



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

# OPTIMALIZACE SVAŘOVACÍCH PARAMETRŮ PŘI LASEROVÉM SVAŘOVÁNÍ S PŘÍDAVNÝM STUDENÝM DRÁTEM

OPTIMIZATION OF WELDING PARAMETERS DURING LASER WELDING WITH ADDITIONAL COLD WIRE

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Venc

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2021

# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Bc. Jan Venc**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.**  
Akademický rok: 2020/21

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

## **Optimalizace svařovacích parametrů při laserovém svařování s přídavným studeným drátem**

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

Optimalizovat svařovací parametry při laserovém svařování s přídavným studeným drátem. Bude optimalizováno pro díly z austenitické korozivzdorné oceli. Optimalizace bude prováděna s ohledem na pohledovou kvalitu svaru, převýšení svaru a vzniklé svarové vady.

### **Cíle diplomové práce:**

Osvojit si technologie laserového svařování včetně rozšíření při svařování s přídavným studeným drátem. Osvojit si základy metalografie a vyhodnocení řezů svarů s ohledem na jejich geometrii a svarové vady.

### **Seznam doporučené literatury:**

BENKO B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R.I: Laserové technológie,1.vyd., Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9.

DULEY W.W.: Laser welding, New York 1999, A.Wiley-Interscience publication, ISBN 0-471-24679-4.

KANNATEY-ASIBU, E.: Principles of Materials Processing, John Wiley&Sons, Inc. Publication, 2009, ISBN 978-0-470-17798-3.

MORAVEC, Jaromír. Teorie svařování a pájení II: Speciální metody svařování. Liberec: TUL, 2008. ISBN 978-80-7372.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

VENC Jan: Optimalizace svařovacích parametrů při laserovém svařování s přídavným studeným drátem.

---

Diplomová práce se zabývá optimalizací procesních parametrů pro svařování odvodňovacího žlabu pomocí laserového svazku s přídavným studeným drátem. Součást je vyráběna z austenitické korozivzdorné Cr-Ni oceli X5CrNi 18-10 (1.4301, ČSN 17 240) o tloušťce plechu 1,5 mm. U vzorků byla pro ověření mechanických vlastností provedena příčná zkouška tahem. Následovala makroskopická kontrola zaměřená na rozměry svaru a přítomnost svarových vad. Na závěr byla mikroskopickou kontrolou určena struktura svarového kovu a základního materiálu. Na základě vyhodnocených zkoušek byly doporučeny optimální svařovací parametry.

Klíčová slova: laser, svařování laserem, studený drát, korozivzdorná ocel,

## **ABSTRACT**

VENC Jan: Optimization of welding parameters during laser welding with additional cold wire.

---

This diploma thesis deals with the optimization of process parameters of welding a drainage channel using a laser beam with an additional cold wire. This channel is made of austenitic Cr-Ni stainless steel X5CrNi 18-10 (1.4301, ČSN 17 240) with a sheet thickness 1,5 mm. Mechanical properties of samples were checked by using transverse tensile test. Subsequently, the samples were macroscopically inspected focusing on dimensions of the weld and the presence of weld defects. Finally, the structure of the weld metal and fundamental material was evaluated by using microscopic control. Based on evaluation tests, the optimal welding parameters were recommended.

Keywords: laser, laser welding, cold wire, stainless steel

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

VENC, Jan. *Optimalizace svařovacích parametrů při laserovém svařování s přídavným studeným drátem* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132378>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Libor Mrňa.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 21.5.2021

.....

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu doc. RNDr. Liborovi Mrňovi, PhD. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce a panu Ing. Kamilovi Podanému, PhD. za provedení mechanických zkoušek. Dále děkuji firmě ACO Industries k.s. a jejím zaměstnancům za umožnění realizace experimentu, poskytnutí potřebných dokumentů a konzultace. Děkuji také své rodině a přítelkyni za podporu během studia.

## **OBSAH**

Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	
<b>ÚVOD</b>	<b>9</b>
<b>1 ROZBOR STÁVAJÍCÍHO STAVU</b>	<b>10</b>
1.1 Možnosti optimalizace	11
<b>2 ROZDĚLENÍ LASERŮ</b>	<b>13</b>
2.1 Polovodičové lasery	14
2.2 Pevnolátkové lasery	15
2.2.1 Tyčové lasery (Nd:YAG)	16
2.2.2 Diskové lasery	17
2.2.3 Vláknové lasery	18
2.3 Plynové lasery	20
<b>3 LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ</b>	<b>21</b>
3.1 Kondukční režim	22
3.2 Penetrační režim	23
3.3 Interakce laserového svazku s materiálem	23
3.4 Metody laserového svařování	24
3.4.1 Laserové svařování bez přídavného materiálu	25
3.4.2 Laserové svařování s přídavným materiálem	25
3.4.3 Hybridní svařování	26
3.5 Svařovací parametry	27
3.6 Vady svarových spojů	28
3.7 Zkoušení svarových spojů	29
<b>4 SVAŘITELNOST KOROZIVZDORNÝCH OCELÍ</b>	<b>34</b>
<b>5 EXPERIMENTY A JEJICH VYHODNOCENÍ</b>	<b>35</b>
5.1 Svařování laserem	36
5.2 Experimentální část A	38
5.2.1 Tahová zkouška experimentu A	39
5.2.2 Metalografie experimentu A	42
5.3 Experimentální část B	45
5.3.1 Tahová zkouška experimentu B	46
5.3.2 Makroskopie experimentu B	48
5.3.3 Mikroskopie experimentu B	54
<b>6 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ</b>	<b>58</b>
<b>7 ZÁVĚRY</b>	<b>59</b>
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratk	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	
Seznam příloh	

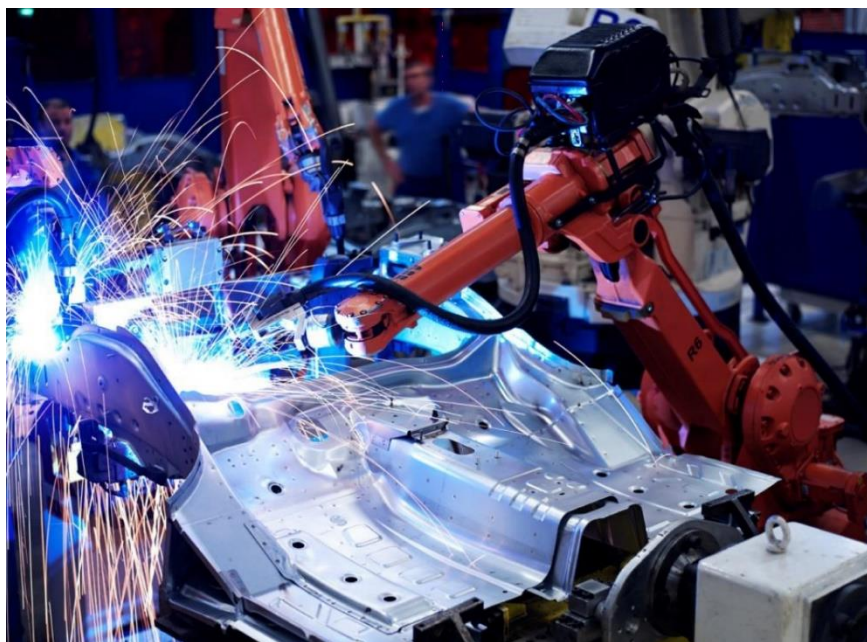


## ÚVOD [3, 4, 5, 6, 7]

V dnešní době, kdy je trendem zvyšování nároků na přesnost výroby dílců, dodržení jejich tvarové složitosti, úsporu výrobních nákladů nebo zkrácení výrobních časů, dochází k vývoji technologií, které jsou požadované nároky schopny splnit. Do těchto technologií v neposlední řadě patří i svařování pomocí laserového paprsku.

Tato metoda spojování součástí má mnoho výhod, lze ji plně automatizovat při zachování velice kvalitního svarového spoje. Velkou výhodou laseru je jeho rozmanitost, mimo různé způsoby svařování a řezání umožňuje povrchovou úpravu výrobků nebo navařování nových vrstev materiálu. Různé aplikace laserového svařování jsou uvedeny na obr. 1.

Svařování probíhá zpravidla bez přídavného materiálu, což může pro některé typy svarů způsobovat problémy zahrnující propadlý svarový spoj apod. Řešením je doplnění laserového paprsku přídavným materiálem pomocí podávacího zařízení. Eliminace svarových vad ale není jediným důvodem této aplikace. Materiál je přidáván i pro legování svarového kovu nebo pro vytvoření převýšeného svaru. Technologie laserového svařování s přídavným materiálem nachází své uplatnění v různých průmyslových odvětvích, od automobilového průmyslu až po odvodňovací systémy.

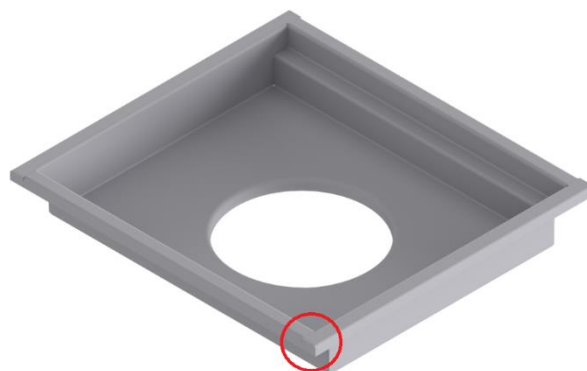


Obr. 1 Svařování laserem [6], [7]

## 1 ROZBOR STÁVAJÍCÍHO STAVU [1, 8, 9, 10, 11, 12]

Řešená součást slouží k odvodu procesních kapalin z podlahy do kanalizace, je jednou z hlavních částí odvodňovacího systému. Interní firemní označení ve společnosti ACO Industries k. s. je „komerční žlab“. Roční produkce této součásti je přibližně 5000 ks. Na obr. 2 je znázorněn řešený žlab společně s označeným místem, které je nutné svařovat s přídatným materiálem.

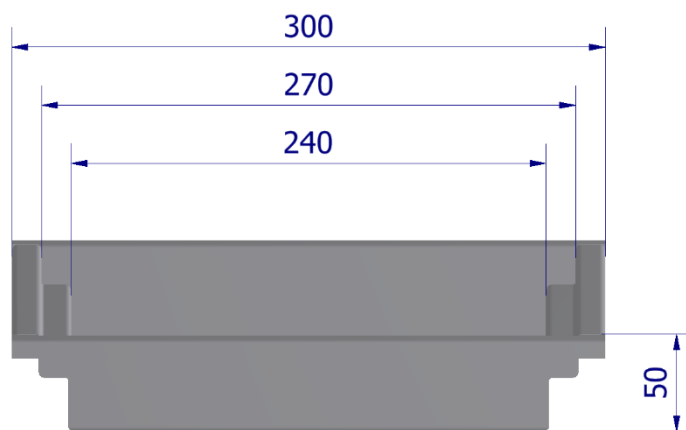
Firma ACO je nadnárodní společnost zabývající se vnitřním i venkovním odvodňováním budov s vedoucím postavením v Evropě. Má 30 výrobních závodů na 4 kontinentech a zaměstnává přibližně 4800 lidí. Největší výrobní závod v České republice se nachází v Příbramě, kde je zaměstnáno přibližně 700 lidí.



Obr. 2 Řešená součást [9]

V současnosti je řešená součást svařována metodou MAG. Laserem se z tabule plechu vypálí rozvin součásti, který je následně na ohraňovacím lise ohnut do požadovaného tvaru a dojde k zavaření rohů a tím k utěsnění součásti. Na obr. 3 je zobrazen náčrt žlabu se základními rozměry, tloušťka plechu je 1,5 mm. Současná metoda je nevhodná pro svařování tohoto typu žlabů, zejména kvůli malé rychlosti svařování a nevhodnosti použití v prostředí, kde je vyžadována hygienická čistota.

Žlab se vyrábí z austenitické Cr-Ni korozivzdorné oceli X5CrNi18-10 (dle jiných norem 17 240, AISI 304 a 1.4301). Tento materiál je dle ČSN 41 7240 vhodný pro svařování, odolný proti chemikáliím o nízké koncentraci a při normálních teplotách. Lze ho použít v prostředích, které vyžadují vysokou čistotu produktu. Je dobře tvárný a po svařování není nutné tepelné zpracování. Mechanické vlastnosti a chemické složení jsou uvedeny v tabulce 1. Tyto rozsahy hodnot jsou vyňaty z materiálového listu.



Obr.3 Základní rozměry žlabu [9]

Tab.1 Vlastnosti svařovaného materiálu [12]

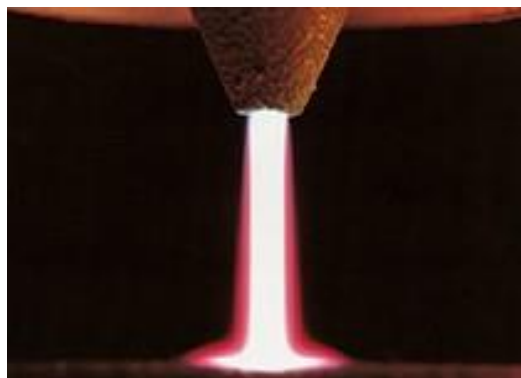
Chemické složení	Prvek	C	Cr	Ni	Mn	Si	P	S
		[hm. %]	≤ 0,07	17,5-19,5	8-10,5	≤ 2	≤ 1	≤ 0,045
Mechanické vlastnosti	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]		A <sub>80</sub> [%]		Žiháno [°C]		
	min 230	540-750		min 45		1000-1100		

Materiálový list ČSN 41 7240 je uveden v příloze 1.

## 1.1 Možnosti optimalizace [1, 5, 6, 12, 13, 14, 15, 16, 17]

Na začátku je nutné zvolit jakou technologii se bude daná součást svařovat. Je důležité najít variantu, která bude produktivnější a efektivnější než stávající MAG. Každá metoda má své výhody i nevýhody, proto je nutné zvolit tu nejvhodnější pro danou výrobu.

- Svařování plazmou – využívá plazmu jako zdroj dynamického a tepelného působení na materiál. Ta vzniká ionizací plynu při průchodu elektrickým obloukem. Princip plazmového svařování vychází z metody svařování TIG, kde oblouk hoří mezi základním materiálem a netavicí se elektrodou v ochranné atmosféře, ale díky dalšímu vývoji je produktivnější. Charakterizuje se vysokou koncentrací energie a teplotou. Zdrojem tepla pro natavení materiálů je úzký svazek vysokotlakého plazmatu, který má teplotu 10 000 až 30 000 °C (obr. 4). Jako plazmový plyn se používá argon, helium, vodík nebo jejich směsi. Metoda dosahuje relativně velkých rychlostí svařování (15 až 85 cm·min<sup>-1</sup>) a produktivity.



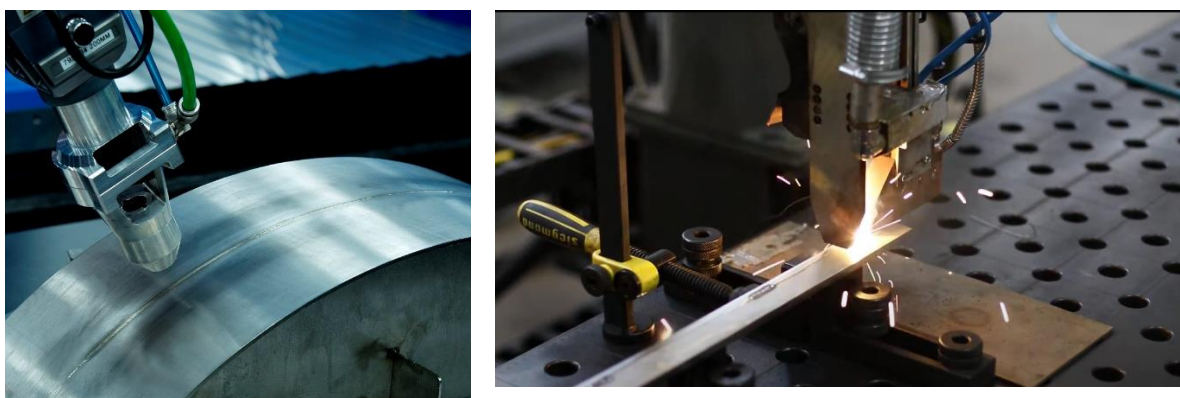
Obr. 4 Plazmový paprsek [16]

- Svařování metodou TIG – metoda tavného svařování, kde oblouk hoří mezi netavicí se wolframovou elektrodou a základním materiálem (obr. 5). Svarovou lázeň a elektrodu chrání inertní plyn vysoké čistoty (minimálně 99,995 %), používá se argon, helium nebo směs těchto plynů. Malé tloušťky plechů lze svařovat bez přídavného materiálu, provádí se tak impulsním proudem, při kterém se v čase pravidelně mění intenzita proudu mezi základním a impulsním proudem. Celkový čas cyklu je dán součtem časů pulsního a základního proudu. Krátké pulsy s frekvencí 1 až 20 MHz se používají pro svařování tenkých materiálů (0,2 až 0,8 mm), dlouhé pulsy 1 až 10 sec pro tloušťky 4 až 6 mm. Svařovací rychlost musí být v rovnováze s frekvencí impulsů. Uplatňuje se pro svařování korozivzdorných a žárupevných ocelí. V porovnání s metodou svařování plazmou disponuje nižší rychlostí svařování, má nižší produktivitu a není vhodná na tenké materiály.



Obr. 5 Svařování metodou TIG [15]

- Svařování laserem – v porovnání s běžnými tavnými metodami svařování jako je MAG nebo TIG umožňuje svařování laserovým paprskem zúžit paprsek na velmi malý průřez s průměrem až 10  $\mu\text{m}$ . Hustota dopadové energie může dosahovat až  $10^{13} \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ . Pro svařování se používá rozsah  $10^7$ - $10^9 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ . Při svařování tenkých plechů se energie ještě sníží a to na  $10^6 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ , díky malému vnesenému teplu dochází k vysoké rychlosti ochlazování. Velmi dobré výsledky jsou dosaženy při svařování vysokolegovaných ocelí. Hlavní výhodou v porovnání se svařováním plazmou je několikanásobně vyšší svařovací rychlost, z čehož plyne zvýšení produktivity výroby. V neposlední řadě mnohem tišší chod a snadná automatizace.



Obr. 6 Svařování laserem [17]

Z uvedených možností se pro sériovou výrobu dané součásti jeví laser jako vhodná volba pro změnu technologie výroby, a to i přes svou podstatně vyšší pořizovací cenu. Je tak zvoleno na základě strojních možností firmy a dané produkce tohoto typu žlabu. V případě potřeby není problém produkci navýšit.

## 2 ROZDĚLENÍ LASERŮ [18, 19, 20, 21, 22, 23, 24]

V dnešní době se v průmyslu používá pět hlavních typů laserů, které jsou společně se základními parametry uvedeny v tabulce 2. Jednotlivé typy laserů se pak dělí dle různých parametrů, ať už rozdílnou konstrukcí, vlastnostmi laserového záření nebo aplikací v průmyslu. Dělí se například podle:

- aktivního prostředí
- typu buzení
- vlnové délky optického záření, které vysílají
- provozního režimu
- vhodnosti použití atd.

Podle aktivního prostředí se lasery dělí na plazmatické, kapalinové, plynové, polovodičové a pevnolátkové. Mohou být buzeny opticky, elektricky, tepelnými změnami, chemicky apod. Dle časového provozního režimu se dělí na kontinuální a pulsní, případně impulsní. Vystupuje-li z laseru pouze jeden impuls mluvíme o impulsním laseru, pokud z laseru vystupují pravidelně se opakující impulsy, jedná se o laser pulsní.

V současnosti jsou běžně používající CO<sub>2</sub> a Nd:YAG lasery nahrazovány diskovými, diodovými a hlavně vláknovými, které disponují vyšší účinností i životností.

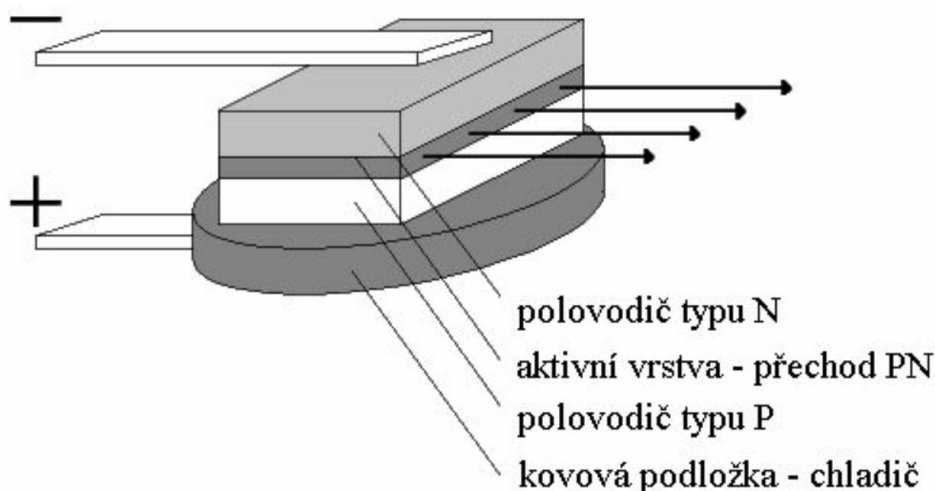
Tab. 2 Základní přehled průmyslových laserů [19]

Laser	Vlnová délka [nm]	Typ buzení	Účinnost [%]	Provozní režim	Výkon	Použití	Životnost [h]
Nd:YAG	1064	laserové diody	~7	kontinuální	až 6 kW	řezání, svařování	~10 000
				pulsní	~100 W	značení, gravírování	
		lampy	~3	pulsní	~600 W	svařování	
CO <sub>2</sub>	10 600	radio frekvenčně	~10	kontinuální / pulsní	10-250 W	značení, gravírování	~20 000
					až 5 kW	řezání, svařování	
		elektricky	~20		až 20 kW	řezání, svařování	-
Diskový	1070	laserové diody	~15	kontinuální	až 16 kW	řezání, svařování	~25 000
Vláknový	1070	laserové diody	~30	kontinuální	až 80 kW	řezání, svařování	~100 000
				kvazi kontinuální	~1,2 kW	značení, gravírování, mikroobrábění	
				pulsní	~100 W		
Diodový	808-1070	elektricky	~60	kontinuální	až 20 kW	svařování, kalení, navařování	~15 000

Pozn. Pro pulsní režim je uvedena hodnota středního výkonu.

