem_nzG-wrMRWQ_a9LqfTU3d4Q. [cit. 2025-02-11].
- [33] *Princip vláknového - FIBER LASERU*. Online. In: Leonardo technology. Dostupné z: https://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-vlaknoveho-fiber-laseru?fbclid=IwY2xjawIX7kJleHRuA2FlbQIxMAABHUmigS3O9RNng7s6bXJBGYeUMxh2OrW4Rl8GT4hLBZw3VQIF5LeWhutsHdw_aem_J7MfbtDbWTx41tl2SKYyvw. [cit. 2025-02-11].
- [34] *Fiber vláknový laser*. Online. In: Raptor CNC. 2021. Dostupné z: https://www.raptor-cnc.com/fiber-laser.html?fbclid=IwY2xjawIX7axleHRuA2FlbQIxMAABHUmigS3O9RNng7s6bXJBGYeUMxh2OrW4Rl8GT4hLBZw3VQIF5LeWhutsHdw_aem_J7MfbtDbWTx41tl2SKYyvw. [cit. 2025-02-11].

- [35] DEEPAK, JR; ANIRUDH, RP a SUNDAR, S Saran. Applications of lasers in industries and laser welding: A review: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2023. ISSN 2214-7853.
- [36] JEFFUS, Larry. Welding and Metal Fabrication (1st Edition). In: . Cengage. ISBN 978-1-4180-1374-5. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00B8ZHO1/welding-metal-fabrication/hardfacing>.
- [37] CASTINGS, AWS D11 Committee on Welding Iron. Guide for Welding Iron Castings: (ANSI/AWS D11.2-89 (R2006)): (ANSI/AWS D11.2-89 (R2006)). In: . American Welding Society (AWS). ISBN 978-0-87171-295-0. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0095W8V2/guide-welding-iron-castings/potential-hazards>.
- [38] *Pozor laserové záření samolepka*. Online. In: JP design. Dostupné z: https://www.jpdesign.cz/Pozor-laserove-zareni-samolepka-d255.htm?fbclid=IwY2xjawIX7S1leHRuA2FlbQIxMAABHRiWvvjafso3YXfqAWiPnZ5HNzE8FBxHys2jskxecCczbxIPpd8UhdIuDg_aem_Bs56yAoZjed0aVMYQuFq5g. [cit. 2025-02-11].
- [39] *Handheld Laser Welding Machine: The Basic Guide*. Online. In: G-WEIKE LASER. Dostupné z: <https://www.gwklaser.com/about/news/news20230802.html>. [cit. 2025-01-20].
- [40] *The Complete Guide Handheld Laser Welder Machine*. Online. In: G-WEIKE LASER. Dostupné z: <https://www.gwklaser.com/about/technical/TA20230131.html>. [cit. 2025-01-20].
- [41] *Portable Stainless Steel Fiber Laser Welding Machine Metal Laser Spot Welding Machine Laser Spot Welder Fiber Laser Welding Machine*. Online. In: . Dostupné z: https://leikanglaser.en.made-in-china.com/product/XsknhvVjSSWr/China-Portable-Stainless-Steel-Fiber-Laser-Welding-Machine-Metal-Laser-Spot-Welding-Machine-Laser-Spot-Welder-Fiber-Laser-Welding-Machine.html?fbclid=IwY2xjawIX7KdleHRuA2FlbQIxMAABHXpsJhQf3-OdNPPXGStPgIEZKsjU08dO6fW6965bvq8xlS-6jXxbfEWaZw_aem_tjaBsqiTFDUMSocT3l1MZA. [cit. 2025-02-11].
- [42] *Ruční laserová svařička od společnosti Narran*. Online. In: Plastic Portal. Dostupné z: https://www.plasticportal.cz/clanky/nova-rucni-laserova-svarecka-od-spolecnosti-narran-sro?fbclid=IwY2xjawIX66NleHRuA2FlbQIxMAABHbBMejG8ic8T3xYaBCPIbaiPqOSGj3X3bbpQrzUcMbEiJ9gSp4hv1uwClw_aem_5EkBNeFHZhqjSC0I0Y0tUQ. [cit. 2025-02-11].
- [43] *Ruční laserová svařička Larisa*. Online. In: Trade Weld. Dostupné z: https://www.tradeweld.cz/aktuality/rucni-laserova-svarecka-larisa/?fbclid=IwY2xjawIX6plleHRuA2FlbQIxMAABHdHHhpQ39GRYinQi7g8Eo9-E0Lxcz1mYGaf4vLmfxm6KQ9C8F18a08ZjNw_aem_nzG-wrMRWQ_a9LqfTU3d4Q#gallery1-3. [cit. 2025-02-11].
- [44] *Unlimited guide of laser welding machine*. Online. In: JQ Laser. 2024. Dostupné z: <https://www.jqlaser.com/unlimited-guide-of-laser-welding-machine/>. [cit. 2025-01-20].
- [45] *CWFL-1500ANW 16 All-in-One chladicí stroj pro ruční čistič vláknových laserových svařiček*. Online. In: TEYU. Dostupné z: <https://www.teyuchiller.com/cs/chiller-machine-for-1500w-handheld-laser-welder-cleaner>. [cit. 2025-02-11].