## 2.1 Polovodičové lasery [19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41]

Aktivní prostředí polovodičových laserů je tvořeno elektricky buzeným polovodičem s P-N přechodem, nejčastěji je to laserová dioda. Do místa styku polovodičových materiálů se přivede elektrický proud, který emituje záření, které se dále šíří a zesiluje v rovině dotyku. Optický rezonátor tvoří leštěné čelní plochy polovodiče kolmé k P-N přechodu. Laserová dioda je zobrazena na obrázku 7.

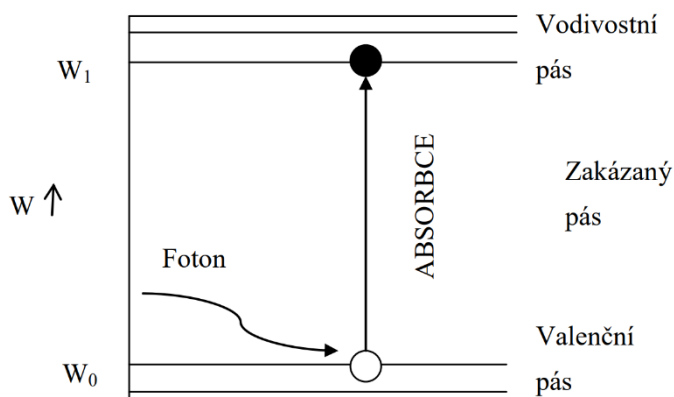


Obr. 7 Schéma laserové diody [41]

V porovnání s ostatními druhy laserů se fyzikální princip liší, neprobíhá zde přechod elektronů mezi diskrétními hladinami. U polovodičových laserů je to přechod mezi valenčním a vodivostním pásmem polovodiče. Pro přechod přes zakázaný pás je za pomoci fotonů dodána dostatečná energie.

Hlavní výhodou polovodičů je, že mají velikost zakázaného pásma v intervalu 1 až 4 elektronvolty. To je ideální velikost pro tvorbu infračerveného a viditelného světla. Absorpce fotonu v polovodiči je znázorněna na obrázku 8.

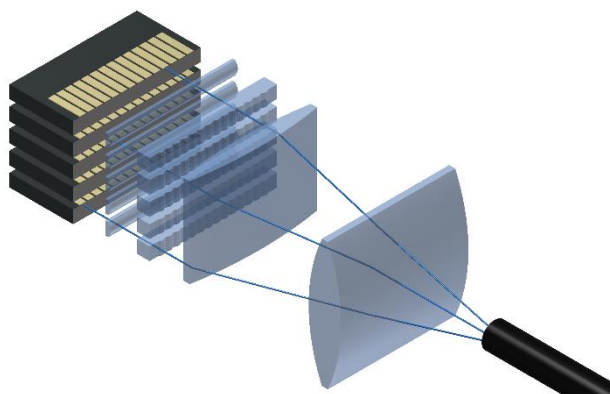
Nejběžnější materiál pro polovodičové lasery je směs galia (Ga) a dalších prvků, například arzenu (As), hliníku (Al), fosforu (P) a dalších.



Obr. 8 Absorpce fotonu v polovodiči [35]

Diodové lasery patří do skupiny polovodičových laserů. Záření je tedy generováno přímo v PN přechodu polovodiče procházejícím elektrickým proudem. Základním prvkem je emitore velmi malých rozměrů (řádově  $\mu\text{m}$ ), který generuje záření o výkonu několik wattů (W). Emitory se skládají do řad (z angl. „*diode bars*“), které obsahují až 50 těchto prvků. Ze zmíněných řad se potom sestavují stohy (z angl. „*diode stacks*“), které pracují s výstupním výkonem až stovek wattů. Spojením několika stohů je dosaženo výkonu v řádech kW. Toto je znázorněno na obr. 9.

Plocha, do které lze fokusovat paprsek, je v porovnání s jinými typy laserů větší, proto se tyto lasery uplatňují zejména pro svařování, kalení nebo navařování.



Obr. 9 Spojení emitorů ve stohy [39]

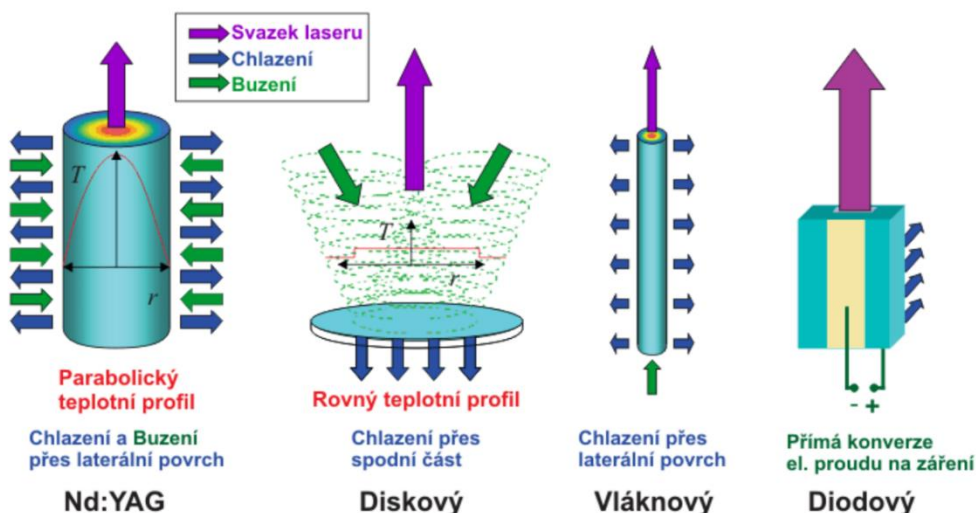
## 2.2 Pevnolátkové lasery [19, 25, 26, 28, 29, 30, 31, 32, 33]

Aktivní prostředí pevnolátkových laserů je tvořeno monokrystalickou nebo amorfni látkou s přídavnými aktivačními prvky tzv. aktivátory. Aktivátorem může být jeden z elementů ze skupiny železa (Ni, Co, Cr) nebo lantanoidy (Nd, Gd, Sm, Yb). Základním materiálem pevnolátkových laserů je matrice, která určuje většinu fyzikálních a chemických vlastností. Pro materiál matrice je požadována chemická stabilita, mechanická pevnost, tepelná odolnost a dobré mechanické opracování (leštění povrchů pro optickou kvalitu). Nejčastějším materiálem matrice jsou krystaly, lze ale použít i sklo nebo keramiku. Jednou z nejpoužívanějších maticí je YAG ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ , yttrium aluminium granát), dále se běžně používá fluorit ( $\text{CaF}_2$ ) nebo korund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

Pevnolátkové lasery dělíme dle typu na:

- tyčové,
- diskové,
- diodové,
- vláknové.

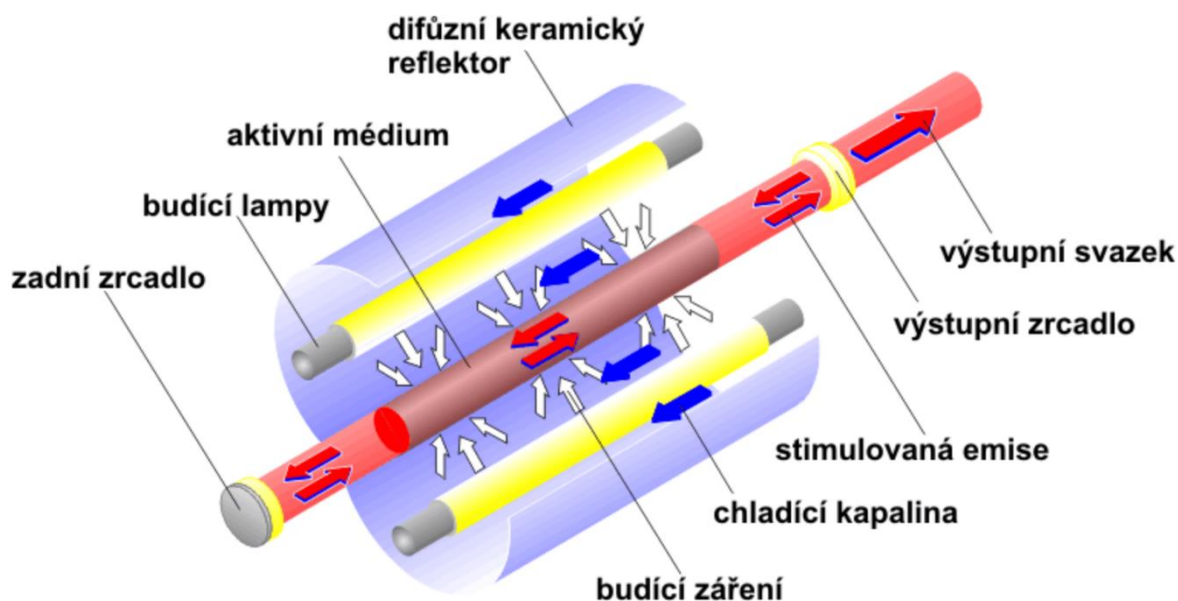
Rozdíl mezi tyčovým, diskovým a vláknovým laserovým zdrojem je v geometrii aktivního prostředí. Velice důležitým parametrem laserového zdroje je jeho účinnost, která je značně ovlivněna způsobem buzení a geometrií aktivního prostředí. Druhy pevnolátkových laserů společně s geometrií aktivních prostředí jsou zobrazeny na obrázku 10.



Obr. 10 Druhy pevnolátkových laserů [19]

### 2.2.1 Tyčové lasery (Nd:YAG) [19, 20, 21, 22, 25, 27, 32, 34]

Aktivní prostředí tvoří YAG krystal (yttrium aluminium granát) dopovaný ionty neodymu (Nd) nebo yterbia (Yb). Tyto lasery mohou být buzené výbojkami (LPSS – *lamp pumped solid state*), ale jejich účinnost přeměny elektrické energie na energii světelnou je velice nízká. Je to způsobeno tím, že velká část energie výbojky se nevyužije a přemění se na teplo, proto je nutné chlazení. Buzení pomocí výbojek je na obr.11.

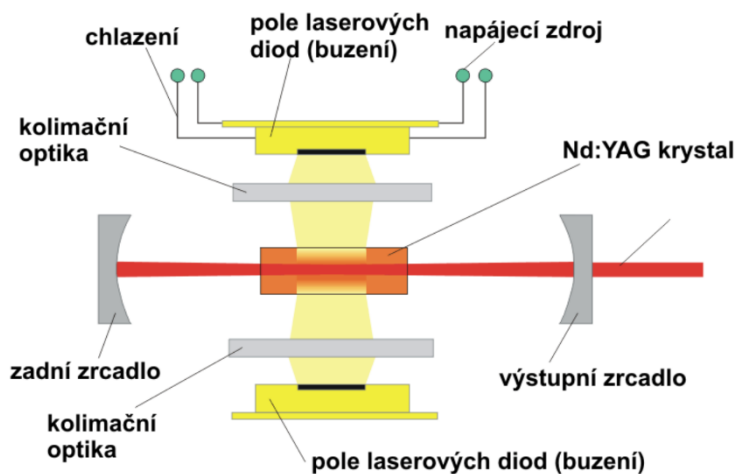


Obr.11 Nd:YAG buzený pomocí LPSS [19]

V současnosti se Nd:YAG lasery buzené pomocí LPSS používají převážně v pulsním režimu pro laserové svařování a vrtání. Výhodou je vysoká energie pulsu (až  $100 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ), která je pro tyto aplikace nezbytná. Ovšem pro jejich nízkou účinnost, krátké životnosti výbojek, vysoké provozní náklady a velké nároky na chlazení jsou v dnešní době nahrazovány jinými typy laserů.

Lasery buzené pomocí laserové diody (DPSS – *diode pumped solid state*) mají vyšší účinnost a kvalitnější laserový svazek. Rozlišují se dva typy buzení dle uspořádání rezonátoru. Boční (transversální) a zadní buzení (tzv. *end-pumped*).

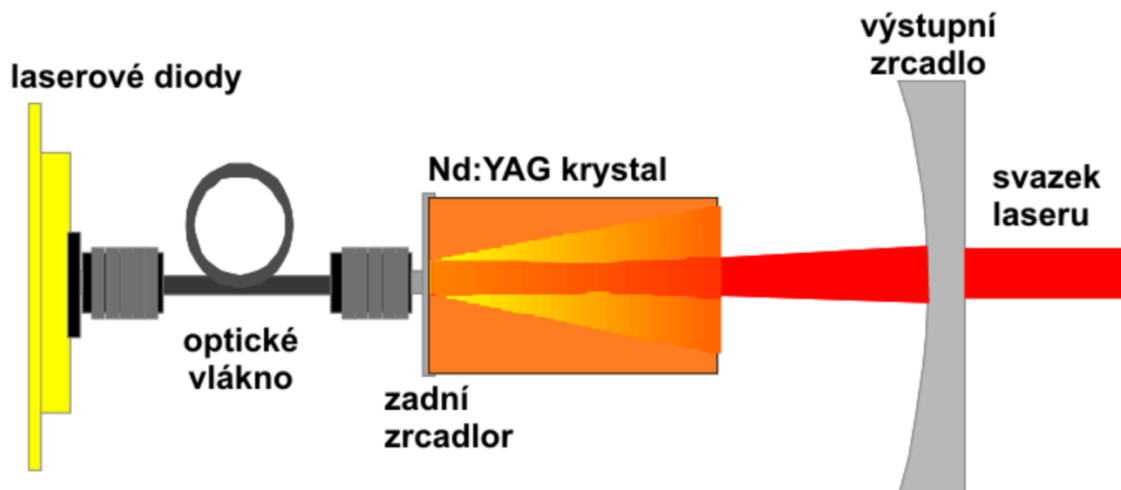
Bočním buzením lze dosáhnout vyšších výkonů, ale kvalita svazku je nižší. Schéma bočního buzení pomocí laserových diod je znázorněno na obrázku 12.



Obr.12 Boční buzení pomocí laserových diod [19]



U zadního buzení získáváme lepší kvalitu svazku, ale nižší výkon. U tohoto typu buzení se záření z laserových diod vede do YAG krystalu pomocí optického vlákna. Což je výhoda, protože diody nemusí být umístěny v rezonátoru. Zadní buzení laserovými diodami je na obr. 13.



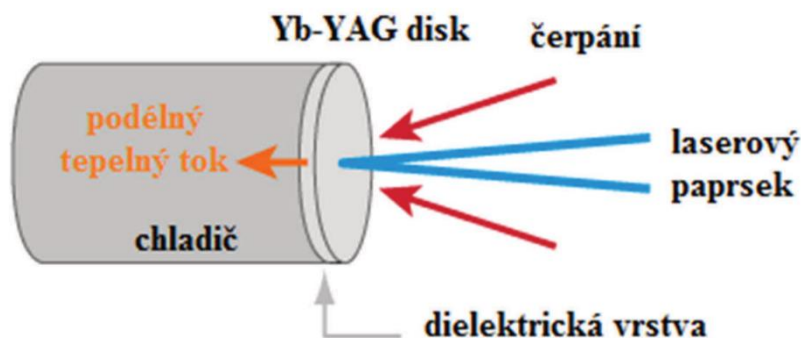
Obr.13 Zadní buzení pomocí laserových diod [19]

DPPS Nd:YAG laser má využití hlavně v pulsním režimu (v tzv. Q-spínaném pulsním režimu), ve kterém laser generuje velice krátké pulsy (řádově nanosekundy) s výkonem do 100W. Používá se pro značení a gravírování kovů, plastů a dalších materiálů. Pro svou nízkou účinnost jsou tyto lasery nahrazovány jinými typy, které v porovnání s Nd:YAG nabízejí vyšší účinnost a kvalitnější laserový svazek.

### 2.2.2 Diskové lasery [19, 20, 21, 22, 24, 25, 27, 42, 43, 44]

Diskový laser vznikl modifikací pevnolátkového laseru Nd:YAG. Na rozdíl od klasického Nd:YAG laseru je tento krystal vybroušen do tvaru tenkého disku, který má tloušťku 100 až 200 mikrometrů a průměr okolo 100 milimetrů. Aktivní prostředí Nd:YAG je většinou nahrazeno prostředím Yb:YAG, které obsahuje stejný krystal, ale je dopováno ionty ytterbia.

K buzení diskových laserů se používá zařízení, které umožňuje vícenásobné dopady budícího záření. To je přiváděno optickým vláknem a je absorbováno celou tloušťkou aktivního prostředí, tím je dosažena účinnost až 90 %. Společně s chladičem, který je nalepen na jeden konec disku, se dosahuje rovnoměrně rozloženého paprsku a rovného teplotního profilu. Tato kombinace disponuje velice kvalitním laserovým paprskem při široké škále výkonu. Zjednodušené schéma diskového laseru je na obr. 14.



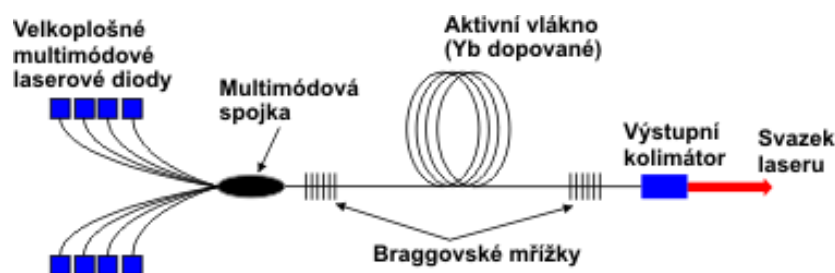
Obr. 14 Schéma diskového laseru [42]

Malá tloušťka disku může výrazně snížit účinnost absorbování záření. Pro zvýšení celkového výkonu laseru se používá tzv. škálování výkonu, což lze chápat jako proces pro opakovatelné zvýšení výstupního výkonu. Škálování lze provést dvěma způsoby. První možností je měnit výstupní výkon na disk přímou regulací výkonu čerpacího zdroje. Druhý způsob je sériové uspořádání několika disků, díky čemuž se dosáhne zvýšení výstupního výkonu bez změny kvality paprsku. Preferovanější je druhá varianta.

Firma Trumpf vyrábí diskové lasery pod názvem TruDisk, které nabízí výstupní výkon až 16 kW. Je to docíleno zapojením čtyř disků do série, přičemž každý z nich má jmenovitý výstupní výkon roven 4 kW.

### 2.2.3 Vláknové lasery [19, 20, 21, 22, 24, 25, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51]

Aktivní prostředí vláknových laserů tvoří křemíkové vlákno o průměru několika mikrometrů a délce až několika metrů. Nejčastěji je dopované ionty ytterbia (Yb), erbia (Er), neodymu (Nd) nebo thulia (Tm), které se během výroby přimísí do jádra ve formě malých částic. Vláknem je díky své geometrii efektivně chlazeno vzduchem, což má příznivý vliv na vedení laserového paprsku vláknem. Z velké části jsou tak omezeny termo – optické problémy, které vznikají vedením světla. Princip vláknového laseru je zobrazen na obrázku 15.



Obr. 15 Princip vláknového laseru [19]

V současnosti se vláknové lasery konstruují s dvouplášťovým optickým vláknem. Tato struktura je vidět na obrázku 16.

Pro buzení vláknových laserů se používají laserové diody. Diodové záření prochází přes venkovní plášť, který budí nízko výkonným laserovým paprskem střední optické vlákno. Vnitřní vlákno je dopované některým ze zmíněných prvků (např. ytterbiem) a vzniká zde laserový paprsek. Venkovní optické vlákno má poměrně velký průřez. Díky tomu je do něj možné přivést velký optický výkon. Má také nižší index lomu v porovnání s dopovaným jádrem a přivedená energie tak stále prochází skrze jádro a budí další ionty.



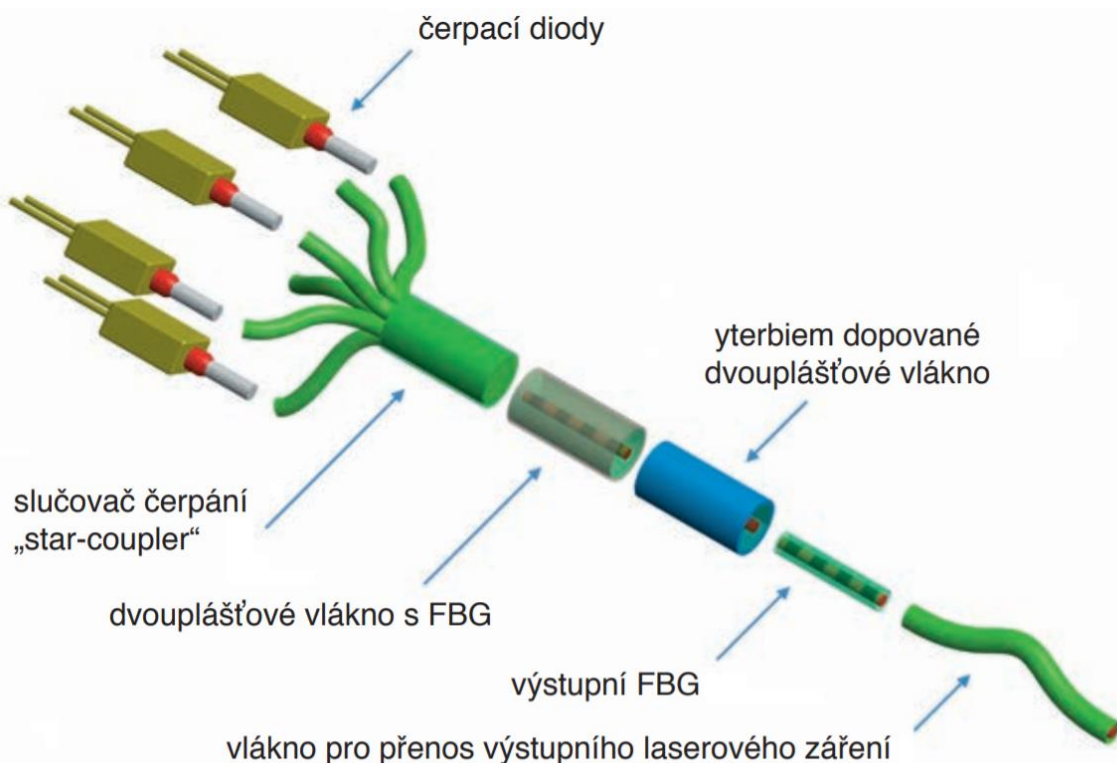
Obr. 16 Struktura dvojitého optického vlákna [48]

Optický rezonátor u vláknových laserů tvoří dvě rovnoběžná zrcadla. Jsou zde použity tzv. Braggovské mřížky nebo dichroická zrcadla. Braggovské mřížky jsou speciální struktury vytvořené přímo na aktivním jádře optického vlákna. Jsou vytvořené UV laserem, který změnil strukturu vlákna a vytvoří tzv. „zrcátka“, která odrážejí optické záření pouze dané vlnové délky. Zjednodušený princip buzení jádra vláknového laseru je na obr. 17.



Obr. 17 Princip buzení vláknového laseru [49]

Největší výhodou vláknových laserů je propojení laserových diod dalším vláknem, aniž by musely být použity jiné optické prvky. Laserový svazek je velmi kvalitní a může být fokusován na paprsek velmi malého průměru. Schéma vláknového laseru, včetně přivedení potřebné budící energie optickým vláknem do aktivního prostředí, je znázorněno na obrázku 18.



Obr. 18 Schéma vláknového laseru [49]

Mezi další výhody vláknových laserů patří:

- způsob chlazení – díky geometrii vlákna je chlazeno po celé své délce a není tak vyžadován speciální chladicí systém.
- vysoká účinnost – vláknové lasery mají celkovou účinnost 25-35 %.
- kvalitní výstupní svazek – běžné laserové diody konvertují záření v široký a nekvalitní svazek. Optické vlákno dokáže fokusovat světlo do jednoho velice kvalitního laserového svazku.

- kompaktní a robustní konstrukce – dílčí části vláknového laseru jsou spojeny svářem, je tak eliminováno časté složité nastavování a servis. Mají velkou životnost a jsou téměř nenáročné na obsluhu.

### 2.3 Plynové lasery [19, 20, 21, 22, 24, 25, 27, 52, 53, 54]

Plynové lasery jsou v průmyslu nejčastěji používané lasery. Jejich výkon se pohybuje od několika kilowatt až po miliwatty. Aktivní prostředí těchto laserů je tvořeno směsí plynů. Je tvořeno buď jednotlivými atomy nebo molekulami a často s příspěvkem dalších prvků, které mají doprovodné pomocné funkce.

Plynové lasery mohou pracovat jak v kontinuálním, tak ale i v pulsním režimu. Inverze populace hladin, jako předpoklad pro tvorbu stimulované emise, se ve většině případů dosahuje čerpáním plynu elektrickým výbojem. Existují ale i lasery využívající chemickou reakci nebo zřídka jsou čerpány opticky. Během provozu je plyn často ve stavu plazmy, která obsahuje výraznou koncentraci elektricky nabitých částic.

Prvním a zároveň do nedávna nejrozšířenějším plynovým laserem je červeně zářící He-Ne laser. V průmyslové praxi a v medicíně má však největší zastoupení CO<sub>2</sub> laser. Tyto typy laserů jsou v průmyslu nejčastěji používané, pracují jak v kontinuálním, tak v pulsním režimu. Aktivním prostředím těchto typů laserů je směs oxidu uhličitého, helia a dusíku (CO<sub>2</sub> + He + N<sub>2</sub>). Molekuly dusíku jsou vybuzeny vysokofrekvenčními proudy nebo elektrickým výbojem do metastabilního vibračního módu, kde nepružnými srážkami předávají energii molekulám oxidu uhličitého. Při návratu molekul oxidu uhličitého do základního stavu vzniká záření o vlnové délce 10,6 μm. Přidané helium plní funkci chlazení a zároveň přispívá k přechodu molekul CO<sub>2</sub> do základního stavu.

Podle typu proudění plynné směsi rozdělujeme CO<sub>2</sub> lasery na lasery s podélným prouděním („*fast axial flows*“), které disponují vysoce kvalitním výstupním svazkem určeným pro řezání a vrtání, a s příčným prouděním („*cross flow*“), kde se výstupní svazek horší kvality používá pro svařování a povrchové úpravy. Výkon CO<sub>2</sub> laserů má široký rozsah, pohybuje se od jednotek wattů až po několik kilowattů (až 20 kW) s celkovou účinností přibližně 10 %. Velkou nevýhodou vlnové délky je ve vedení laserového paprsku, protože ji nelze vést optickými vlákny. Používá se pouze systém složitých zrcadel.

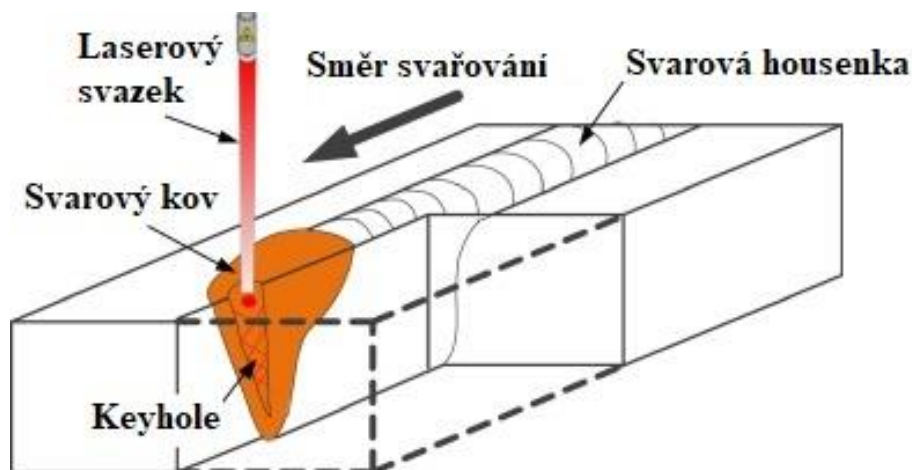
Nejnovější typ průmyslových CO<sub>2</sub> laserů je tzv. „slab“ laser, jedná se o difúzně chlazený deskový laser. Chlazení je realizováno difúzí tepla skrze vodou chlazené deskové měděné elektrody. Mezi měděnými elektrodami je velmi malá mezera, díky tomu je intenzita chlazení velice dobrá a není nutné vynucené proudění plynu, díky čemuž je i jeho spotřeba velice nízká. Jeden zásobník použité plynné směsi vydrží při nepřetržitém provozu až jeden rok. Výstupní výkon deskového laseru se pohybuje v intervalu od 0,5 až 2,5 kW.

### 3 LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ [7, 19, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64]

Svařování laserovým svazkem hraje důležitou roli v dnešním průmyslu. Je to jedna z nejdůležitějších a nejuniverzálnějších svařovacích metod pro spojování pokročilých materiálů. Jedná se o relativně mladou metodu spojování materiálů, ovšem s velkým potenciálem a nevyčerpanou zásobou oblastí pro výzkum. Proces tvorby svarového spoje je velmi komplexní a složitá záležitost. Je ovlivňován fyzikálními a metalurgickými účinky. Rovnováha mezi těmito účinky je předpoklad pro vznik kvalitního svaru s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi. Laserové svařování lze za pomoci manipulátorů a robotů automatizovat, vzniká kvalitní, kontinuální svarový spoj při zachování malých provozních nákladů.

Svařováním je ovlivněn materiál v okolí svarového spoje, jehož původní vlastnosti degradují. To může být problém zvláště u jemnozrnných pevnostních ocelí, kde v tepelně ovlivněné oblasti dochází k poklesu mechanických vlastností. Problémy, které vznikají při konvenčním svařování běžnými obloukovými metodami mohou být z části potlačeny použitím laserového paprsku vysoké intenzity.

Princip svařování laserem tkví ve fokusaci laserového svazku do velmi malé plochy, který interaguje s materiálem a dochází k ohřevu svařované součásti (obr. 19). Aby došlo k natavení materiálu musí být rychlost ohřevu několikanásobně vyšší než rychlost odvodu tepla. Ovšem díky vysoké rychlosti svazku a jeho velké energii je vnesené teplo malé v porovnání s obloukovými metodami. Znamená to menší tepelně ovlivněnou oblast, menší deformace, menší zbytková pnutí a jemnější strukturu. Usměrněný laserový paprsek a svazek elektronů mají největší hustotu energie ze všech známých energetických zdrojů. Porovnání s ostatními metodami je v tabulce č. 3.



Obr. 19 Schéma laserového svařování [56]

Tabulka 3 Porovnání svařovacích parametrů s ostatními metodami [7]

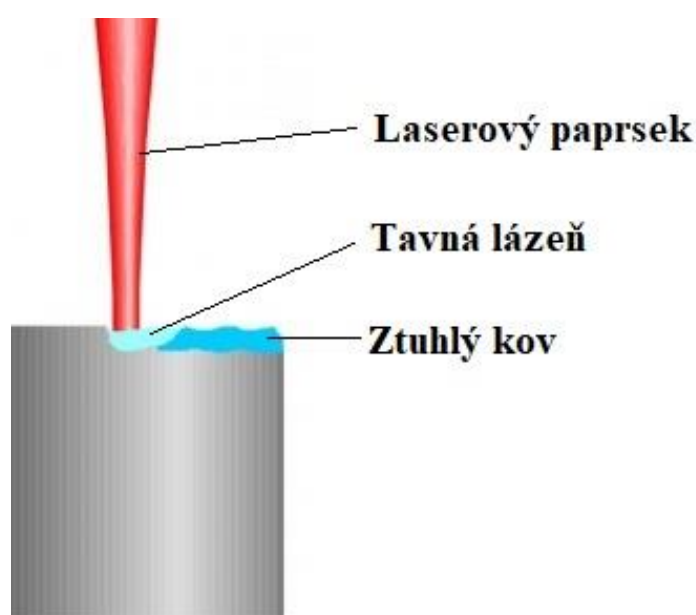
Metoda	Hustota energie [W·cm <sup>-2</sup> ]	Svařovací rychlost [m·min <sup>-1</sup> ]	Šířka svaru [mm]	Hloubka průvaru [mm]
Laser	10 <sup>7</sup> -10 <sup>9</sup>	10	0,1-0,5	10
El. svazek	10 <sup>8</sup>	0,5-5	0,03	50
Plazma	10 <sup>6</sup>	0,5-5	1	6
El. oblouk	10 <sup>4</sup>	0,5-3	2	4
Plamen	10 <sup>3</sup>	0,01	3	3

### 3.1 Kondukční režim [25, 55, 57, 64]

Kondukční svařovací režim probíhá s hustotou energie výkonu nižším než 10<sup>6</sup> W·cm<sup>-2</sup>, při kterém dochází k velmi malému odpařování materiálu. Laserový paprsek interaguje s povrchem základního materiálu, který odvádí vnesené teplo dál do materiálu. Energie svazku je při kondukčním svařování dodávána pouze skrze kondukcí tepla. Hloubka průvaru je limitována tepelnou vodivostí materiálu, díky tomu je maximální hloubka průvaru pouze několik desetin až jeden milimetr. Hloubka svarového kovu také většinou nepřesahuje jeho šířku. Povrch svarového spoje vytvořený kondukčním režimem je rovný, je tedy minimální převýšení svaru.

Pokud není teplo rychle odváděno dál do materiálu, vzroste teplota svarového kovu nad odpařovací. Vzniká pára kovu, hloubka průvaru se razantně zvýší a svařovací proces přejde do penetračního režimu.

Vznik svarového spoje u kondukčního svařování lze zjednodušeně popsat tak, že laserový paprsek dopadne na povrch materiálu, přitom část energie se absorbuje a část se odrazí. Energie, která byla pohlcena vytvoří na povrchu taveninu a ta v závislosti na čase zvětšuje svůj objem. Tavenina svařovaného materiálu se prohlubuje dál do materiálu, dokud se nevyrovná množství přivedeného tepla za jednotku času, teplo odvedenému. Tvorba svaru kondukčním svařováním je znázorněna na obrázku č. 20.



Obr. 20 Kondukční režim [57]

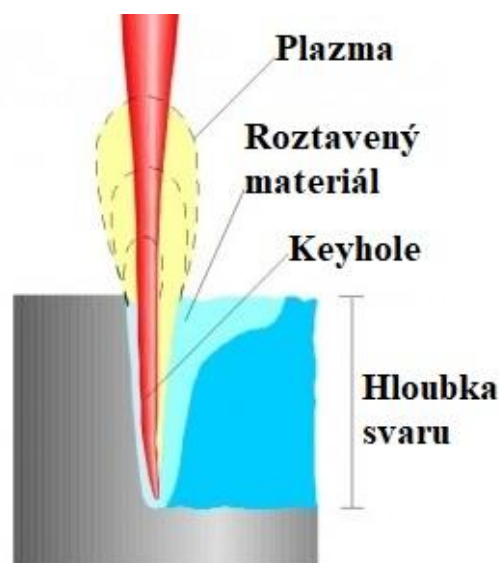
Tento režim svařování nachází své uplatnění hlavně pro spojování tenkostěnných součástí, například v elektrotechnice. Používá se zejména kvůli hladkému zaoblenému tvaru svaru, který se dále nemusí upravovat.

### 3.2 Penetrační režim [25, 55, 57, 64]

Penetrační režim pracuje s velkou energetickou hustotou laserového svazku a to nad  $10^6 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-2}$ . Laserový paprsek díky tomu způsobuje velmi rychlé tavení svařovaného materiálu a jeho následné vypařování. Na povrchu svařované součásti se vytvoří dutina (keyhole), která díky svému tvaru zlepšuje absorpci energie svazku díky několikanásobnému odrazu paprsku po stěnách dutiny. Vytváří se paroplynový kanál s průměrem až dvojnásobku průměru ohniska s hlubokou penetrací.

Vzniklý paroplynový kanál je ohraničen slabou vrstvou tekutého kovu. Stabilita kanálu je zajištěna rovnováhou mezi silami od vypařování materiálu a silami od povrchového napětí a hydrostatického tlaku taveniny. Na přední straně kanálu je materiál ohříván na teplotu odpařování a díky reakčnímu tlaku par se roztavený kov přesouvá okolo paroplynového kanálu do zadní části lázně. Tam chladne, zaplňuje dutinu vzniklou paroplynovým kanálem a po ztuhnutí kovu vytváří svarový spoj.

Výsledný svar je velice hluboký a úzký, jeho hloubka je až desetkrát větší, než je jeho šířka. Hloubka průvaru dosahuje hodnoty až 25 mm. Tento režim svařování se vyznačuje především velkou účinností a vysokou rychlostí svařování, díky níž je malá tepelně ovlivněná oblast. Používá se pro svařování materiálů velkých tlouštěk nebo při svařování několika vrstev materiálu najednou. Penetrační režim je na obr. 21.



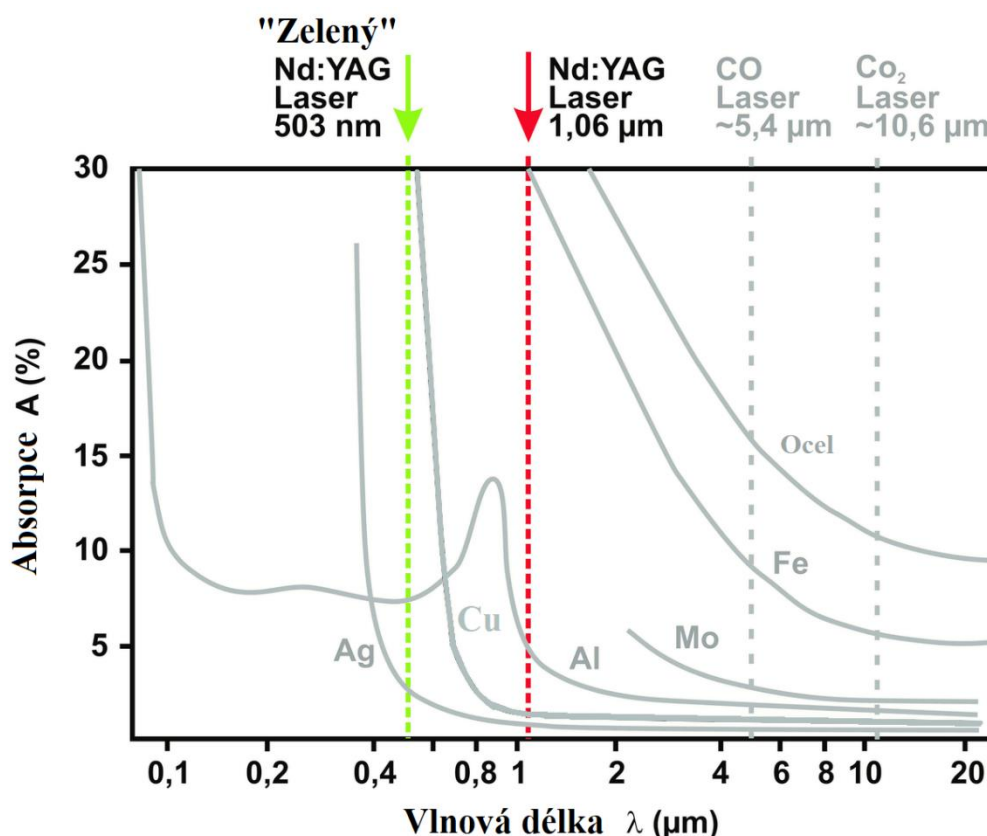
Obr. 21 Penetrační režim [57]

### 3.3 Interakce laserového svazku s materiálem [25, 34, 55, 66, 67]

Při kontaktu laserového paprsku se základním svařovaným materiálem dochází k lokálnímu ohřevu, ten je určen mnoha parametry. Některé z nich lze během procesu svařování upravovat a cíleně tak měnit například polohu ohniska, energetickou hustotu výkonu, tvar impulsu atd. Existují však i parametry, které není možné během procesu pozorovat a měnit, je to odrazivost materiálu, jeho tepelná vodivost, měrné teplo a další.

Vzhledem k dynamice celého procesu laserového svařování vzniká spousta parametrů, které přímo ovlivňují jeho stabilitu. Jedná se například o kolísání proudění laserového paprsku, narušení účinků plazmy nebo dynamické nestability roztaveného kovu společně s odpařováním během procesu svařování. Všechny tyto parametry mohou mít přímý vliv na okamžitou vnesenou energii, ohrožující mechanické vlastnosti finálního svarového spoje.

Základním parametrem pro zpracování materiálů pomocí laserového paprsku je absorpce. Absorpce materiálu může být vylepšena změnou několika parametrů. Je závislá na teplotě, drsnosti povrchu, vlnové délce, oxidaci povrchu, změně v morfologii atd. Závislost absorpce kovů na změně vlnové délky je znázorněna na obr. 22.



Obr. 22 Závislost absorpce na vlnové délce [66]

Z obrázku je zřejmé, že plynové CO<sub>2</sub> lasery jsou v současné době nahrazovány lasery pevnolátkovými. Vlnová délka laserového záření průmyslových pevnolátkových laserů je přibližně 1 μm, zatímco pro CO<sub>2</sub> lasery to je přibližně 10 μm. Pro hodnotu vlnové délky 1 μm má většina používaných materiálů několikanásobně vyšší absorpci laserového záření. Pro dosažení požadované energetické hustoty výkonu při kontaktu se svařovaným materiálem potom postačí menší výstupní výkon z laseru. Společně s mnohem vyšší účinností pevnolátkových laserů se z nich stávají jasné jedničky na trhu průmyslových laserů.

### 3.4 Metody laserového svařování [25, 57]

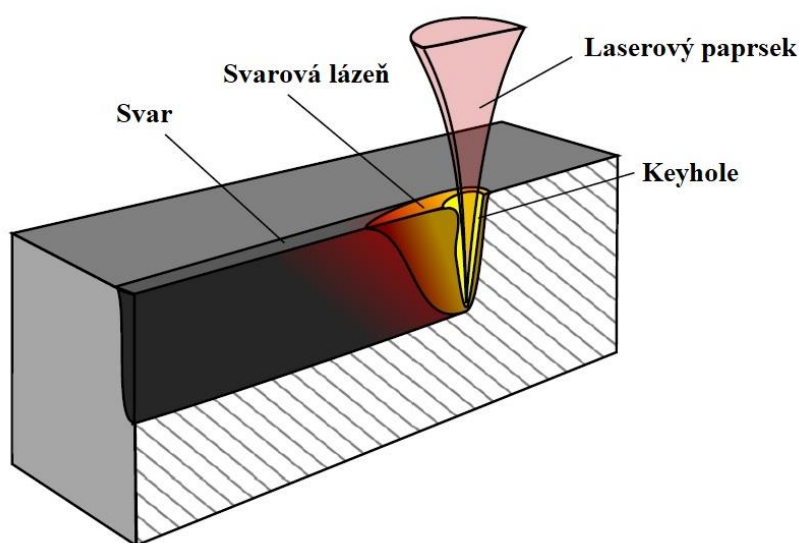
Laserové svařování je proces, při kterém je laserový paprsek fokusován do malého bodu na materiálu a dochází k jeho natavování. Je to metoda svařování používaná zejména tam, kde je vyžadována velká rychlost svařování a přesný, kvalitní svar bez nečistot, trhlin a pórů. Tato metoda svařování je zpravidla bezelektrodová a bezkontaktní, díky čemuž se zvyšuje stabilita celého procesu. Rozlišujeme tři základní druhy laserového svařování a to:

- bez přídavného materiálu
- s přídavným materiálem
- hybridní technologie



### 3.4.1 Laserové svařování bez přídavného materiálu [59, 60, 63]

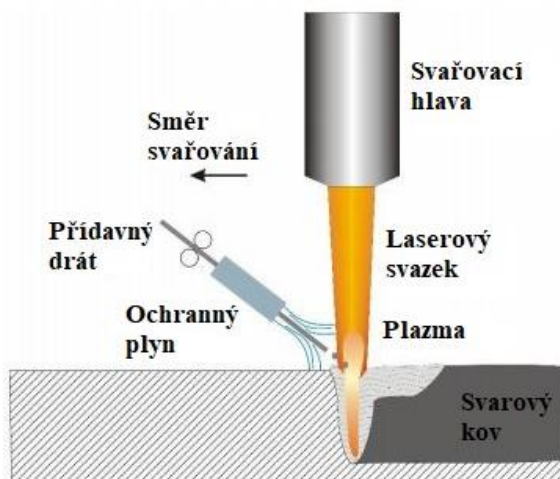
Laserové svařování bez přídavného materiálu je nejjednodušší aplikací. Není nutné řešit problematiku přívodu přídavného materiálu pomocí podávacího zařízení. Fokuseovaný paprsek dopadá pouze na svařovaný materiál a dochází tak k tavení pouze základního materiálu, což značně zjednodušuje celý proces. Natavený materiál se spojí a vytváří požadovaný svarový spoj. Svařování bez přídavného materiálu vyžaduje přesnou přípravu svařovaných součástí. Případná mezera mezi součástmi vede, díky fokusaci laserového svazku do malého bodu, ke vzniku nekvalitního spoje. Svařováním bez přídavného materiálu mohou také vznikat svarové vady v podobě propadení svaru na jeho konci. Tento způsob je zároveň nevhodný na koutové svary. Schéma laserového svařování bez přídavného materiálu je zobrazeno na obrázku 23.