- [46] LIU, Liming. Welding and Joining of Magnesium Alloys. In: . Woodhead Publishing. ISBN 978-1-84569-692-4. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt008WRNMH/welding-joining-magnesium/laser-power>.
- [47] KNOPP, Brian. *Is Laser Welding Strong? – An In-Depth Analysis*. Online. In: Cobot system. 2024. Dostupné z: <https://cobot.systems/is-laser-welding-strong/>. [cit. 2025-01-21].
- [48] *Robot-Assisted Laser Welding for Emerging Applications*. Online. In: Laserax. 2024. Dostupné z: <https://www.laserax.com/blog/robot-assisted-laser-welding>. [cit. 2025-01-21].
- [49] *Automatic Smart 3D Industrial Laser Welding Robot for Sale*. Online. In: Style CNC. Dostupné z: https://www.stylecnc.com/laser-welding-machine/3d-industrial-fiber-laser-welding-robot.html?fbclid=IwY2xjawIX6aVleHRuA2FlbQIxMAABHRWPY4a3dhZJG1gHJOgteogLv9U0OdABEK-gZeOUYn9UoxnRK3MQQ6qqA_aem_4DJXFSiqeZdXt-sljSwlw. [cit. 2025-02-11].
- [50] PITTNER, Kamil. *Nejmenší a nejpřesnější robotické rameno na světě*. Online. In: Robotic Journal. Dostupné z: https://www.roboticjournal.cz/clanky/2017-01-nejmensi-a-nejpresnejsi-roboticke-rameno-na-svete?fbclid=IwY2xjawIX6ORleHRuA2FlbQIxMAABHdHHhpQ39GRYinQi7g8Eo9-E0Lxcz1mYGaf4vLmfxm6KQ9C8F18a08ZjNw_aem_nzG-wrMRWQ_a9LqfTU3d4Q. [cit. 2025-02-11].
- [51] *Our best Laser Welding Head for Robot/cobot/CNC integration*. Online. In: ProfiMach. Dostupné z: https://profimach.com/laser-welding-photonweld/photonweld-r-laser-welding-modules-robot-ready-laser-welding-units?fbclid=IwY2xjawIX5Z5leHRuA2FlbQIxMAABHajjUuGEeCOKhQiIX-p2QvvyECBUCgLNbhIVrlt3It9XC0N5lSopLCnq5g_aem_NisE65dfspVPkxXLABUpQg. [cit. 2025-02-11].
- [52] *Laser Protection Helmet for Laser Cleaning Machine Laser Welding Machine Laser Welding Helmet*. Online. In: SFX Laser. Dostupné z: <https://www.sfxlaser.com/Laser-Protection-Helmet-for-Laser-Cleaning-Machine-Laser-Welding-Machine?tag=laser%20welding%20machine>. [cit. 2025-02-11].
- [53] VERLAG, VDE. 54th International Symposium on Robotics (ISR Europe 2022), 20-21 June 2022, Munich, Germany. In: . VDE Verlag. ISBN 978-3-8007-5891-3. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0137ZRT1/54th-international-symposium/need-automate-offline>.
- [54] LARKIN, Nathan; SHORT, Andrew; PAN, Zengxi a VAN DUIN, Stephen. Automated Programming for Robotic Welding. Online. In: CHEN, Shanben; ZHANG, Yuming a FENG, Zhili (ed.). *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing*. Transactions on Intelligent Welding Manufacturing. Singapore: Springer Singapore, 2018, s. 48-59. ISBN 978-981-10-5354-2. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-981-10-5355-9_4. [cit. 2025-01-22].
- [55] CHAN, Chris. *The Future of Robotic Laser Welding In Manufacturing*. Online. In: DP Laser. 2023. Dostupné z: <https://dplaser.com/the-future-of-robotic-laser-welding-in-manufacturing/>. [cit. 2025-01-22].