Obr. 23 Schéma laserového svařování bez přídavného materiálu [59]

### 3.4.2 Laserové svařování s přídavným materiálem [59, 55, 61, 69]

V současné době se však pod pojmem laserové svařování neskrývá pouze metoda bez přídavného materiálu. Pro doplnění svarového kovu nebo pro vyplnění mezery mezi svařovanými součástmi se do materiálu přivádí přídavný materiál (obr. 24). Tento způsob svařování nachází své uplatnění převážně v automobilovém průmyslu. Kde složité tvary, například karoserií, vyžadují velice složité přípravkování, které ovšem nemusí zaručit dokonalé sesazení vylisovaných dílců. Přidaný materiál pomáhá při tvorbě těsného i pohledového svarového spoje.



Obr. 24 Laserové svařování s přídavným materiálem [61]

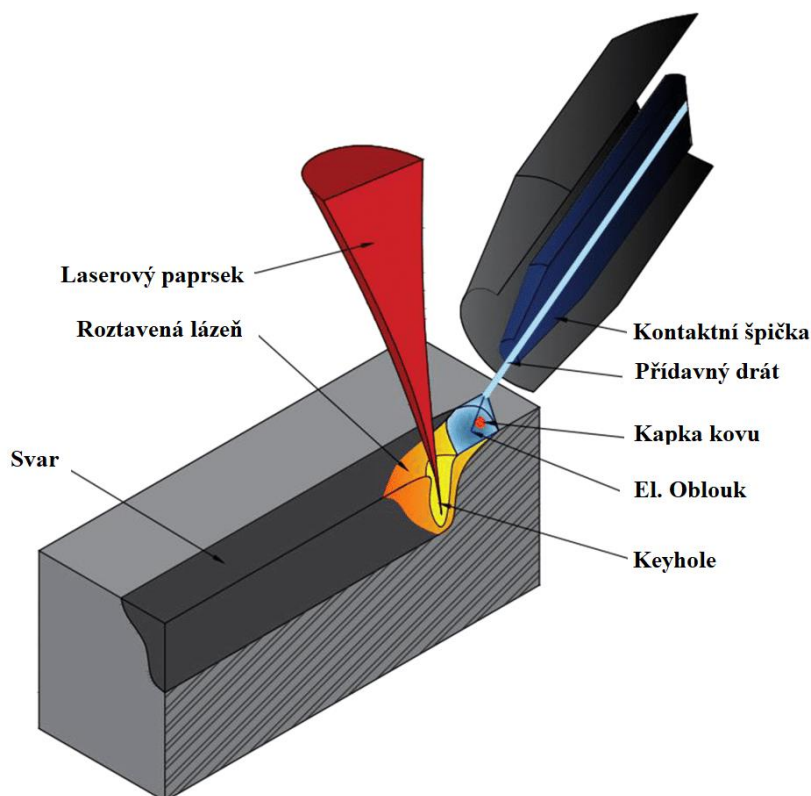
Přídavný materiál může být ve formě drátu, nebo prášku. Svařování s přídavným drátem se dělí na dvě základní metody. Laserové svařování se studeným drátem (z anglického „*cold wire welding*“) a s horkým drátem (z anglického „*hot wire welding*“). Na povrch svařovaných součástí je, kromě laserového svazku, podavačem přiváděn materiál ve formě drátu. Velice důležitým parametrem je rychlost podávání drátu, který stejně jako výkon nebo rychlost svařování ovlivňuje výslednou kvalitu svaru. Varianta se studeným drátem je použita v této práci a bude více rozebrána v praktické části.

### 3.4.3 Hybridní svařování [59, 65, 70, 71, 72]

Hybridní laserové svařování je proces, při kterém je technologie laseru kombinována s jinou obloukovou metodou svařování při zachování jedné svarové lázně. Doplnující obloukové metody se liší v závislosti na přítomnosti přídavného materiálu. Pokud je nutné použít přídavný materiál, lze použít metodu MIG. Pro aplikace nevyžadující přítomnost přídavného materiálu, je možné využít metodu svařování TIG s netavicí se elektrodou.

Primárním zdrojem energie je laserová technologie, která zajistí hluboké provaření, a přitom štíhlý svár. Oblouková metoda jako sekundární energetický zdroj zvyšuje stabilitu procesu, spolehlivost a efektivitu stejně tak jako kvalitu svarového spoje. Hybridní svařování je v dnešní době teprve rozvíjeno, v průmyslu má však větší zastoupení kombinace s metodou MIG. Teplo z obloukové metody má několik využití, dá se použít jako předehřev nebo dohřev materiálu, případně k prodloužení doby, kdy je kov v tekutém stavu, pro eliminaci některých svarových vad.

Hybridní svařování se používá například v lodním průmyslu, kde se tak svařují desky velkých rozměrů. Mezery mezi deskami jsou velké, takže je samotný laserový svazek nemůže překlenout. Proto se kombinuje s metodou MIG, kde hořák MIG překlene mezeru mezi deskami a uzavře jí přídavným drátem. Schéma hybridní technologie je na obr. 25.



Obr. 25 Schéma hybridního svařování [72]

### 3.5 Svařovací parametry [9, 25]

Základní svařovací parametry, které mohou být v průběhu svařovacího procesu měněny, jsou uvedeny v tabulce 4. Tyto parametry mají přímý vliv na vznik a kvalitu svarového spoje. Změna těchto parametrů a její vliv na svar bude dále rozebrána v experimentální části práce.

Tabulka 4 Základní parametry laserového svařování [9]

Parametr	Značka	Jednotka
Výkon laseru	P	[W]
Rychlost svařování	$v_s$	$[\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}]$
Rychlost podávání drátu	$v_d$	$[\text{m}\cdot\text{min}^{-1}]$

Měnitelné parametry procesu a jejich stručný popis:

- Výkon laseru – jedná se o teplotní parametr vyjadřující vliv laserového paprsku na materiál. Jeho velikost ovlivňuje hloubku průvaru. Změna výkonu přímo úměrně ovlivňuje šířku i hloubku svaru. Čím větší výkon, tím větší je i průvar. Hodnota výkonu se však může měnit v závislosti na modelu laseru.
- Rychlost svařování – označuje velikost dráhy, kterou urazí zdroj laserového paprsku v kontaktu se svařovaným materiálem za jednotku času. Pokud je výstupní výkon konstantní, tak rychlost svařování určuje množství energie přivedené do základního materiálu.

Pro malou rychlost svařování dochází kolem paroplynového kanálu k natavení okolního materiálu a ke zvětšení hloubky a šířky svaru. Současně se zvětšuje i tepelně ovlivněná oblast. Díky pomalejšímu odvodu tepla klesá tvrdost svarového kovu, tvrdost proto souvisí i s tloušťkou svařovaného materiálu. Materiály větší tloušťky odvedou teplo mnohem rychleji a v porovnání například s tenkými plechy má svar větší tvrdost. Zvýšení svařovací rychlosti pochopitelně zmenšuje hloubku průvaru a šířku svaru vinou snížení dodané energie.

Velká rychlost svařování má pozitivní dopad na celou řadu faktorů. Je zde méně vneseného tepla, s rostoucí rychlostí se zmenšuje šířka spoje, hrubnutí zrn je minimální stejně jako deformace svařence a zbytkové pnutí. Korozivzdorné oceli svařené laserovým svazkem neztrácejí tolik korozní odolnost v porovnání s obloukovými metodami. Stejně tak vrubová houževnatost je velmi dobrá při srovnání s obloukovými metodami.

- Rychlost podávání drátu – volbou nevhodné rychlosti podávání drátu a současně pokud je mezi svařovanými součástmi mezera, může dojít k zatečení materiálu do této mezery. Vzniklý svár může být lokálně propadlý a je nerovnoměrný. Při dostatečné rychlosti podávání drátu jsou tyto problémy eliminovány. Rychlost podávání navíc určuje tvar svaru, při větším množství drátu je svar vypouklý, což má pozitivní dopad na pevnost.

### 3.6 Vady svarových spojů [18, 25, 32, 51, 68, 73, 74, 75, 76]

Kvalita svarového spoje je určena především druhem svařovaného materiálu a technologií, kterou bude svar vytvořen. Je posuzován z hlediska tvaru, chemického složení, celistvosti, velikosti a mechanických vlastností. Vada je obecně definována jako odchylka od normou předepsaných vlastností, technickými podmínkami nebo smluvním vzorkem. Součást je způsobilá pro použití v provozu, pokud jsou svary bez vad, případně s přípustnými vadami. Přípustnost vad stanovuje druh, velikost a četnost vad v závislosti na tvaru a typu svařované konstrukce a jejího použití. Klasifikaci vad kovových materiálů vytvořených tavným svařováním definuje norma ČSN EN ISO 6520-1. Druhy vad jsou rozděleny do 6 skupin, některé z nich jsou uvedeny v tabulce 5. Každý druh vady má své referenční číslo a obsahuje i vysvětlení. V tab. 5 toto není uvedeno.

Tabulka 5 Svarové vady [18]

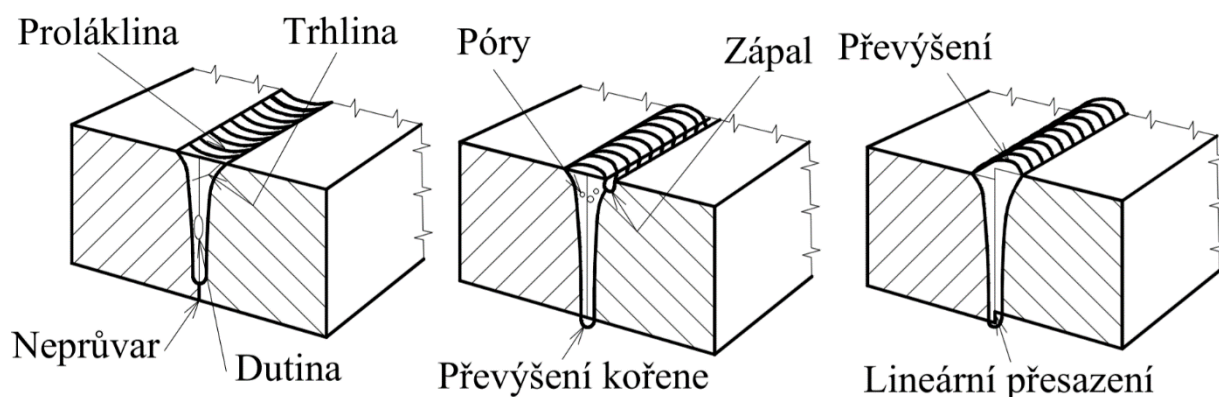
Číslo skupiny	Název skupiny	Označení vady
1	Trhliny	Trhlina, mikrotrhlina, podélná trhlina, příčná trhlina, hvězdicová trhlina, kráterová trhlina, ...
2	Dutiny	Dutina, plynová dutina, pór, rovnoměrná pórovitost, shluk pórů, rádek pórů, protáhlý pór, červovitý pór, povrchový pór, ...
3	Pevné vměstky	Pevný vměstek, struskový vměstek, tavidlový vměstek, oxidický vměstek, kovový vměstek, ...
4	Studené spoje a neprůvary	Studený spoj a neprůvar, studený spoj, neprůvar (nedostatečný průvar), neprovařený kořen, jehlice.
5	Vady tvaru a rozměru	Vada tvaru, zápal (vrub), souvislý zápal, vrub v kořeni, ...
6	Různé vady	Dotyk elektrodou, rozstřík, vytržený povrch, stopa po broušení, ...

Stejně jako při všech metodách svařování, tak i pro vytváření spojů laserem dochází ke vzniku vad snižujících kvalitu svaru. Na jejich vznik má vliv rychlost svařování, hustota výkonu laserového svazku, postup svařování nebo například nečistoty na ochranném skle. Příčiny vad vytvořených laserovým nebo elektronovým svařováním a jejich přípustnost nebo nepřípustnost popisuje norma ČSN EN ISO 13919-1. Tato norma také obsahuje stupně jakosti povrchu svarového kovu (viz tab. 6), jednotlivé spoje na stejném výrobku mohou mít rozdílný stupeň jakosti.

Tabulka 6 Stupně jakosti svarového spoje [76]

Skupina	Stupeň jakosti
D	nízký
C	střední
B	vysoký

Nejčastější příčiny svarových vad způsobených laserem a jejich prevence představuje norma ČSN EN 1011-6. Proláklina na vrchní straně svaru nebo přílišné převýšení kořene je způsobeno gravitací. K převýšení svaru, ale i kořene dochází také díky příčnému smrštění svařence. Neprůvar je nejčastěji způsoben nastavením nedostatečného výkonu svazku, vysokou rychlostí svařování nebo nevhodným nastavením ohniskové vzdálenosti. Dutina vzniká kvůli přítomnosti nečistot ve svarovém spoji, odpařením kovu nebo nestabilní keyhole. Při příliš rychlém ochlazení mohou vznikat trhliny. Znečištění svarového spoje může způsobit i póry. Svarové vady vytvořené laserovým svařováním jsou zobrazeny na obr. 26.



Obr. 26 Nejčastější vady po laserovém svařování [32]

### 3.7 Zkoušení svarových spojů [18, 32, 77, 78, 79, 80, 81, 82]

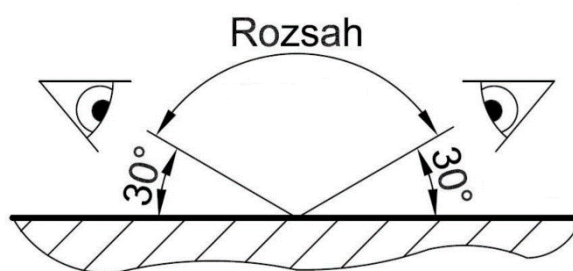
Při tvorbě svaru jakoukoliv metodou svařování mohou vznikat vady. Pro zjištění těchto vad a zajištění bezpečnosti a spolehlivosti součásti, se provádějí dva druhy zkoušek, a to nedestruktivní a destruktivní testování. Proces nedestruktivního zkoušení svarů probíhá bez deformace, snížení kvality svaru a porušení celistvosti nejen svaru, ale i celé součásti. To znamená, že součást je po provedení zkoušky funkční, takže je zkoušku možné provádět jak během výroby, tak i na konci celého procesu.

Pomocí některých zařízení lze odhalit vnější, ale i vnitřní svarové vady. Nedestruktivní metody jsou děleny dle polohy výskytu svarové vady. Pokud je vada povrchová, nebo těsně pod povrchem, tak se používají metody vizuální, kapilární nebo metoda magnetická prášková. Ovšem pro vnitřní vady se používá například ultrazvuk, nebo rentgen. Základní typy nedestruktivního zkoušení svarů, jejich označení a norma a základní vybavení k provedení těchto zkoušek, jsou shrnuty v tab. 7.

Tabulka 7 Základní nedestruktivní zkoušky [18]

Druh vad	Typ zkoušky	Základní zařízení	Norma	Označení
Vnější vady	Vizuální zkouška	Zrak, lupa, endoskop, posuvné měřítko, svítidla	ČSN EN ISO 17637	VT
	Penetrační (kapilární) metoda	penetrační kapalina, vývojka, emulgátor, odmašťovač, odstraňovač penetrantu (čistič)	ČSN EN ISO 3452-1	PT
	Magnetická prášková metoda	magnetický suchý prášek/suspenze roztoku magnetického prášku, stejnosměrný/střídavý proud nebo elektromagnet	ČSN EN ISO 9934-1, ČSN EN ISO 17638	MT
Vnitřní vady	Ultrazvuková zkouška	zkušební sondy připojené na obrazovku	ČSN EN ISO 16810, ČSN EN ISO 17640	UT
	Rentgenová zkouška	film (radiogram), rentgenový přístroj/zdroj gama záření	ČSN EN ISO 17363-1	RT

V experimentu bude z nedestruktivních metod použita pouze vizuální zkouška. Ta bude provedena před samotným procesem svařování a také po jeho dokončení. Minimální intenzita osvětlení použitá při testování je 350 lx, ovšem doporučená je 500 lx. Maximální dovolená vzdálenost oka od pozorovaného objektu je 600 mm a současně úhel mezi okem a povrchem svaru nesmí být větší než 30 ° (obr. 27). Pro kontrolu svaru nebude nutné použití nepřímé kontroly pomocí zrcátek nebo kamer, jelikož svařovaný materiál bude dobře přístupný pro oční kontrolu.



Obr. 27 Vizuální kontrola svaru [82]

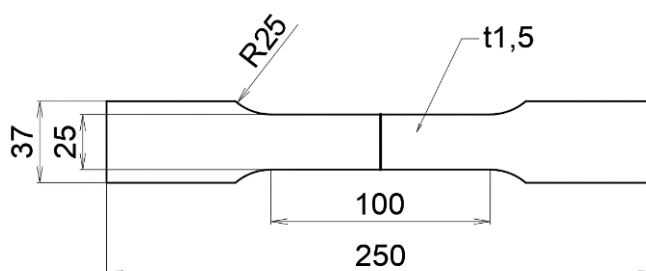
Pro zjištění mechanických vlastností svaru jsou nedestruktivní metody testování svarů nepoužitelné. K jejich určení je nutná deformace vzorku. Destruktivním zkoušením se ověřují vlastnosti svařovaných materiálů a samotných svarů. Výstupem je garance odolnosti proti vnějším vlivům, jako je charakter zatížení, teplota nebo okolní prostředí. Dále se díky nim zjišťuje strukturní stav svaru, což zahrnuje stabilitu, výskyt svarových vad atd. Nejčastější destruktivní zkoušky svarů jsou v tabulce 8 společně s normou metody a výčtem mechanických vlastností, které lze danou zkouškou zjistit.

Tabulka 8 Základní destruktivní zkoušky [18]

Typ zkoušky	Mechanické vlastnosti	Norma
Zkouška tahem	mez kluzu, mez pevnosti, tažnost, kontrakce	ČSN EN ISO 6892-1
Zkouška ohybem	deformační schopnost – prodloužení, úhel ohybu	ČSN EN ISO 5173
Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy	vrubová houževnatost	ČSN EN ISO 148-1
Zkouška rozlomením	detekce vnitřních vad	ČSN EN ISO 9017
Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů	hodnocení struktury – vady, struktura zrn, morfologie a orientace atd.	ČSN EN ISO 17639
Zkouška tvrdosti podle Vickerse	tvrdost	ČSN EN ISO 6507-1
Zkouška tvrdosti podle Brinella	tvrdost	ČSN EN ISO 6506-1
Zkouška tvrdosti podle Rockwella	tvrdost	ČSN EN ISO 6508-1
Zkoušení mikrotvrdosti	mikrotvrdost	ČSN EN ISO 9015-2

Z uvedených destruktivních zkoušek bude v experimentu použita tahová zkouška. Ta představuje základní metodu testování svarů pro posouzení pevnostních a plastických charakteristik. Princip spočívá v upnutí normalizované tyče, která je ve většině případů opatřena osazením pro uchycení, do trhacího stroje. V trhacím stroji je zkušební součást (obr. 28) za definovaných podmínek (rychlost zatěžování, teplota) deformována. Jedná se o jednoosé tahové namáhání mezi dvěma příčnicí, které probíhá od nulové hodnoty zatížení až do bodu, kde dojde k porušení zkušební tyče. Výsledkem tahové zkoušky je tahový diagram, který zobrazuje závislost zatížení na prodloužení tyče. Zkoušku popisuje norma ČSN EN ISO 4136. Výstupem ze zkoušky jsou mechanické vlastnosti:

- mez kluzu  $R_e$  [MPa],
- mez pevnosti  $R_m$  [MPa],
- tažnost  $A$  [%],
- kontrakce  $Z$  [%].

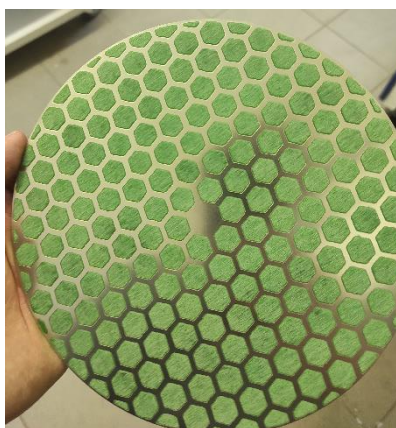


Obr. 28 Rozměry vzorku pro zkoušku tahem

Dalšími zkouškami, které budou v experimentální části provedeny, jsou makroskopické a mikroskopické kontroly svarů. Jsou to zkoušky, při nichž se vyhodnocuje čistota materiálu, mikrostruktura materiálu, tepelně ovlivněné oblasti svarového kovu a makrostruktura spoje. To zahrnuje například strukturu zrn, trhliny za studena i za horka, vměstky, studené spoje, dutiny, velikosti zrn, hranice zrn, lamelární praskání atd.

Rozdíl mezi mikroskopií a makroskopií je ve velikosti zvětšení. Pokud je zvětšení vzorku menší jak 50x, tak se jedná o makroskopické zkoumání, které zahrnuje i kontrolu pouhým okem. Při zvětšení zkoumaného materiálu 50x – 500x je možná kontrola v oblasti mikroskopické. Ta se provádí pomocí elektronového nebo optického mikroskopu. Pro pozorování mikrostruktury je velice důležitá a správná příprava zkoumaného vzorku. Postup metalografické zkoušky:

- odběr vzorku – musí být proveden bez mechanického i tepelného ovlivnění struktury. Nesmí být deformován a teplota nesmí přesáhnout teploty fázových přeměn.
- preparace vzorku – pro zachování povrchové vrstvy je vzorek zalit nebo zalisován do formy. Po umístění vzorku do formy je pro zalévání za studena stěžejní, aby plocha vzorku, která bude pozorována, byla v dotyku se dnem formy. Poté je forma vyplněna zalévací hmotou, která se nechá následně vytvrdit. Používá se například hmota epoxidová, akrylátová aj. Pro zabránění vzniku vzduchových bublin je možné zalévání za studena provést ve vakuu. Za tepla je zalisování prováděno při působení velkých sil (30 – 50 kN) ve vyhřívané formě lisu (100 – 180 °C). Vzorek umístěný do formy je zasypán pryskyřicí a za definovaných podmínek je zalisován do formy.
- broušení vzorku – je prováděno pro odstranění nerovností a nečistot z pozorované plochy, a to mechanizovaně nebo ručně. Při ručním broušení se nejčastěji používají brusné papíry obsahující  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nebo  $\text{SiC}$ . Pro mechanizované odstranění nerovností se používají metalografické brusky. Přičemž je vzorek přitlačován na rotující brusný papír. Přitlačování může být realizováno poloautomaticky, kdy je vzorek přitlačován ručně, nebo automaticky, kdy je vzorek upnut do přípravku a za definovaných podmínek je přitlačen na brusný papír.
- leštění vzorku – pro odstranění vrcholů povrchových nerovností minimálním úběrem materiálu se používá leštící kotouč. Do procesu leštění zasahuje kromě kotouče (obr. 29) také leštící medium, to tvoří buď pasta, prášek nebo suspenze obsahující například diamant,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nebo  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ .

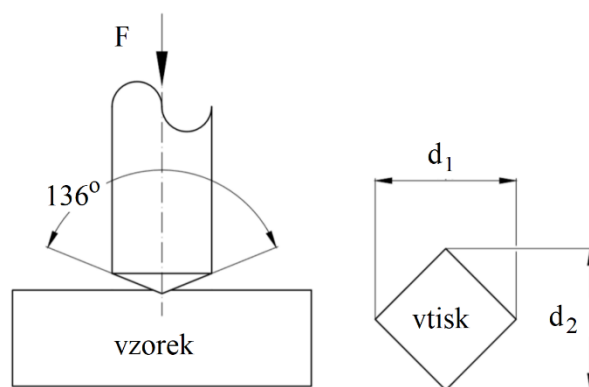


Obr. 29 Leštící kotouč



- leptání vzorku – používá se pro zkoumání mikrostruktury, proto je prováděno pouze tam, kde je to vyžadováno. V závislosti na druhu zkoumaného materiálu a požadavcích na pozorování je rozlišováno několik metod leptání, například chemické, plošné, elektrolytické nebo tepelné leptání.

Další metodou testování svarových spojů je měření mikrotvrdomosti podle Vickerse. Tuto zkoušku popisuje norma ČSN EN ISO 6507-1. Je založena na vtlačování pravidelného čtyřbokého jehlanu do zkoušeného materiálu definovaným zatížením  $F$ . Vtlačovaný jehlan je diamantový a má vrcholový úhel  $136^\circ$  (obr. 30). Po odlehčení jsou na vzorku změřeny délky dvou úhlopříček  $d_1$  a  $d_2$ . Pro měření mikrotvrdomosti je hodnota zatěžující síly v rozsahu od 0,01 N do 1 N. Aby byly výsledky relevantní, tak se délka úhlopříček musí pohybovat v intervalu 0,02 mm až 1,4 mm. Pro výpočet tvrdosti je nutné znát zatěžující sílu a aritmetický průměr z délek vtisku. Výstupem je bezrozměrné číslo, které značí napěťový charakter. Jiná možnost zjištění tvrdosti je z délek úhlopříček vtisku porovnáním s tabulkou. Jednotka tvrdosti je HV, za tuto značku je vždy doplněna přibližná hodnota zatížení například HV0,1. Výhodou zkoušky mikrotvrdomosti je zjištění tvrdosti jednotlivých strukturních složek.



Obr. 30 Zkouška tvrdosti dle Vickerse [18]

## 4 SVAŘITELNOST KOROZIVZDORNÝCH OCELÍ [9, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91]

Pro výrobu žlabů se nejčastěji používá austenitická korozivzdorná ocel X5CrNi 18-10, případně X2CrNiMo 17-12-2. Hlavním a nejvýznamnějším legujícím prvkem korozivzdorných ocelí je chrom. S nárůstem obsahu chromu se zvyšuje i odolnost proti korozi v oxidačním prostředí. Aby byla zaručena odolnost proti korozi v normálním prostředí, musí být obsah chromu větší než 11,7 %. Nicméně pro zajištění korozivzdornosti i po svaření se oceli legují 18 % chromu.

Svařování austenitických korozivzdorných ocelí je náročný proces, protože v porovnání s nízkolegovanými mají vyšší tepelnou roztažnost, a to až o 50 %. Velká tepelná roztažnost má nepříznivý vliv na vznik deformací nebo zbytkových pnutí. Další rozdíl proti nízkolegovaným ocelím je větší elektrický odpor, ale nižší tepelná vodivost. Svařitelností korozivzdorných ocelí a obecným zásadám a pokynům se věnuje norma ČSN EN 1011-3. Na svařitelnost mají největší vliv tři základní nežádoucí faktory:

- vznik trhlin za horka – jejich příčinou je přítomnost prvků (S, P, Si, Ti, Nb), které snižují plastické vlastnosti kovu při jeho tuhnutí nebo vytvářejí nízkotavitelná eutektika společně s niklem nebo železem. Obsah síry je možné snížit přidáním manganu, který vytváří sulfidy a ty jsou následně vyloučeny formou strusky. Vliv fosforu lze zmenšit díky delta feritu, protože se v něm rozpouští.
- precipitace karbidů chromu – při teplotách v intervalu 425 – 815 °C dochází k vylučování karbidů chromu na hranicích zrn. To způsobuje snížení obsahu chromu v pasivační vrstvě a tím ztrátu odolnosti proti korozi. Řešením je přidání stabilizačních prvků (Nb, Ti) případně snížení přítomnosti uhlíku pod 0,03 hm. %.
- vznik  $\sigma$ -fáze – ten má za následek zkřehnutí součástí. Pokud je vysoký obsah chromu (od 20 %) vzniká při teplotách 500 – 800 °C  $\sigma$ -fáze. Je to křehká a tvrdá intermetalická sloučenina, jejíž vznik je nejčastěji podpořen přítomností feritotvorných a karbidotvorných prvků, zvýšeným obsahem delta feritu, heterogenitou složení a dalšími faktory.

Obecně lze austenitické korozivzdorné oceli svařovat téměř jakoukoliv technologií. Většinou se svařují bez přehřevu, při zachování ochrany svarových ploch, a to včetně kořenu svaru. Je doporučeno nepřekračovat hodnotu teploty interpass vyšší než 150 °C.

Austenitické korozivzdorné oceli se při svařování s přídavným materiálem spojují materiálem stejného chemického složení, nebo výše legovaným. A to nejen kvůli zachování dobré korozní odolnosti základního materiálu a svarového kovu, ale i pro bezpečné svařování bez vzniku trhlin za tepla. Protože se v menší produkci budou vyrábět žlaby i z materiálu X2CrNiMo 17-12-2, bude tento materiál použit i jako přídavný. Jeho chemické složení, které je vyňato z materiálového listu (příloha 2), je uvedeno v tabulce 9.

Tabulka 9 Chemické složení oceli X2CrNiMo 17-12-2 [91]

Chemické složení [%]									
Prvek	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Ni	Mo
Dle normy	≤0,03	≤1,00	≤2,00	≤0,045	≤0,03	≤0,11	16,5-18,5	10-13	2-2,5

## 5 EXPERIMENTY A JEJICH VYHODNOCENÍ [9, 11, 84]

Řešenou součástí je žlab sloužící pro odvod kapalin z podlah větších objektů (například v komerčních kuchyních). Z rozvinu žlabu je ohraňovacím lisem vytvořen požadovaný tvar součásti, která je následně plně zavařena (viz kapitola 1) a poté doplněna (přivařováním) dalšími díly odvodňovacího systému. Po následném moření a doplnění plastových komponent je díl připraven pro použití v provozu, což je vidět na obr. 31.



Obr. 31 Kompletní žlab [9]

V současnosti je řešená součást svařovaná metodou MAG, která je ale pro danou sériovost nevhodná. Úkolem práce je zjistit, zda je možné svar na pohledové ploše vytvářet laserovým svazkem s přídavným studeným drátem. Přídavný materiál je zde kvůli následnému broušení této plochy, proto je důležité, aby zde byl spoj s převýšením svaru. Propadlý kořen je v této části žlabu nepřipustnou vadou. K posouzení vhodnosti použití laserové technologie poslouží provedené experimenty společně s vyhodnocením vlivu použitých parametrů svařování.

V experimentální části bylo vytvořeno 9 vzorků z plechového polotovaru z austenitické korozivzdorné oceli X5CrNi 18-10 s přídavným materiálem z oceli X2CrNiMo 17-12-2. K oběma korozivzdorným ocelím je v tabulce č. 10 uvedeno chemické složení, které je vyňaté z atestu. Atesty obou materiálů jsou uvedeny v příloze 3 a 4.

Tabulka 10 Chemické složení korozivzdorných ocelí [11, 84]

Chemické složení [%]									
Prvek	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Ni	Mo
X5CrNi 18-10	0,025	0,38	1,4	0,036	0,001	0,069	18,12	8,03	-
X2CrNiMo 17-12-2	0,019	0,54	1,34	0,037	0,003	0,038	16,59	10,03	2,05

Tvar a rozměry všech vzorků jsou identické, rozměry tabulí před svařením jsou 150x150 mm a po svaření tedy 150x300 mm. Oba plechy mají tloušťku 1,5 mm a jsou spojeny pomocí tupého svaru. Před samotným procesem svařování byly pro lepší vzájemnou polohu vzorků na obou koncích vytvořeny bodové svary metodou TIG. Tzv. nabodování bylo provedeno také kvůli tomu, aby se eliminovalo složité přípravkování a aby při průchodu laserového svazku nedošlo ke zvětšení mezery mezi plechy a nedošlo tak k jejich neprovaření.

Pro tento experiment není třeba užití předehřevu, dohřevu nebo následného tepelného zpracování. Vzorky budou svařeny laserovým paprskem s použitím přídavného studeného drátu, pozice svařování PA (vodorovná shora).

Parametry procesu, které byly popsány v kapitole 3.5, budou měněny v závislosti na vizuální kontrole svaru. Podle převýšení svaru, stability procesu a vizuální kvality svaru se mění nastavení výkonu svazku, rychlosti svařování a rychlosti podávání přídavného drátu. Tímto způsobem získané vzorky budou následně připraveny na příčnou zkoušku tahem a pozorování makro a mikrostruktury.

## 5.1 Svařování laserem [9]

Vlastní experimenty byly provedeny ve společnosti ACO Industries k.s. v Příbyslavi pomocí robotizovaného pracoviště (obr. 32). Svařování probíhalo v uzavřené laserové buňce, která je z důvodu bezpečnosti uzavřená ze všech stran. Obsluhující personál musí mít při pobytu v buňce speciální ochranné brýle. Pracoviště disponuje i kamerovým systémem, kde zachycená projekce je vysílána vně buňky. Ostatní pracovníci tak vidí aktivitu v buňce v reálném čase a ví, kdy je z hlediska bezpečnosti možné vstoupit dovnitř.



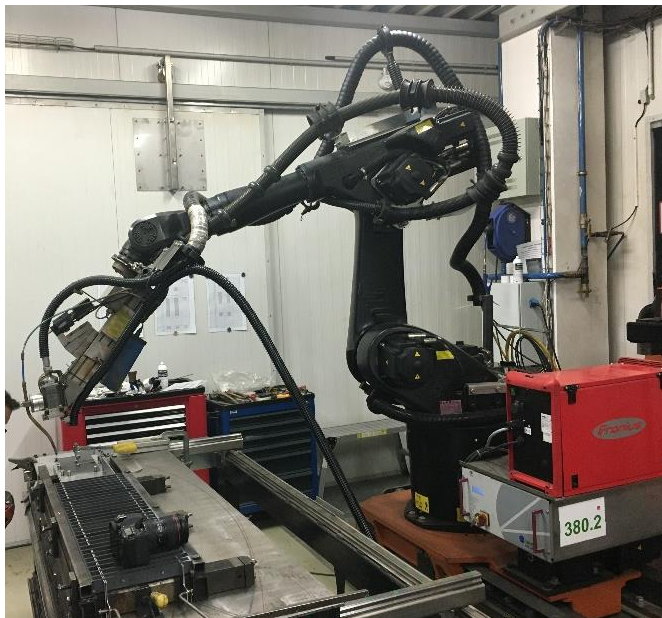
Obr. 32 Robotické pracoviště [9]

Firma ACO vyrábí na tomto pracovišti i jiné druhy odvodňovacích systémů, pro které většinou není nutné vytvářet pevnostní svary, proto je dostačující kondukční režim svařování, při kterém většinou není vyžadováno, aby byl kořen svaru provařený. Vyžadován je svar s co nejhladším povrchem a požadované těsnosti.

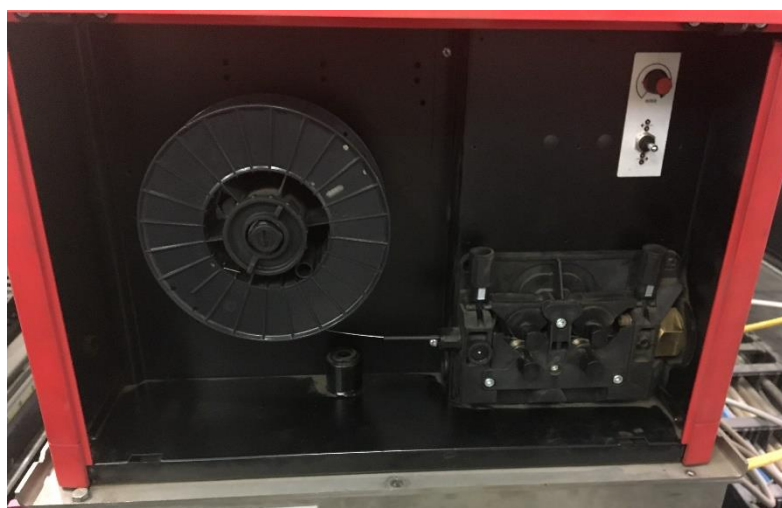
Pro tyto účely je využíván polovodičový laser. Zdroj laserového záření je od společnosti Laserline a nese označení LDM 2500-60. Výkon zdroje je 2500 W s měnitelnou vlnovou délkou pohybující se v intervalu od 920 nm až do 980 nm. Vedení laserového záření je realizováno optickým vláknem o průměru 600  $\mu\text{m}$  ze zdroje do svařovací hlavy, která nese označení OTS5. Ta je připevněna na polohovacím průmyslovém robotu KUKA KR 30-60, který je zobrazen na obrázku 33.

Ochranný plyn je při režimu svařování s přídavným drátem přiváděn trubicí, kterou je zároveň veden i přídavný materiál. Průměr podávací hubice je 20 mm a drát svírá se základním materiálem při kontaktu s vrchní plochou svaru úhel 45°. Ohnisková vzdálenost je 222 mm a kvalita paprsku BPP je 66 mm·mrad.

Podávání drátu je zajištěno hlavním podavačem od firmy Fronius pod označením Fronius KD 7000 (obr. 34), průměr přídavného drátu je 0,8 mm. Lepší vedení drátu zajišťuje pomocný podavač taktéž od společnosti Fronius. Podmínkou pro svařování korozivzdorných ocelí je přidávání materiálu o stejném chemickém složení, nebo výše legovaný. V této práci je pro svařování vzorků použit přídavný materiál s označením X2CrNiMo 17-12-2.



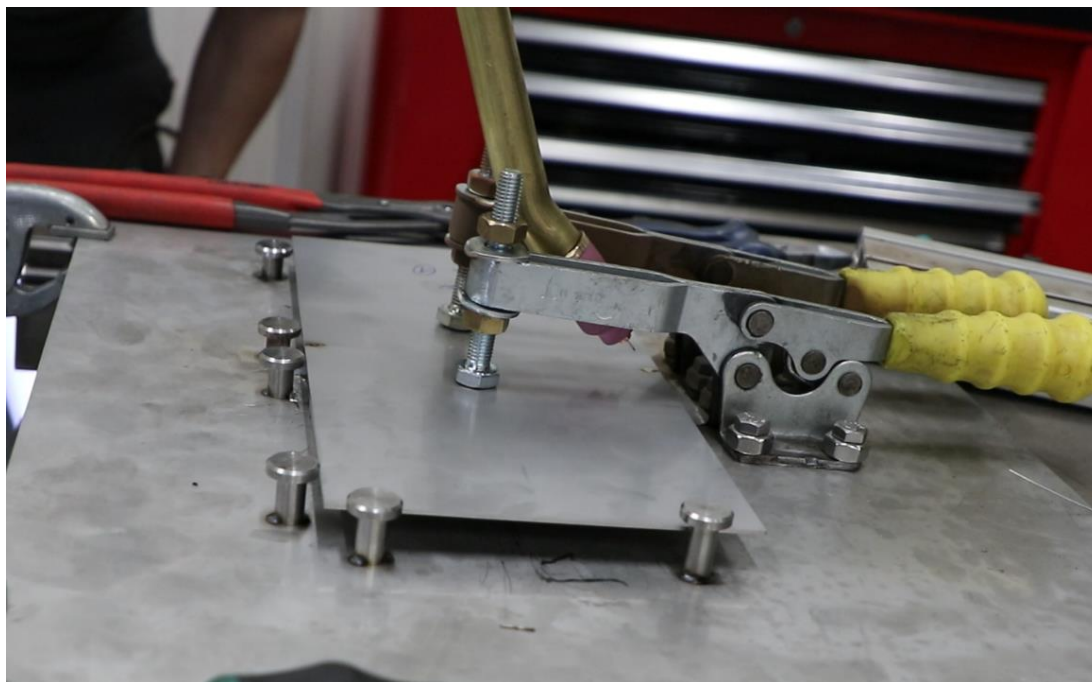
Obr. 33 Průmyslový robot KUKA KR 30-60 [9]



Obr. 34 Podavač Fronius KD 7000

Před experimentem byla řešena problematika přípravkování. Plechy jsou svařovány v poloze PA tupým svarem, proto byla jako dostačující systém upnutí zvolena metoda uchycení pomocí upínek. Ty přitlačovaly svařovaný materiál ke svařovacímu přípravku, kvůli zamezení pohybu plechů vlivem vneseného tepla. Riziko vzniku mezery mezi plechy bylo eliminováno díky

bodovým svarům, což značně zjednodušuje upnutí vzorků. Upnutí vzorku do přípravku je vidět na obrázku 35. Před samotným procesem svařování byla ještě provedena simulace pohybu, při níž byla kontrolována trajektorie paprsku, zda se pohybuje po hranách spojovaných materiálů. Následovalo seřízení průtoku ochranného plynu, který proudí po hraně svařovaných materiálů, a nakonec byl zahájen samotný proces svařování.



Obr. 35 Upnutí vzorku do přípravku

Vzorky nebyly před spojením nijak upravovány, nebylo to ani žádoucí. Cílem totiž je pracovat s materiály v takovém stavu, v jakém přijdou z předchozích operací. Dělení polotovarů materiálů je realizováno laserovým řezáním, kde pro tloušťku 1,5 mm je dosaženo dostačující kvality plochy po řezu.

## 5.2 Experimentální část A

Před vytvořením prvních vzorků byly vyzkoušeny některé kombinace procesních parametrů. Tyto svary byly hodnoceny pouze vizuální kontrolou, protože na první pohled je evidentní, jestli je nastavený výkon příliš vysoký a dochází k propálení plechu, nebo je naopak příliš malý a nedochází k tavení materiálu a vzniku svarového spoje. Svařovací rychlost i rychlost podávání drátu lze také přibližně určit. Z těchto zkušebních svarů byl vybrán jeden, který nabízel vizuálně nejkvalitnější svar a jehož procesní parametry byly použity pro první svařovaný vzorek. Svařovací parametry výchozího vzorku jsou uvedeny v tabulce 11.

Tabulka 11 Výchozí svařovací parametry

Svařovací parametry pro první vzorek		
Parametr	Hodnota	Jednotka
Výkon laseru	2500	[W]
Svařovací rychlost	10	[mm·s <sup>-1</sup> ]
Rychlost podávání drátu	2,2	[m·min <sup>-1</sup> ]

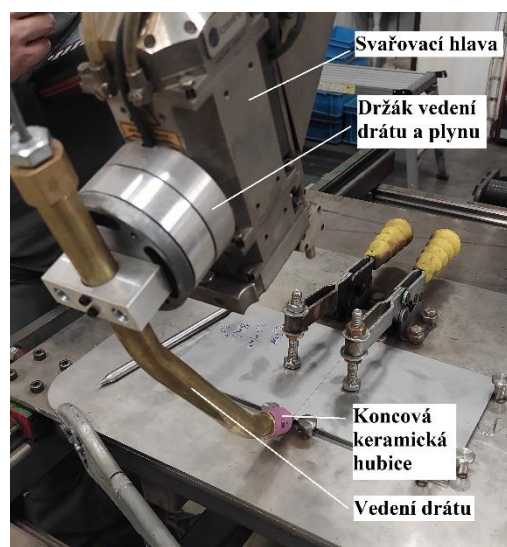
Po aplikaci prvních svařovacích parametrů a následné vizuální kontroly svaru byly navrženy další parametry, kde se ve většině případů změnil pouze jeden z nich. Následovala opětovná

vizuální kontrola. Takto bylo vytvořeno celkem 9 vzorků, jejichž svařovací parametry jsou přehledně uvedeny v tabulce 12.

Tabulka 12 Procesní parametry vzorků

Číslo vzorku	Výkon laseru [W]	Svařovací rychlost [ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ]	Rychlost podávání drátu [ $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ]	Úhel natočení hlavy [ $^{\circ}$ ]
1	2500	10	2,2	90
2	2300	10	2,2	90
3	2100	10	2,2	90
4	2100	10	2	90
5	2300	10	2	90
6	2500	10	2,4	90
7	2500	10	2,4	70
8	2500	8	2,4	70
9	2500	6	2,4	70

Svařování probíhalo ve směru tlačení drátu. Vzorek byl prvně laserem nataven a poté do něj byl přidáván drát. Pro vzorky s číslem 7, 8 a 9 byla laserová hlava natočena, úhel mezi hlavou a svařovaným materiálem nebyl  $90^{\circ}$  jako v předešlých případech, ale přibližně o  $20^{\circ}$  menší. Tato úprava byla provedena z důvodu vytvoření ostřejšího úhlu mezi přidávaným drátem a svařovanou součástí. Ten zlepšuje způsob přívodu drátu, který není vtlačován do materiálu, ale přiváděn nad něj. Poloha konce drátu je přibližně 1 mm nad povrchem svařovaných plechů. V tomto bodě dochází k natavování drátu a promísení se svarovou lázní součástí. Natočená hlava společně s podávací hubicí je zobrazena na obrázku 36.