- [56] *The Future of Welding: Trends and Innovations Shaping the Industry*. Online. In: KDAR company. Dostupné z: <https://www.kdarco.com/blog/the-future-of-welding-trends-and-innovations-shaping-the-industry>. [cit. 2025-01-22].

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Základní značky svarů	16
Obrázek 2 Koutový svar	17
Obrázek 3 Tupý svar	18
Obrázek 4 Bodový svar	19
Obrázek 5 Schéma svařování elektrickým obloukem	19
Obrázek 6 Schéma plamenového svařování	21
Obrázek 7 Svařovací hořák	21
Obrázek 8 Odporové svařování stykové	23
Obrázek 9 Bodové svařování	23
Obrázek 10 Odporové svařování švové	24
Obrázek 11 Svařování karoserie	28
Obrázek 12 Svařené ocelové konstrukce	29
Obrázek 13 Svařování v lodním průmyslu	30
Obrázek 14 Základní schéma laseru	33
Obrázek 15 Schéma CO ₂ laseru	33
Obrázek 16 Nd:YAG laser	34
Obrázek 17 Schéma vláknového laseru	36
Obrázek 18 Vláknový laser	36
Obrázek 19 Ruční laserový svařovací stroj	39
Obrázek 20 Ruční laserová svařování	40
Obrázek 21 Pistole pro ruční laserové svařování	40
Obrázek 22 Robotický laserový svařovací zařízení	44
Obrázek 23 Robotické rameno	45
Obrázek 24 Svařovací hlava	46
Obrázek 25 Předpokládaný postup pro ruční laserové svařování	54
Obrázek 26 Výkres svařence	55
Obrázek 27 Ruční laserová svářečka LARISA ADVANCE	55
Obrázek 28 Ověření procesních parametrů v rámci ručního svařování	56
Obrázek 29 Výsledný svařenec – ruční laserové svařování s přídavným materiálem	56
Obrázek 30 Výsledný svařenec – ruční laserové svařování bez přídavného materiálu	57
Obrázek 31 Výsledný svařenec – robotické laserové svařování	58
Obrázek 32 Vyřezaná zkušební tělesa	59
Obrázek 33.: Připravené vzorky pro měření mikromechanických vlastností.	59
Obrázek 34 Lis pro zapouzdření vzorků	60