Obr. 36 Natočení laserové hlavy

### 5.2.1 Tahová zkouška experimentu A [12]

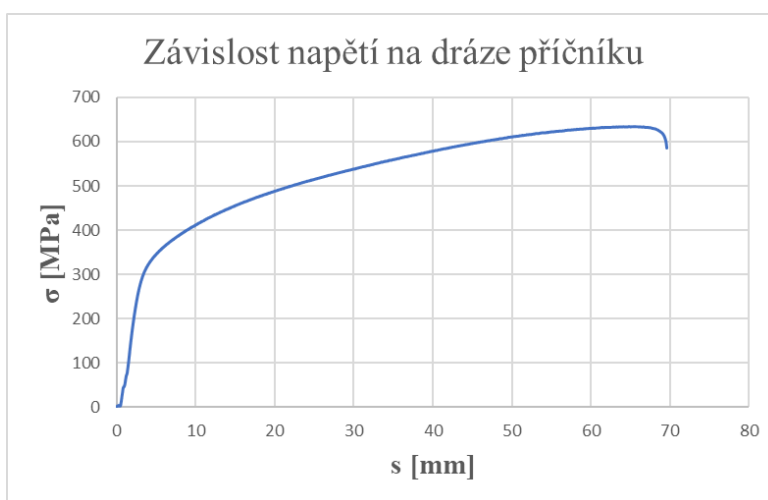
Tahové zkoušky probíhaly na hydraulickém zkušebním stroji ZD40 /400kN/. Na tomto zařízení se dají provádět tahové, ohybové a tlakové zkoušky materiálů do zatížení 400 kN s řízenou rychlostí zatěžování a počítačovým zpracování dat ze zkoušky. Další informace a technické parametry jsou uvedeny v příloze 5. Jako první byla provedena zkouška vzorku bez svarového spoje pro ověření mechanických vlastností výchozího materiálu. Mechanické vlastnosti materiálu X5CrNi 18-10 jsou dle materiálového listu uvedeny v tabulce 13.

Tabulka 13 Základní mechanické vlastnosti [12]

Korozivzdorná ocel X5CrNi 18-10		
Mez kluzu $R_{p0,2}$	295	[MPa]
Mez pevnosti $R_m$	490-686	[MPa]
Tažnost $A_{80}$	51	[%]

Díky velkému rozptylu hodnot meze pevnosti byla pro upřesnění provedena zkouška tahem. Z plechu byly vyřezány 3 vzorky dle rozměrů z kapitoly 3.7. Ještě před přetrhnutím každé tyče byla změřena její šířka v měřené části pro zajištění korektnosti výsledků. Rychlost zatěžování byla  $10 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ . Po následném přetržení na zkušební stroji byla určena tažnost materiálu. V tomto případě byla délka měřené části 80 mm, proto je potřeba uvést tažnost s označením  $A_{80}$ .

V průběhu zkoušky byla měřena závislost zatěžující síly na prodloužení. Z naměřených hodnot je nejjednodušší vykreslení závislosti napětí na dráze příčnicku. Grafické znázornění této závislosti je na obr. 37. Z tahové křivky lze obecně odečíst mez kluzu, která je buď výrazná a patrná přímo z diagramu, nebo je nutné zavést smluvní mez kluzu „ $R_{p0,2}$ “. Tu je možné zjistit sestavením rovnoběžky s částí grafu, kde je platný Hookův zákon vzdálenou 0,2 % z původní délky zkušebního tělesa. To by platilo i pro toto vyhodnocení, ale trhací zařízení je propojeno s počítačem, kde pomocí programu je přímo odečtena smluvní mez kluzu, mez pevnosti i tažnost. Výsledky jednotlivých vzorků a jejich průměrné hodnoty společně s odchylkou jsou uvedeny v tabulce 14. Hodnoty mezi kluzu nabývaly velkého rozptylu, to bylo způsobeno proklouznutím některých vzorků v čelistech trhacího stroje (obr. 38). Pro posouzení vhodnosti parametrů však mez kluzu není rozhodující, proto v tabulce není uvedena.



Obr. 37 Grafický výstup tahové zkoušky prvního vzorku

Tabulka 14 Výsledky tahové zkoušky základního materiálu

Číslo vzorku	$R_m$ [MPa]	$F_{max}$ [N]	$A_{80}$ [%]
1	639,5	23 392	55,6
2	634,8	23 803,6	53,75
3	633,8	23 690,4	53,75
<b>Průměr</b>	<b>637,4±30</b>	<b>23 628,6</b>	<b>54,4</b>



Kvůli rozptýlu hodnot u meze pevnosti byla zavedena odchylka. Výsledné hodnoty budou sloužit jako výchozí mechanické vlastnosti pro porovnání se svařovanými vzorky. Během optimalizace svařovacích parametrů budou jednotlivé vzorky vyhodnocovány pomocí vizuální zkoušky, příčné zkoušky tahem a na závěr metalografickému zkoumání a technickoekonomickému zhodnocení.



Obr. 38 Vzorek po tahové zkoušce základního materiálu

Po ověření vlastností následovala tahová zkouška svařovaných vzorků. Meze pevnosti  $R_m$ , maximální síly  $F_{max}$  a tažnosti  $A_{80}$  pro každý ze vzorků, jsou uvedeny v tabulce 15.

Tabulka 15 Výsledky tahové zkoušky vzorků

Číslo vzorku	Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	Maximální síla $F_{max}$ [N]	Tažnost $A_{80}$ [%]
1	633,3	23 438,5	32,9
2	594,4	22 006	28,3
3	566,7	20 921,3	25,4
4	540,6	19 984	21,3
5	605,1	22 354	33,3
6	651,5	24 093,7	36,7
7	635,9	23 501,3	32,5
8	656,2	24 262,9	45,4
9	657,3	24 275,5	44

Mez pevnosti prvního vzorku leží ve stanovené odchylce, u vzorku ale došlo k porušení ve svarovém kovu. Vzorky 2, 3 a 4 vykazují citelný pokles meze pevnosti a tažnosti, všechny byly porušeny ve svarovém kovu. Pro vzorek číslo 6 byla hraniční hodnota pro porušení materiálu naměřena vyšší, ovšem i tento vzorek společně se sedmým pokusem neobstál tahovou zkouškou. Došlo k porušení ve svarovém kovu. Tvar vzorku po zkoušce a viditelné proklouznutí v čelistech je na obrázku 39.



Obr. 39 Vzorek č. 6 po tahové zkoušce

Z uvedených vzorků obstály zkoušku pouze ty s označením 8 a 9, které byly porušeny mimo svar. U nich byl ale průřez v místě svaru skoro dvojnásobný, což může být důvod pro porušení mimo svar. Svařovaný žlab bude po svaření broušen na téměř konstantní tloušťku plechu, je tedy důležité, aby dostatečnou pevnost v tahu vykazoval i po broušení. Z těchto důvodů je nelze okamžitě označit za vhodné a optimální. Těleso vzorku č. 8 i č. 9 po zkoušce tahem je zobrazeno na obrázku 40.



Obr. 40 Vzorky č. 8 a 9 po tahové zkoušce

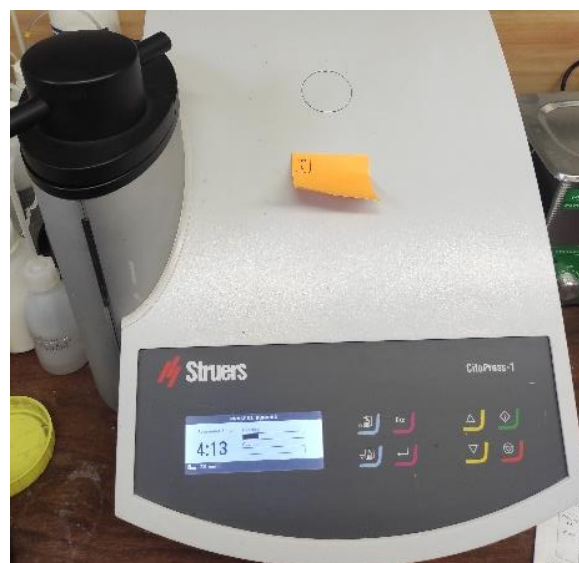
### 5.2.2 Metalografie experimentu A [18]

Metalografické výbrusy byly realizovány na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky dle normy ČSN EN ISO 17639. V první fázi bylo potřeba vyříznout ze vzorku část svaru, která má být podrobena kontrole makrostruktury. Vyřezání materiálu na požadovaný rozměr a tvar bylo realizováno pomocí kotouče na speciální přesné pile Struers Secotom-60 (obr. 41a). Důležitým faktorem během řezání je použití intenzivního chlazení, aby bylo zamezeno tepelnému ovlivnění materiálu. Po očištění od rezné kapaliny a odmaštění byly výsledné vzorky zalisovány do pryskyřice. To probíhalo pomocí automatického lisu (obr. 41b), a to z důvodu lepší manipulace.

a)



b)



a) laboratorní pila Struers Secotom-60, b) automatický lis Struers CitoPress-1

Obr. 41 Zařízení pro přípravu metalografických výbrusů

Následovaly operace broušení a leštění. Vzorky byly umístěny do přístroje Struers Tegramin-20 (obr. 42), což je jednokotoučová bruska/leštička. A následně do něho byl upnut SiC brusný kotouč a byl spuštěn proces broušení. Pro tepelné neovlivnění materiálu byly vzorky v celém průběhu procesu chlazeny procesní kapalinou. V další operaci byly vzorky leštěny diamantovou pastou s velikostí zrna 1  $\mu\text{m}$  pomocí textilního kotouče. Po absolvování těchto operací by už vzorky mohly být vloženy pod mikroskop s následným vyhodnocením. Ale pro lepší viditelnost struktury bylo ještě provedeno leptání povrchu. Leptalo se po dobu 3 sekund modifikovaným leptadlem Marble, které je složeno z 20 g síranu měďnatého (modrá skalice), 50 ml kyseliny sírové, 100 ml kyseliny chlorovodíkové a 100 ml vody. Následně došlo k opláchnutí vodou a methanolem. Touto operací je proces přípravy vzorků dokončen a lze přejít k vyhodnocení makrostruktury.



Obr. 42 Bruska/leštička Tegramin-20

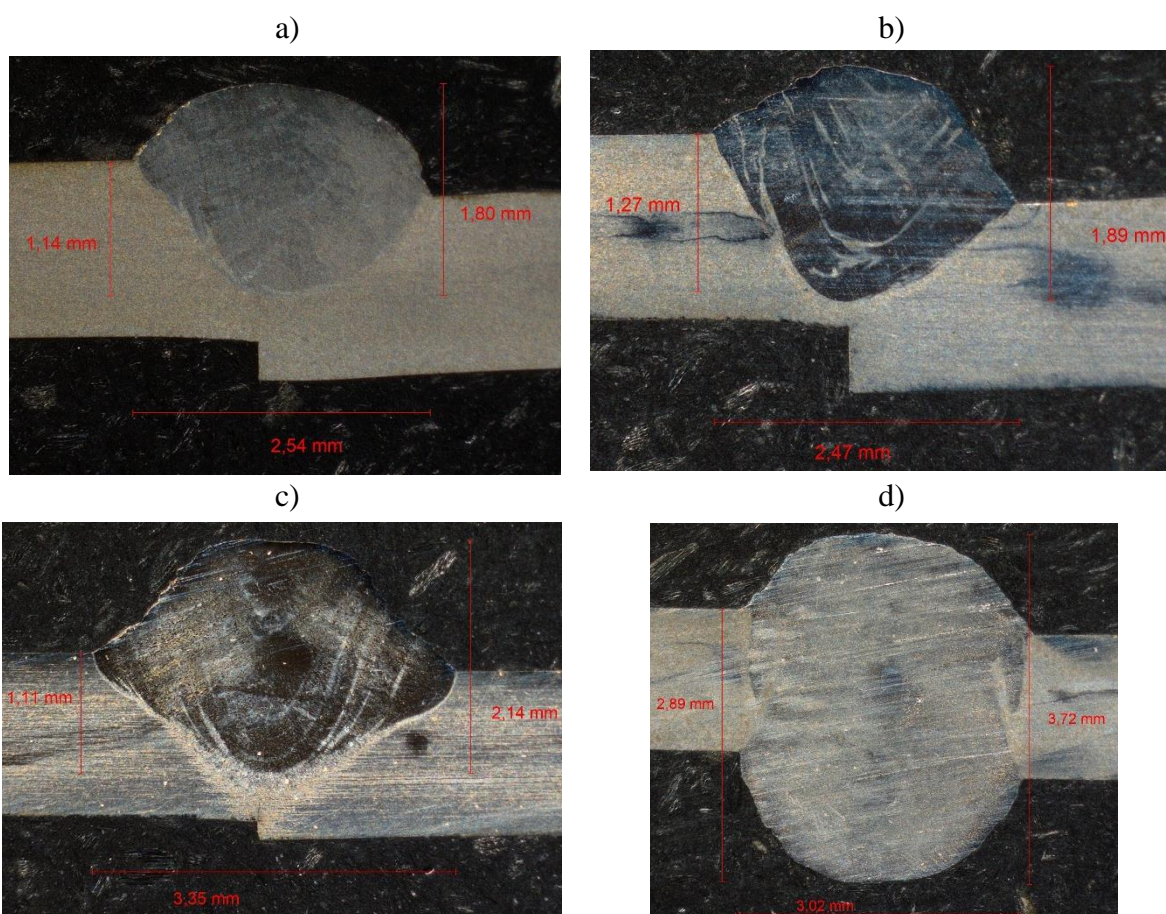
Snímky pro vyhodnocení makrostruktury byly pořízeny pomocí stereomikroskopu Olympus SZ61 (obr. 43) a zpracovány v programu Olympus Stream. Měřena byla vždy šířka svaru, jeho výška bez převýšení, a nakonec i celková výška včetně převýšení svaru. Na snímcích je tedy vždy na levé straně zobrazena kóta měřící hloubku průvaru od vrchní plochy plechu a na pravé straně celková výška svarového kovu (včetně převýšení svaru). Austenitická korozivzdorná ocel X5CrNi 18-10 má velmi špatnou tepelnou vodivost, proto u tohoto materiálu nelze najít tepelně ovlivněnou oblast.

Výstupem z kontroly makrostruktury bylo posouzení velikosti svaru, přítomnost svarových vad, tvar svaru a propad či převýšení lící strany a kořene svaru.

Obr. 44 zobrazuje makroskopické snímky některých vzorků. Na obrázku 44a je vzorek č. 2, převýšení svaru je přibližně 0,7 mm, což je dostačující pro následné broušení, ale je zde zřejmé neprovaření po celé tloušťce plechu, díky čemuž při tahové zkoušce došlo k porušení ve svarovém kovu. Stejný problém nastává i pro vzorky č. 4 a 7 (obr. 44b, obr. 44c).



Obr. 43 Stereomikroskop



a) vzorek č. 2, b) vzorek č. 4, c) vzorek č. 7, d) vzorek č. 9

Obr. 44 Makroskopické snímky vybraných vzorků

Dle kapitoly 5.2.1 vydržely tahovou zkoušku pouze vzorky 8 a 9, č. 9 je znázorněn na obr. 44d. Zde je převýšení svaru dostatečné a vhodné pro následné broušení. Z tvaru svaru je ale zřejmé, že rychlost svařování byla v porovnání s rychlostí podávání drátu „zbytečně“ malá. Kořen svaru je zde propadlý a celková výška je přibližně 3,7 mm, což je více jak dvojnásobek tloušťky výchozího materiálu.

Výsledky makrostruktury z prvního svařovacího experimentu nejsou optimální a nelze s jistotou označit svařovací parametry jednoho ze vzorků jako vhodné pro svařování pohledové plochy žlabu. Společně s výsledky z příčné zkoušky tahem, které určili jako vhodné pouze dva vzorky z devíti, bylo rozhodnuto o provedení ještě jednoho experimentu.

### 5.3 Experimentální část B

Pro přesnější a relevantnější posouzení vlivu svařovacích parametrů na kvalitu svarového spoje byl proveden druhý experiment. Parametry pro druhý experiment byly voleny podobně jako pro vzorky s označením 8 a 9 z předešlého pokusu, které jako jediné prokázaly jistou vhodnost použití.

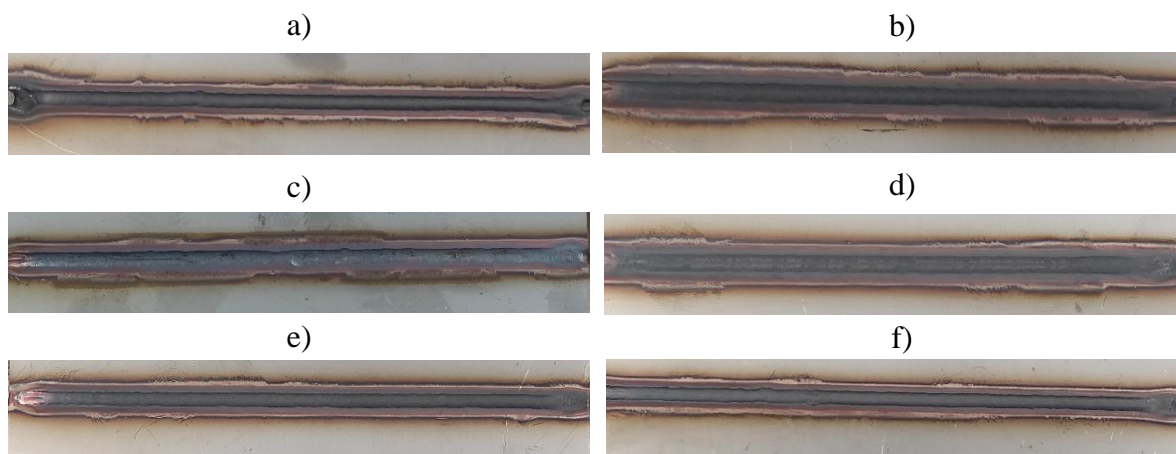
Na začátku experimentu byly vytvořeny dva vzorky se stejnými parametry jako vzorky 8 a 9 z předchozího pokusu. Důvod byl jednoznačný, a to ověření pevnosti svaru i po obroušení na téměř konstantní průřez plechu. Pro další vzorky zůstala neměnná velikost výkonu laseru i úhel odklonu drátu vůči základnímu materiálu. Z poznatků z předchozího experimentu bylo rozhodnuto pro všechny vzorky použít maximálního výkonu laseru, a to 2500 W. Proměnnými parametry byly pouze velikost rychlosti svařování a velikost rychlosti podávání přídatného drátu. Celkem bylo vytvořeno 6 nových vzorků, které jsou společně s použitými procesními parametry uvedeny v tab. 16. Pro lepší rozlišení s prvním experimentem je za číslem vzorku uvedeno písmeno ‘B’.

Tabulka 16 Svařovací parametry druhého experimentu

Číslo vzorku	Výkon laseru [W]	Svařovací rychlost [mm.s <sup>-1</sup> ]	Rychlost podávání drátu [m.min <sup>-1</sup> ]	Úhel natočení hlavy [°]
1B	2500	8	2,4	70
2B	2500	6	2,4	70
3B	2500	8	2	70
4B	2500	6	2	70
5B	2500	8	2	70
6B	2500	10	2	70

V tabulce jsou uvedeny dva vzorky se stejnými proměnnými. Rozdíl mezi nimi je ve vzdálenosti plechů. Pro téměř všechny vzorky nebyla vytvořena mezera, kromě vzorku číslo 3B. Ten je vytvořen tak, že svařované plechy byly ustaveny a nabodovány s předem definovanou vzdáleností mezi nimi, a to přibližně 0,5 mm. Důvod vzniku této mezery je pro ověření stability procesu a vytvoření kvalitního svarového spoje i pro žlaby, které vlivem možné nepřesnosti z předchozí operace ve výrobě (ohraňování), mohou tuto mezeru obsahovat.

Vzhled jednotlivých svarových spojů je zobrazen na obrázku 45.



a) vzorek 1B, b) vzorek 2B, c) vzorek 3B, d) vzorek 4B, e) vzorek 5B, f) vzorek 6B

Obr. 45 Vzhled svarových spojů

### 5.3.1 Tahová zkouška experimentu B

Stejně jako v prvním experimentu následovala tahová zkouška pro ověření mechanických vlastností svarových spojů. Výsledky jsou uvedeny v tabulce 17.

Tabulka 17 Mechanické vlastnosti svarů pro experiment B

Číslo vzorku	Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	Maximální síla $F_{max}$ [N]	Tažnost $A_{80}$ [%]
1B	634,1	23 524,4	44
2B	652,3	24 166,9	39,4
3B	633,8	23 546,4	35,4
4B	634,6	23 577,7	33,8
5B	629,9	23 370,7	34,4
6B	634,6	23 511,9	43,3

Druhý experiment byl realizován z jiné dodávky materiálu než první. Naměřené hodnoty se tak mohou v porovnání s výsledky z prvního experimentu lehce lišit. Drobný rozdíl je však kompenzován zavedenou odchylkou. Listy obsahující chemické složení a přibližné mechanické vlastnosti pro každý z experimentů jsou vloženy v příloze 3 a 6.

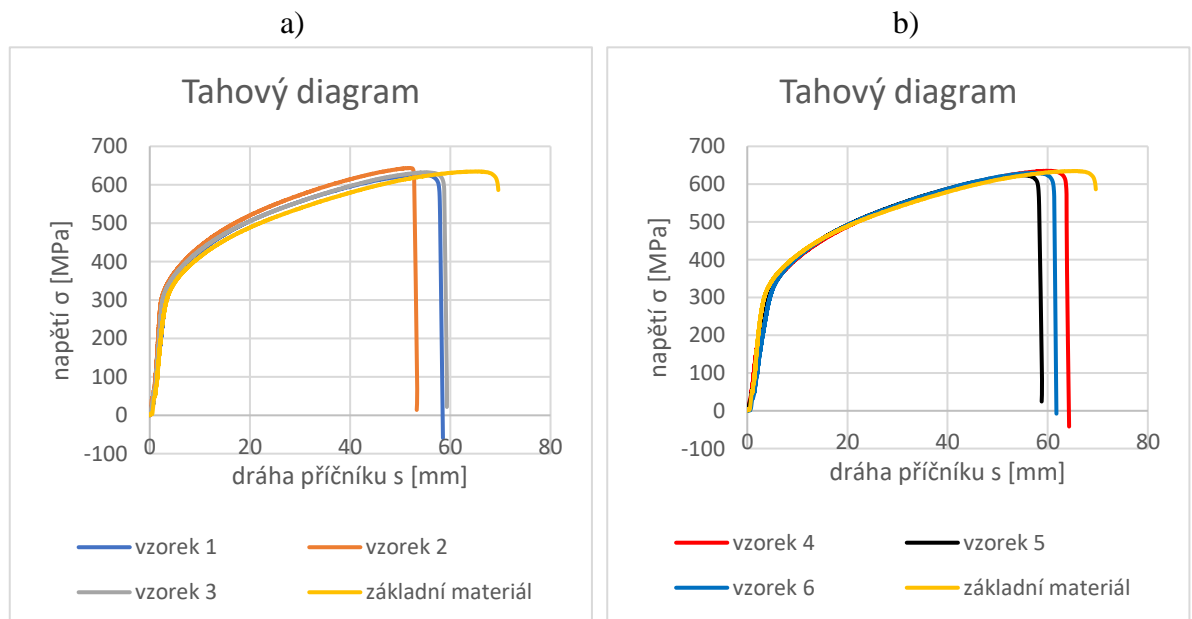
První dva vzorky byly před samotnou tahovou zkouškou zbroušeny na téměř konstantní tloušťku materiálu. K porušení obou vzorků došlo mimo svarový kov. Naměřené smluvní meze kluzu a meze pevnosti leží v intervalu odchylky, která byla na začátku stanovena. Vzorky po tahové zkoušce jsou uvedeny na obr. 46.



Obr. 46 Vzorky č. 1B a 2B po tahové zkoušce

Následně byly ostatní plechy bez jakékoliv další úpravy upnuty do trhacího stroje a byla provedena příčná zkouška tahem. Došlo k porušení všech vzorků mimo svarový kov, což zvyšuje vhodnost použití všech svařovacích parametrů z pohledu mechanických vlastností. Nejvyšší tažnost vykazuje vzorek číslo 1B s naměřenou hodnotou 44 % (výchozí stav je přibližně 54,4 %).

Obr. 47 zobrazuje závislosti napětí na dráze, kterou urazil upínací příčník. Tahové diagramy jsou pro lepší přehlednost rozděleny do dvou tak, že první obsahuje vzorky 1B až 3B a druhý 4B až 6B, přičemž oba diagramy jsou doplněny o data z tahové zkoušky základního materiálu. Z obou grafů je zřejmé, že jednotlivé hodnoty napětí se výrazně neliší od výchozího materiálu a jsou tedy srovnatelné. Na obr. 47b je viditelné zmíněné proklouznutí v čelistech trhacího stroje. Příčník zde pro vzorek č. 4B urazil větší vzdálenost než č. 6B, čili by měl mít větší tažnost, ta byla ale vypočtena lépe pro první zmíněný.



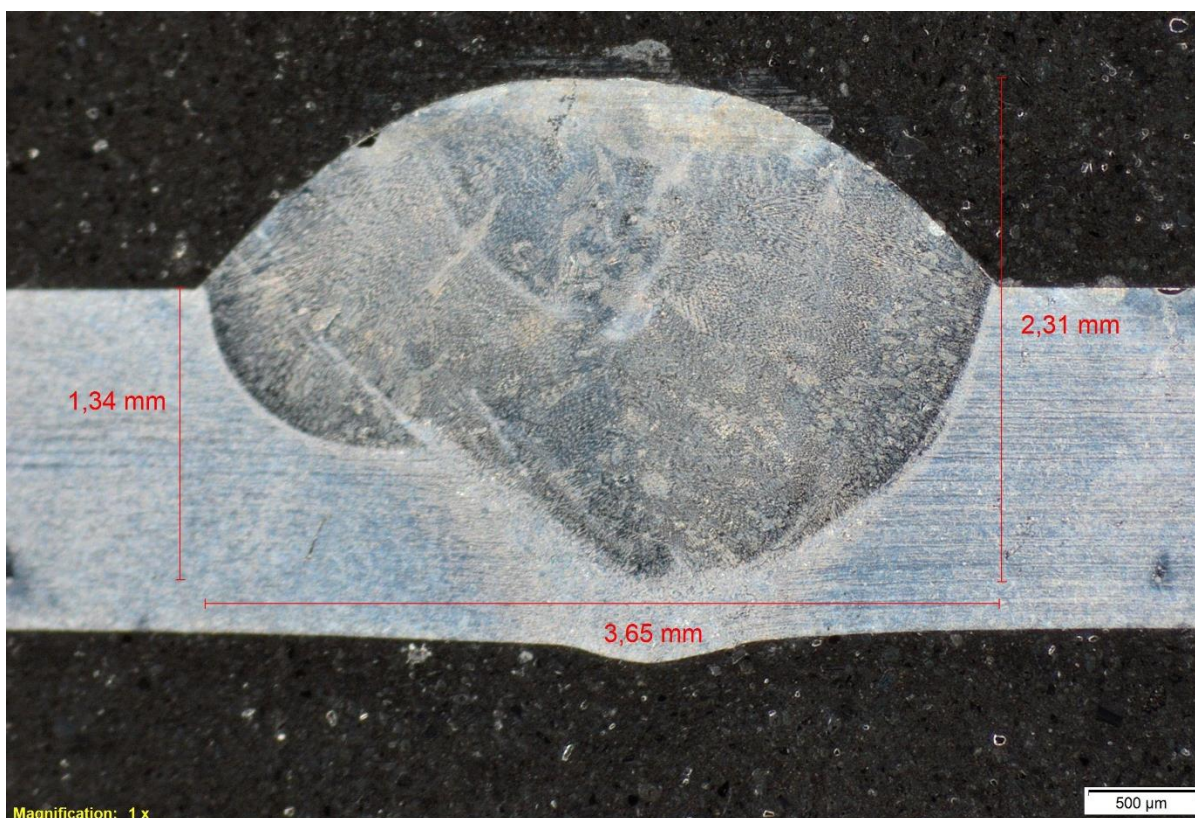
a) Tahový diagram prvních třech vzorků, b) Tahový diagram vzorků 4B, 5B a 6B

Obr. 47 Tahový diagram pro druhý experiment

### 5.3.2 Makroskopie experimentu B

Pro vyhodnocení makrostruktury bylo znovu nutné projít procesem přípravy metalografie. Vzorky byly připraveny za stejných podmínek a stejnými operacemi jako v prvním experimentu. Vyleštěné vzorky byly vloženy do přípravku a pomocí stereomikroskopu Olympus SZ61 byly vytvořeny snímky. Měřena byla opět šířka svaru, hloubka průvaru a celková výška včetně převýšení svaru.

Na obr. 48 je uveden makroskopický snímek vzorku č. 1B. Celková šířka svaru je v horní části 3,65 mm a s postupem do materiálu se zužuje. Svar je téměř symetrický s dobrým převýšením nad základním materiálem ale s neúplným provařením kořene. Převýšení je vhodné po celé délce svaru. Hloubka svaru měřená od vrchní plochy je 1,34 mm a celková výška svarového kovu činí 2,31 mm. Hranice mezi svarovým kovem a základním materiálem jsou velice dobře viditelné, tepelně ovlivněná oblast se zde vůbec nevyskytuje. Na snímku nejsou viditelné žádné ze svarových vad a také zde není znatelné zhrubnutí zrna.



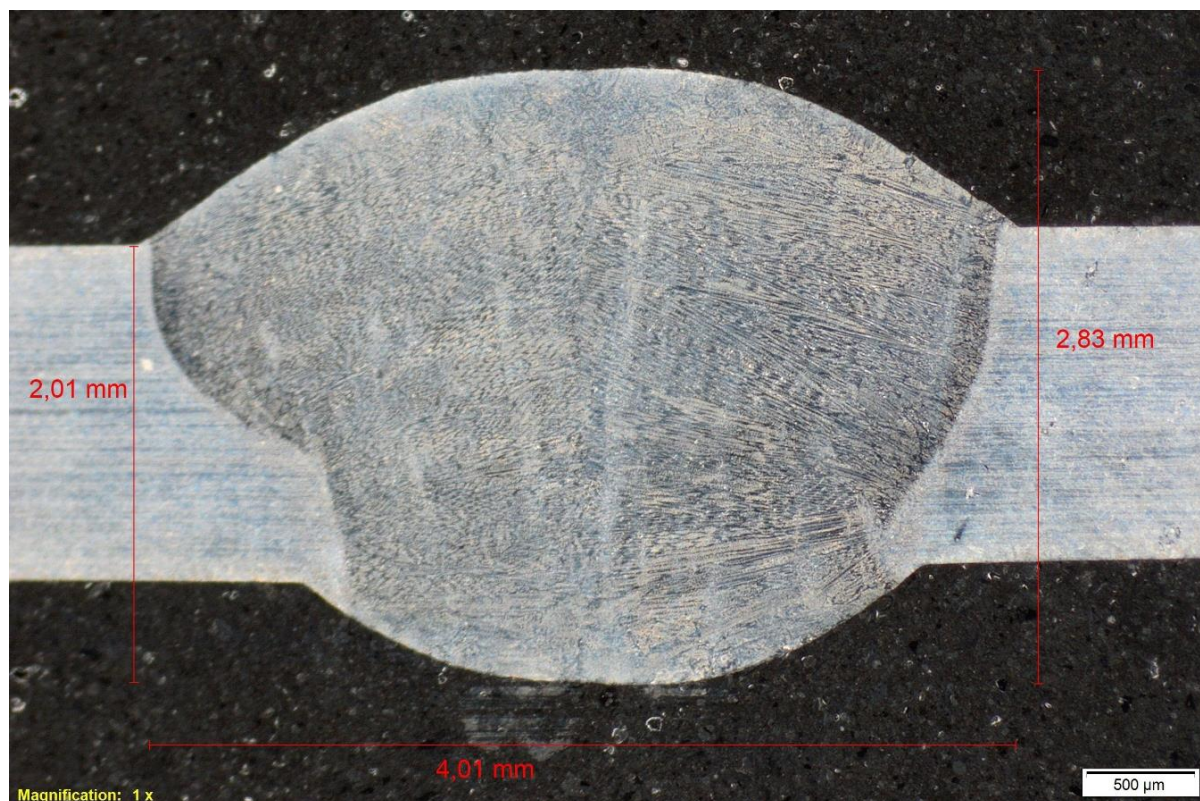
Obr. 48 Makroskopický snímek vzorku č. 1B

Šířka svarového kovu se u vzorku č. 2B zvětšila na 4,01 mm. Je to způsobeno snížením rychlosti svařování a díky tomu k dodání většího množství vneseného tepla. Svařovací rychlost pro druhý vzorek byla  $6 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Jak je ale viditelné ze snímků makrostruktury, zvětšení šířky svaru není tak významné, jako hloubka průvaru a celková výška svarového kovu. Pro tento vzorek je kořen převýšený a výška svaru od vrchní plochy plechu je 2,01 mm. Celková výška včetně převýšení je 2,83 mm.

Svar je symetrického charakteru s postupným zužováním směrem do materiálu. Největší šířka je v lícni rovině vzorku. Převýšení je dostatečné a není zaznamenáno žádné propadnutí po celé délce svaru. Hranice mezi svarovým kovem a základním materiálem je velice dobře



viditelná. Ani v tomto vzorku se nevyskytují žádné ze svarových vad a není patrné zhrubnutí zrna. Makroskopický snímek vzorku číslo 2B je na obrázku 49.



Obr. 49 Makroskopický snímek vzorku č. 2B

Pro vzorek číslo 3B byla uměle vytvořena mezera mezi svařovanými plechy pro ověření stability procesu při nepřesné předchozí výrobní operaci, a to přibližně 0,5 mm. Rychlost svařování byla stejná jako pro první vzorek  $8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Celková šířka svarového kovu je 3,67 mm, což přibližně odpovídá šířce svarového kovu u prvního vzorku, který se svařoval stejnou rychlostí. Díky snížení rychlosti podávání přídavného drátu a zároveň díky mezeře mezi svařovanými plechy došlo k lepšímu provaření celé tloušťky materiálu. Svar má dobré převýšení v jeho vrchní části. Převýšení v oblasti kořene není striktně vyžadováno a je tak dostatečné. Výška svaru, měřená od vrchní plochy základního materiálu až po nejnižší bod převýšeného kořene, je 1,73 mm, což při tloušťce plechu 1,5 mm odpovídá převýšení kořene o hodnotě přibližně 0,2 mm. Celková výška svarového kovu, včetně návaru na lícni ploše svaru, je 2,32 mm.

Svarový spoj není vlivem mezery úplně symetrický, nicméně má největší šířku na vrchní ploše a odtud se postupně zužuje směrem do materiálu. Hranice mezi základním materiálem a svarovým kovem je dobře viditelná a není patrný vznik tepelně ovlivněné oblasti. Stejně tak opět nedošlo k výraznému zhrubnutí zrn. V horní části svaru by se mohla vyskytovat svarová vada v podobě póru. Rozměr póru by byl nevyhovující, pokud by svými rozměry překročil mezní hodnoty stanovené normou ČSN EN ISO 13919-1. V tomto místě však není hrozbou, protože tato oblast bude další operací odstraněna. Snímek ze zkoumání makrostruktury je na obr. 50.



Obr. 50 Makroskopický snímek vzorku č. 3B

Na obrázku 51 je snímek z pozorování makrostruktury čtvrtého vzorku. Pro ten byla snížena rychlost podávání přídavného drátu na  $2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$  při rychlosti svařování  $6 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Menší svařovací rychlostí je zapříčiněno roztažení svarového spoje a jeho šířka tedy činí 4,15 mm. Díky menšímu množství přidaného drátu není výška převýšení tak velká jako v předchozích dvou případech. Kořen je provařený a taktéž vystouplý jako jeho lící část. Výška svaru od vrchní plochy po spodní cíp je 2,03 mm, celková, zahrnující i převýšení svarového spoje, potom činí 2,54 mm.

Svar není úplně symetrický a je lehce vypouklý na pravé straně. Největší šířka je na lící straně svaru, odtud dochází k zužování až ke kořeni, kde je svar nejužší. Hranice přechodu ze svarového kovu do základního materiálu je opět velice dobře rozeznatelná a ani v tomto případě není viditelná tepelně ovlivněná oblast. Zhrubnutí zrna není patrné a nejsou přítomny žádné svarové vady. Převýšení svaru na lící straně je dostatečné, jeho výška je 0,51 mm. Po celé délce svaru je návar dostatečný bez lokálních propadů.

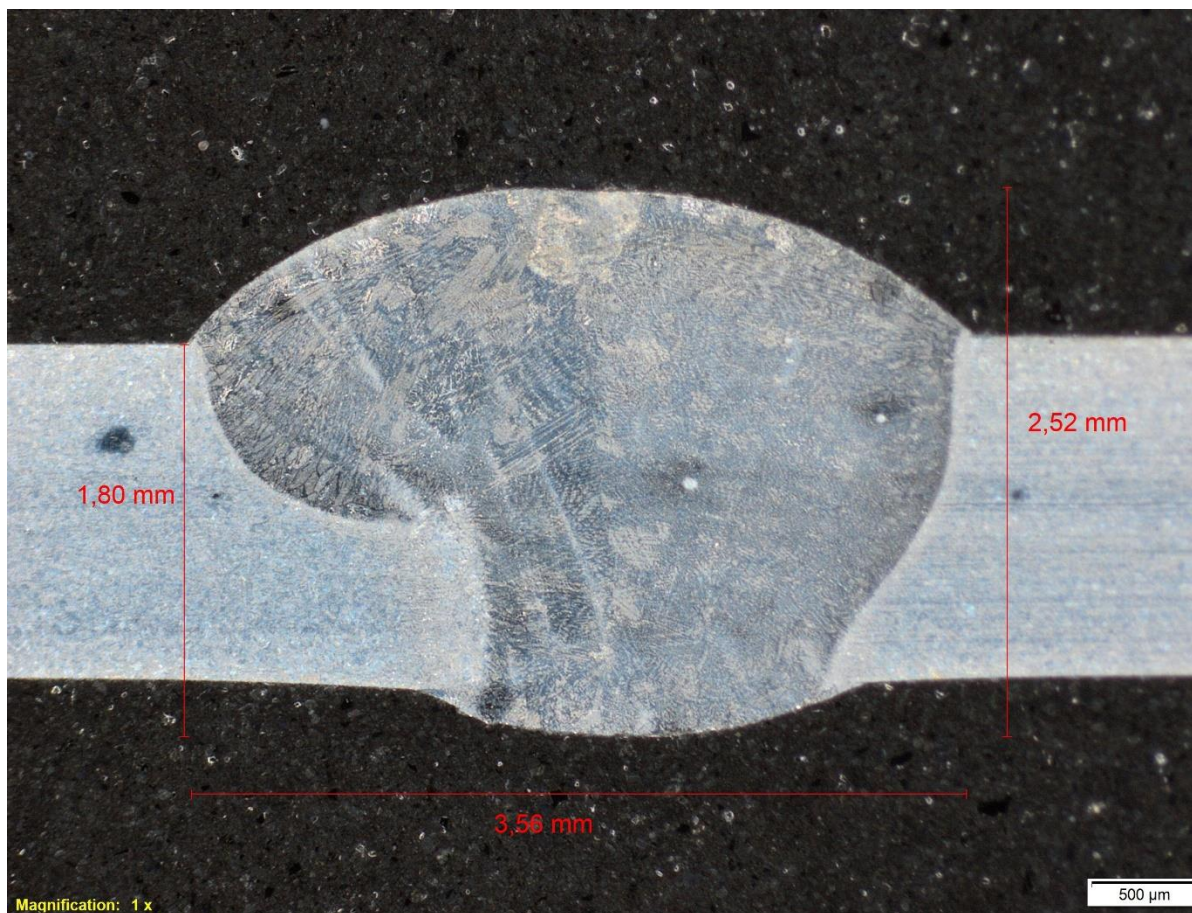


Obr. 51 Makroskopický snímek vzorku č. 4B

Vzorek číslo 5B se svařoval téměř totožnými parametry jako první z tohoto experimentu. Změnou bylo snížení rychlosti podávání drátu na  $2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ . Změna byla provedena, protože pro vzorek č. 1 bylo po vizuální kontrole převýšení vyhodnoceno jako dost velké, až zbytečné. Snížením se tedy ověřuje dostatečný „návar“ na vyráběném žlabu. Šířka svarového spoje je 3,56 mm, ten je nejširší v horním místě, kde je základní materiál v kontaktu se svarem. Odtud se zužuje směrem do materiálu.

I tento vzorek měl kořen dostatečně provařený, ale jeho šířka je v porovnání se šířkou celého svaru téměř poloviční. Celková výška svarového spoje je 2,52 mm, přičemž převýšení kořene je, při tloušťce plechu 1,5 mm, přibližně 0,3 mm. Část svaru, která přesahuje přes základní materiál, je rovna hodnotě přibližně 0,7 mm, což je dostačující převýšení pro následující broušení.

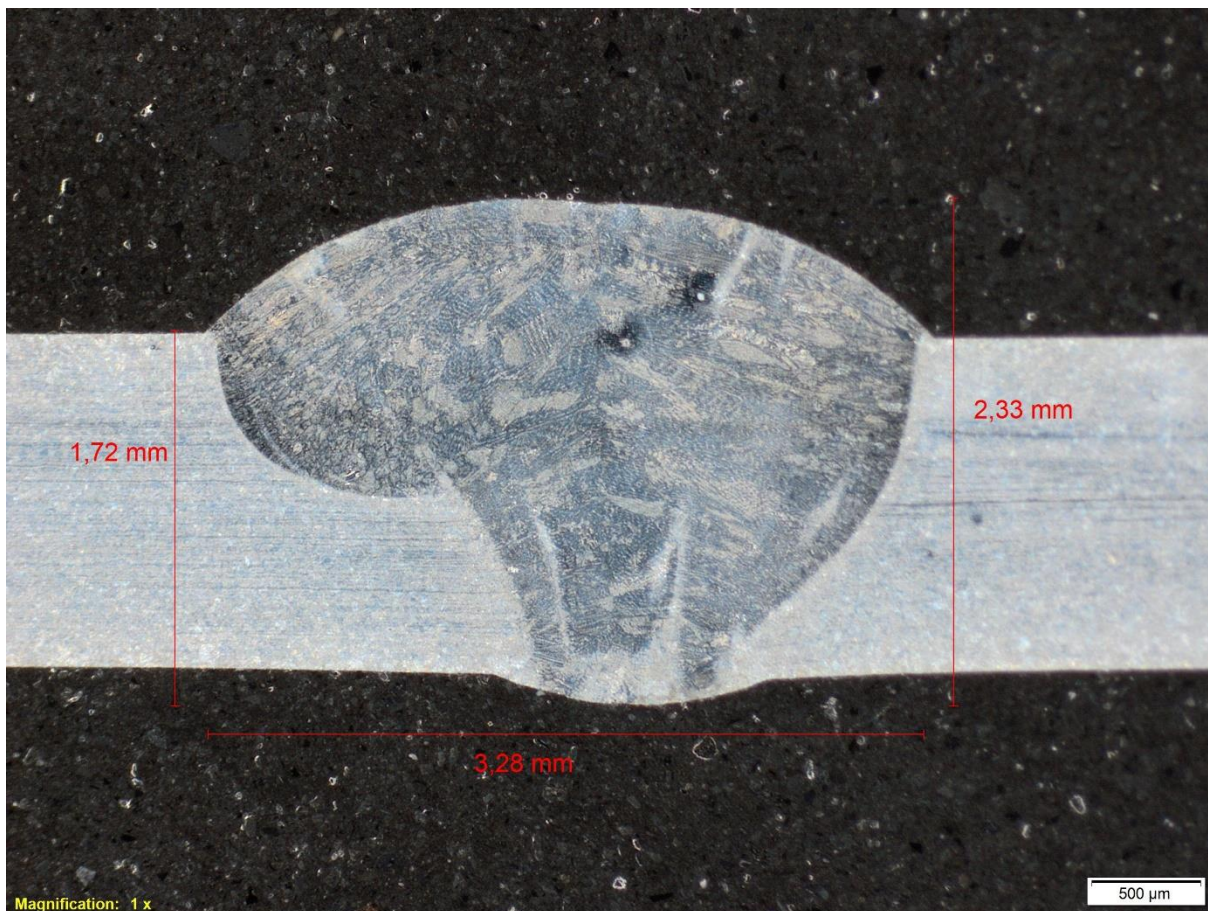
Svar není dokonale symetrický, na levé straně je patrné výraznější zúžení. Hranice mezi svarovým kovem a základním materiálem je dobře viditelná a spoj je bez výrazné tepelně ovlivněné oblasti. Zhrubnutí zrna není evidentní a spoj je bez přítomnosti svarových vad. Makroskopický snímek vzorku číslo 5B je vidět na obrázku 52.