Obrázek 35 Leštička vzorků	60
Obrázek 36 Vzorky připravené pro měření mikromechanických vlastností	60
Obrázek 37 Univerzální zkušební stroj Zwick	62
Obrázek 38 Naměřené tahové křivky – ruční laserové svařování s přídavným materiálem	64
Obrázek 39 Naměřené tahové křivky – ruční laserové svařování bez přídavného materiálu	65
Obrázek 40 Naměřené tahové křivky – robotické svařování.....	67
Obrázek 41 Micro Combi Tester	68
Obrázek 42 Kompoziční snímek svaru s hodnotami vtiskové tvrdosti pro vzorky HD	69
Obrázek 43 Kompoziční snímek svaru s hodnotami vtiskové tvrdosti pro vzorky HB	70
Obrázek 44 Kompoziční snímek svaru s hodnotami vtiskové tvrdosti pro vzorky R	70
Obrázek 45 Výsledné snímky mikrostruktury HB_01– ruční laserové svařování bez přídavného materiálu	73
Obrázek 46 Výsledné snímky mikrostruktury HB_02– ruční laserové svařování bez přídavného materiálu	74
Obrázek 47 Výsledné snímky mikrostruktury HB_03– ruční laserové svařování bez přídavného materiálu	74
Obrázek 48 Výsledné snímky mikrostruktury HD_01 – ruční laserové svařování s přídavným materiálem.....	75
Obrázek 49 Výsledné snímky mikrostruktury HD_02 – ruční laserové svařování s přídavným materiálem	76
Obrázek 50 Výsledné snímky mikrostruktury HD_03 – ruční laserové svařování s přídavným materiálem	76
Obrázek 51 Výsledné snímky mikrostruktury R_01 – robotické svařování.....	77
Obrázek 52 Výsledné snímky mikrostruktury R_02 – robotické svařování.....	77
Obrázek 53 Výsledné snímky mikrostruktury R_03 – robotické svařování.....	78
Obrázek 54 Výsledné snímky makrostruktury – ruční laserové svařování bez přídavného materiálu: a) před leptáním, b) po leptání.....	78
Obrázek 55 Výsledné snímky makrostruktury – ruční laserové svařování s přídavným materiálem. a) před leptáním, b) po leptání	79
Obrázek 56 Výsledné snímky makrostruktury – robotické svařování. a) před leptáním, b) po leptání.....	80

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Číselné označení vybraných metod svařování	15
Tabulka 2.: Přehled typů laserů.....	32
Tabulka 3.: Procesní parametry pro zvolené metody ručního laserového svařování.....	57
Tabulka 4 Výsledky tahové zkoušky – ruční laserové svařování s přídavným materiálem	63
Tabulka 5 Výsledky tahové zkoušky – ruční laserové svařování bez přídavného materiálu	64
Tabulka 6 Výsledky tahové zkoušky – robotické svařování.....	66
Tabulka 7 Výsledky měření vtiskové tvrdosti	68
Tabulka 8 Výsledky měření modulu pružnosti	71
Tabulka 9 Výsledky měření hloubky vrypu.....	72

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

F	síla	[N]
S	plocha	[mm ²]
l	šířka plechu	[mm]
t	tloušťka plechu	[mm]
τ_s	Napětí ve střihu	[MPa]
τ_{Ds}	Dovolené napětí ve střihu	[MPa]
τ_k	Napětí v krutu	[MPa]
τ_{Dk}	Dovolené napětí v krutu	[MPa]
M_k	Krouticí moment	[N·m]
W_k	Průřezový modul pro krut	[mm ³]
D_1	vnější průměr	[mm]
d	vnitřní průměr	[mm]
σ_o	Napětí v ohybu	[MPa]
M_o	Ohybový moment	[N·m]
W_o	Průřezový modul pro ohyb	[mm ³]
l_1	délka	[mm]
σ_{Do}	Dovolené napětí pro ohyb	[MPa]
σ_t	Napětí v tahu/tlaku	[MPa]
σ_{Dt}	Dovolené napětí pro tah/tlak	[MPa]

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Chemická analýza vzorků HD

Příloha P II: Chemická analýza vzorků HB

Příloha P III: Chemická analýza vzorků R

Příloha P IV: Materiálový list pro ocel 1.4404

PŘÍLOHA P I: CHEMICKÁ ANALÝZA PRO VZOREK HD

14.4.2025 10:02:21

Atest - Q4 TASMAN

Popis vzorku										
SampleNo					HD					
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.018	0.450	1.305	0.037	0.011	16.61	2.069	10.31	0.399	<0.0010
2.	0.016	0.456	1.327	0.036	0.011	16.77	2.085	10.06	0.422	0.0017
3.	0.019	0.451	1.318	0.039	0.011	16.69	2.079	10.09	0.424	<0.0010
4.	0.019	0.459	1.310	0.038	0.011	16.72	2.117	10.08	0.421	<0.0010
5.	0.019	0.466	1.322	0.037	0.011	16.81	2.120	9.953	0.424	<0.0010
↑↑										
□	0.018	0.456	1.316	0.037	0.011	16.72	2.094	10.10	0.418	0.0011
↓↓										
σ	0.0013	0.0065	0.0089	0.0012		0.077	0.023	0.130	0.011	0.00032
ν	7.222	1.425	0.676	3.243		0.461	1.098	1.287	2.632	29.09

	As	B	Co	N	Nb	Sn	Ti	V	W	Fe
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.0084	0.0021	0.236	0.031	0.014	>0.013	0.013	0.073	0.065	68.33
2.	0.0080	0.0021	0.235	0.030	0.016	~0.013	0.0099	0.074	0.078	68.35
3.	0.0085	0.0020	0.234	0.030	0.019	>0.013	0.0092	0.074	0.052	68.44
4.	0.0086	0.0018	0.235	0.031	0.016	>0.013	0.0094	0.075	0.086	68.35
5.	0.0081	0.0017	0.235	0.032	0.018	~0.013	0.0096	0.075	0.052	68.39
↑↑										
□	0.0083	0.0019	0.235	0.031	0.017	~0.013	0.010	0.074	0.067	68.37
↓↓										
σ	0.00026	0.00019	0.00071	0.00087	0.0020		0.0016	0.00087	0.015	0.044
ν	3.133	10.00	0.302	2.806	11.76		16.00	1.176	22.39	0.064

PŘÍLOHA P II: CHEMICKÁ ANALÝZA PRO VZOREK HB

14.4.2025 10:09:07

Atest - Q4 TASMAN

Popis vzorku										
SampleNo		HB								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.018	0.451	1.325	0.037	0.011	16.79	2.089	9.782	0.405	<0.0010
2.	0.017	0.457	1.348	0.036	0.011	16.43	2.128	9.648	0.415	<0.0010
3.	0.019	0.454	1.346	0.037	0.011	16.42	2.125	9.620	0.413	<0.0010
4.	0.017	0.456	1.358	0.036	0.011	16.54	2.140	9.449	0.409	<0.0010
5.	0.018	0.452	1.339	0.038	0.011	16.45	2.119	9.719	0.411	<0.0010
↑										
□	0.018	0.454	1.343	0.037	0.011	16.53	2.120	9.644	0.411	<0.0010
↓										
σ	0.00087	0.0025	0.012	0.00087		0.155	0.019	0.126	0.0039	
υ	4.833	0.551	0.894	2.351		0.938	0.896	1.307	0.949	

	As	B	Co	N	Nb	Sn	Ti	V	W	Fe
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.	0.0082	0.0020	0.231	0.027	0.020	>0.013	0.0096	0.075	0.047	68.66
2.	0.0089	0.0022	0.235	0.025	0.019	>0.013	0.0096	0.077	0.048	69.07
3.	0.0089	0.0019	0.233	0.025	0.016	~0.013	0.0097	0.076	0.047	69.12
4.	0.0086	0.0022	0.234	0.025	0.018	>0.013	0.0096	0.078	0.033	69.16
5.	0.0089	0.0020	0.235	0.025	0.017	>0.013	0.0093	0.076	0.063	69.00
↑										
□	0.0087	0.0021	0.234	0.025	0.018	~0.013	0.0096	0.076	0.048	69.00
↓										
σ	0.00031	0.00014	0.0017	0.00100	0.0016		0.00016	0.0012	0.011	0.200
υ	3.563	6.667	0.726	4.000	8.889		1.667	1.579	22.92	0.290

PŘÍLOHA PIII: CHEMICKÁ ANALÝZA PRO VZOREK R

14.4.2025 10:15:31

Atest - Q4 TASMAN

Popis vzorku										
SampleNo	1R									
	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %	Ni %	Cu %	Al %
1.	0.017	0.461	1.347	0.030	0.0092	16.58	2.113	9.802	0.418	0.0063
2.	0.015	0.460	1.348	0.029	0.0088	16.63	2.135	9.736	0.409	0.0021
3.	0.016	0.462	1.354	0.030	0.0093	16.61	2.123	9.708	0.413	<0.0010
4.	0.014	0.466	1.353	0.028	0.0087	16.65	2.133	9.630	0.405	<0.0010
5.	0.016	0.461	1.356	0.030	0.0095	16.60	2.144	9.534	0.400	<0.0010
↑										
□	0.016	0.462	1.352	0.029	0.0091	16.61	2.130	9.682	0.409	0.0023
↓										
σ	0.0012	0.0023	0.0039	0.00100	0.00034	0.027	0.012	0.103	0.0070	0.0023
υ	7.500	0.498	0.288	3.448	3.736	0.163	0.563	1.064	1.711	100.00

	As %	B %	Co %	N %	Nb %	Sn %	Ti %	V %	W %	Fe %
1.	0.0066	0.0023	0.334	0.039	0.033	0.011	0.0069	0.081	0.121	68.59
2.	0.0061	0.0023	0.334	0.039	0.036	0.010	0.0044	0.081	0.098	68.62
3.	0.0066	0.0021	0.333	0.047	0.033	0.011	0.0039	0.082	0.106	68.65
4.	0.0062	0.0022	0.333	0.041	0.034	0.011	0.0042	0.082	0.095	68.70
5.	0.0067	0.0021	0.333	0.044	0.036	0.010	0.0043	0.083	0.077	68.85
↑										
□	0.0064	0.0022	0.333	0.042	0.034	>0.011	0.0047	0.082	0.099	68.68
↓										
σ	0.00027	0.00010	0.00071	0.0035	0.0016	0.00071	0.0012	0.00087	0.016	0.102
υ	4.219	4.545	0.213	8.333	4.706	6.455	25.53	1.061	16.16	0.149

PŘÍLOHA IV: MATERIÁLOVÝ LIST PRO OCEL 1.4404



Datový list
DIN EN 10088-3
Číslo materiálu 1.4404

Materiál 1.4404 / AISI 316L je nerezová austenitická ocel, která má velmi dobrou odolnost proti korozi. Tato jakost z nerezové oceli je velmi málo magnetizovatelná, má vynikající svařovací vlastnosti a je vhodná pro tváření za studena. Materiál z nerezové oceli 1.4404 lze použít při teplotách až 550 °C.

Možnosti zpracování zahrnují studenou hlavičku a leštění.

Chemické složení (hmotnostní podíl v % podle DIN EN 10088-3)

C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Cu	Mo	Ni	Ti	Další
≤ 0,03	≤ 1,00	≤ 2,00	≤ 0,045	≤ 0,03	≤ 0,10	16,5 – 18,5	-	2,00 – 2,50	10,0 – 13,0	-	-

Specifikace

Číslo materiálu EN 1.4404
EN krátký název X2CrNiMo17-12-2
Norma EN 10088-3
AISI 316 L *
BS 316S11 *
JIS SUS316L *
Strukturální třída Austenite

Fyzikální vlastnosti

Magnetizovatelnost: nízká
Hustota (kg / dm³): 8,0
Tepelná vodivost (do 20 ° C): 15
Elektronický odpor při pokojové teplotě (v Ω mm² / m): 0,75

Možné oblasti použití

Automobilový průmysl
Stavební průmysl
Konstrukce tlakové nádoby
Letecký průmysl
Potravinářský průmysl
Petrochemikálie
a více

Mechanické vlastnosti při pokojové teplotě ve stavu žití v roztoku (podle EN 10088-3)

Ø v mm	Tvrdost v HB	Pevnost v tahu		Síla R _m v Mpa	Prodloužení při přetržení A v % (podélně)
		R _{p0,2} v Mpa	R _{p1,0} v Mpa		
≤ 160	≤ 215	≤ 200	≤ 235	500-700	40
160 < d ≤ 250	≤ 215	≤ 200	≤ 235	500-700	-

Mez kluzu při zvýšené teplotě ve stavu žití v roztoku (podle EN 10088-3)

Teplota ve °C	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
R _{p0,2} v Mpa	165	150	137	127	119	113	108	103	100	98
R _{p1,0} v Mpa	200	180	165	153	145	139	135	130	128	127

(* na základě)