Obr. 52 Makroskopický snímek vzorku č. 5B

Posledním svařovaným vzorkem je číslo 6B. V porovnání s předchozím byla změna pouze v rychlosti svařování, tento se svařoval rychlostí  $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Díky zvýšení svařovací rychlosti je výsledný svar štíhlejší a nižší. Celková šířka je 3,28 mm, kde největší je v horní části svaru, v místě kontaktu se základním materiálem. V kořenové oblasti je svar přibližně třetinové šířky. Výška svaru, měřená od lící plochy základního materiálu po spodní cíp kořenu, je 1,72 mm. Celková výška včetně převýšení vrchní strany i kořenu je 2,33 mm, což znamená lící převýšení přibližně 0,61 mm. To je dostatečně velké po celé délce spoje. Jako ve všech případech je hranice přechodu ze základního materiálu do svarového kovu dobře viditelná. Spoj je bez výrazné tepelně ovlivněné oblasti a nedošlo k výraznému zhrubnutí zrn.

V tomto svarovém spoji se vyskytuje vada v podobě póru, a to ve svarovém kovu. Jsou viditelné 2 póry a jejich přípustnost je nutné určit dle normy ČSN EN ISO 13919-1. Rozměry póru by byly nevyhovující, pokud by byly překročeny mezní hodnoty stanovené normou. V této normě je pro nejpřísnější stupeň jakosti uvedeno, že největší rozměr póru musí být menší než 0,3 násobek tloušťky. Plech má tloušťku 1,5 mm, takže mezní hodnota je 0,45 mm. Na vzorku byla změřena jako největší hodnota vzdálenost přibližně 0,25 mm, což je menší než mezní hodnota a rozměr dutin je tak vyhovující. Makroskopický snímek vzorku číslo 6B je zobrazen na obr. 53.



Obr. 53 Makroskopický snímek vzorku č. 6B

V tabulce 18 jsou přehledně shrnuty vlastnosti zjištěné z makroskopie. Nejvhodnější vzorky z pohledu makroskopie jsou zeleně zvýrazněny.

Tabulka 18 Shrnutí výsledků ze zkoumání makroskopie

Číslo vzorku	Celk. šířka svaru [mm]	Celk. výška svaru [mm]	Převýšení pro broušení [mm]	Póry
<b>1B</b>	<b>3,65</b>	<b>2,31</b>	<b>1,27</b>	<b>Ne</b>
2B	4,01	2,83	0,82	Ne
3B	3,67	2,32	0,59	Ano (malé rozměry)
4B	4,15	2,54	0,51	Ne
<b>5B</b>	<b>3,56</b>	<b>2,52</b>	<b>0,72</b>	<b>Ne</b>
<b>6B</b>	<b>3,28</b>	<b>2,33</b>	<b>0,61</b>	<b>Ano (malé rozměry)</b>

### 5.3.3 Mikrostruktura vybraných svarů z experimentů série B [92]

Na ÚPT AV ČR byly vytvořeny mikroskopické snímky, použité zvětšení pomocí objektivů bylo 20x, 50x a 150x. Rozhodujícím faktorem je vždy měřítko, které je uvedené v pravém spodním rohu. Snímky byly pořízeny z oblasti svaru, přechodu ze svarového kovu do základního materiálu a ze základního materiálu. Příprava vzorků probíhá obdobně jako pro zkoumání makrostruktury. V první fázi jsou broušeny na SiC papíře se zrnitostí 120 dále 240 a nakonec 500. Následuje leštění diamantovou pastou s velikostí částic 9 μm, 3 μm a na závěr 1 μm. Poslední operací před samotným pozorováním a tvorbou snímků mikrostruktury je leptání. Leptalo se směsí Vilella-Bain a to po dobu 15 sekund.

Před snímáním byla ještě dle Schäfflerova diagramu odhadnuta struktura. Pro určení fází, které by se ve struktuře mohli vyskytovat, je nutné určit niklový a chromový ekvivalent. Ty jsou určeny dle chemického složení, které je uvedené v atestu. Pro dané typy ocelí existuje několik typů výpočtů ekvivalentů, kde každý dává rozdílné výsledky. Niklový ekvivalent je počítán podle vzorce (5.1)

$$Ni_e = \% Ni + 30 \cdot \% C + 0,5 \cdot \% Mn = 8,03 + 30 \cdot 0,025 + 0,5 \cdot 1,4 = 9,48. \quad (5.1)$$

Pro vynesení bodu v diagramu je nutné spočítat ještě ekvivalent chromu. Ten je definován podle vzorce (5.2)

$$Cr_e = \% Cr + \% Mo + 1,5 \cdot \% Si + 0,5 \cdot \% Nb = 18,12 + 1,5 \cdot 0,38 = 18,69. \quad (5.2)$$

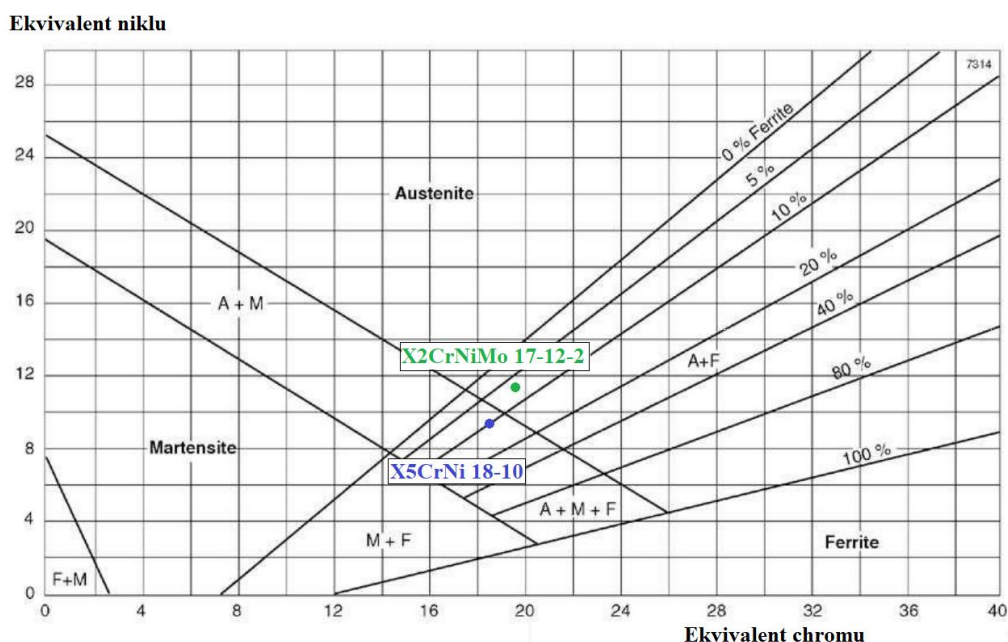
Kromě působení laserového svazku je do procesu přiváděn i přídavný materiál ve formě drátu. Chemické složení drátu není totožné s chemickým složením svařovaného materiálu. Proto je nutné určit oba ekvivalenty i pro přídavnou korozivzdornou ocel. Chemické složení je vyňato z atestu. Dosazením do vzorce (5.1) je získán niklový ekvivalent.

$$Ni_e = \% Ni + 30 \cdot \% C + 0,5 \cdot \% Mn = 10 + 30 \cdot 0,024 + 0,5 \cdot 1,29 = 11,365.$$

Obdobně dosazením do vzorce (5.2) je vypočítán ekvivalent chromu.

$$Cr_e = \% Cr + \% Mo + 1,5 \cdot \% Si + 0,5 \cdot \% Nb = 16,68 + 2,09 + 1,5 \cdot 0,51 = 19,535.$$

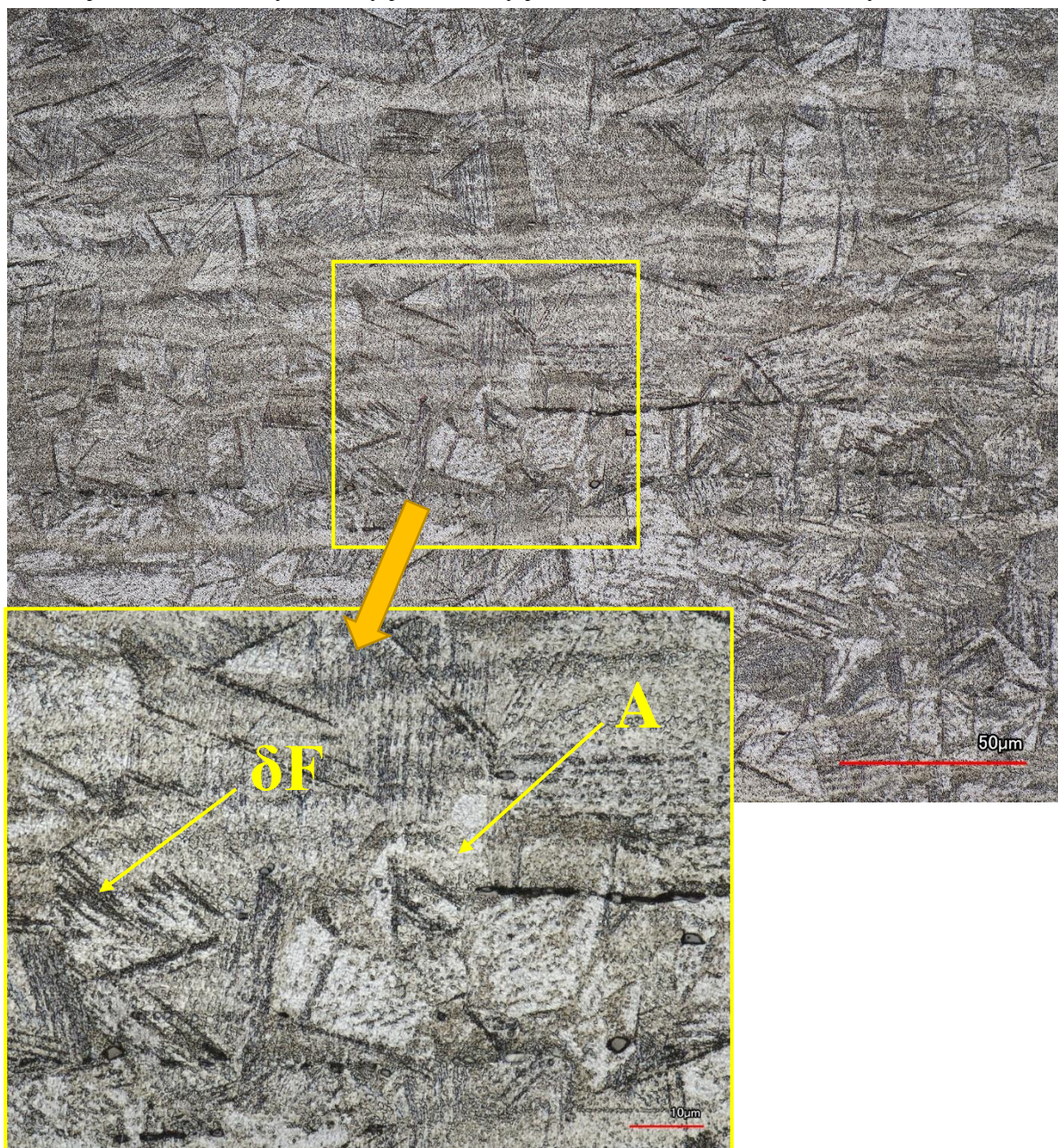
Díky výpočtu všech potřebných hodnot lze do diagramu zaznačit body, které předurčují výslednou strukturu. Diagram společně s oběma body je na obr. 54.



Obr. 54 Schäfflerův diagram [92]

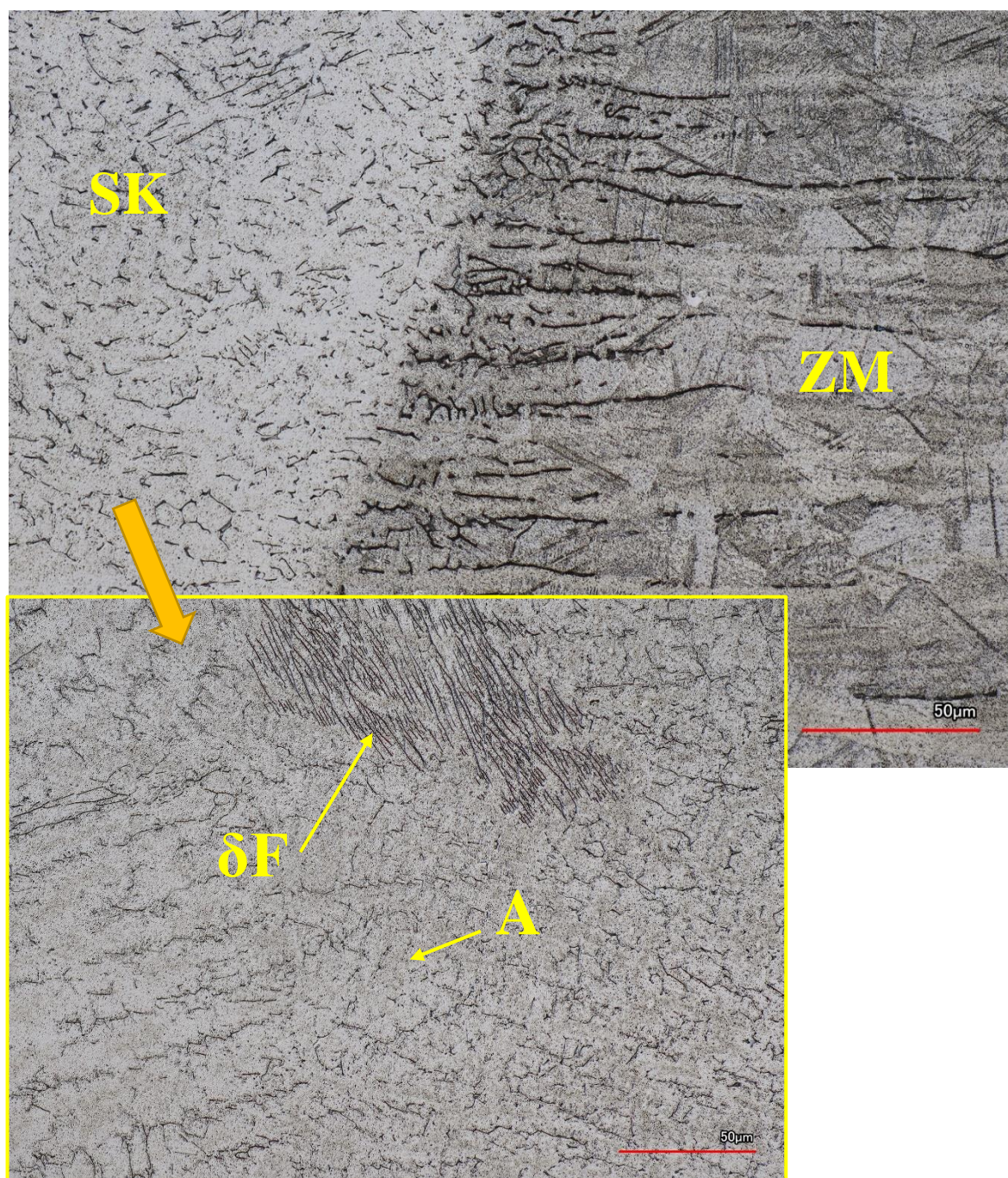
Korozivzdorná ocel X5CrNi 18-10 se dle diagramu nachází v oblasti A+M+F, přítomnost martenzitu je s ohledem na obsah uhlíku nepravděpodobná. Svar je navíc legován ocelí X2CrNiMo 17-12-2, kterou tvoří austenit společně s delta feritem. Výsledná struktura tak bude tvořena austenitem, který bude doplňovat delta ferit.

Obr. 55 zobrazuje mikroskopický snímek základního materiálu X5CrNi 18-10. Použité měřítko pro přibližný snímek je vyznačené v pravém spodním rohu a činí 10  $\mu\text{m}$ . Z obrázku je zřejmé, že struktura základního materiálu je tvořena maticí austenitu. Ta je doplněna delta feritem, který je přítomen ve dvou typech morfologie. Skeletálním, což jsou osamocené krátké „černé“ jehlice, a laťkovým, který je viditelný jako blok rovnoběžných tmavých čar.



Obr. 55 Mikroskopické snímky základního materiálu

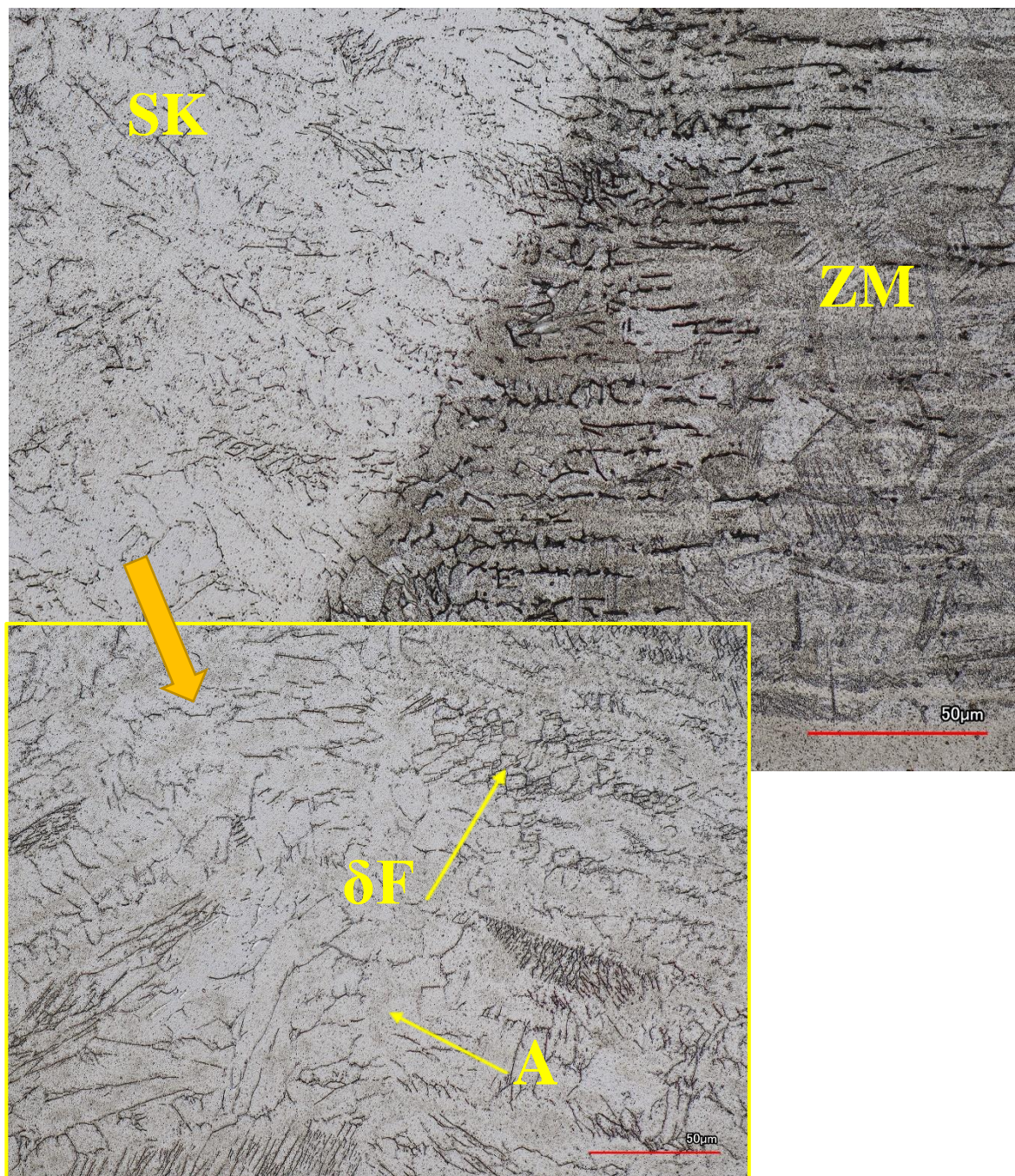
Na obr. 56 je zobrazena mikrostruktura vzorku číslo 5B. Snímek zobrazuje přechod ze základního materiálu do svarového kovu. Hranice přechodu je velice dobře viditelná. Vlivem rychlého ochlazování a malé tepelné vodivosti se při laserovém svařování těchto typů ocelí prakticky netvoří tepelně ovlivněná oblast (TOO). Struktura je tvořena matricí austenitu s doplněním fáze delta feritu. Ve svarovém kovu a v přechodu je viditelné větší množství delta feritu v porovnání s množstvím v základním materiálu. Množství delta feritu se obecně svařováním zvyšuje. Vlivem velké rychlosti ochlazování se tavenina ve větším množství přemění na delta ferit, zbytek je tvořen austenitem. V detailu snímku ze svarového kovu je vidět opět rozdílná morfologie delta feritu, přítomny jsou oba druhy, zbytek je tvořen austenitem.



Obr. 56 Mikroskopické snímky vzorku č. 5B



Mikroskopický snímek vzorku č. 6B (obr. 57) znázorňuje přechod ze základního materiálu do svarového a detail ze svarového kovu. Struktura je tvořena maticí austenitu, která je doplněna o delta ferit. Hranice přechodu základního materiálu do svarového kovu je velice dobře viditelná. Je na ní stejně jako u vzorku č. 5B větší množství delta feritu. Podíl delta feritu a austenitu nebylo možné přesně vyčíslit, protože nebyl k dispozici feritometr na kvantitativní určení % feritu. Vizuálně je ale množství delta feritu v obou vzorcích přibližně stejná.



Obr. 57 Mikroskopické snímky vzorku č. 6B

## 6 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ [9]

Pro ekonomické zhodnocení je důležité znát čas svařování součástí jednotlivými metodami a cenu za hodinu provozu. Porovnávají budou technologie svařování MAG a svařování laserem včetně modifikace přídavného studeného drátu. Jednotlivé parametry jsou uvedeny v tabulce 19.

Tabulka 19 Porovnání metody MAG a laseru [9]

	MAG	Laser
Svařovací čas [s]	30	22,7
Jednotkový čas pracoviště [min]	12	5
Cena za hodinu provozu [Kč]	671,4	998
Pořizovací cena [Kč]	200 000	2 500 000

Na řešeném žlabu je celková délka svaru 354 mm. Pro metodu MAG by to znamenalo 30 s čistého času svařování. Na žlabu ale nejsou pouze rovné kontinuální svary, tvar žlabu je členitý a ve spojení s ručním zakládáním a vedením oblouku je celkový čas pro svařování změřen 12 minut na kus. Čas zahrnuje i ruční manipulaci s výrobkem, jeho otáčení a další drobné práce.

Svařování laserovým svazkem probíhá rozdílnou rychlostí svařování. Části žlabu, které se nesvařují s přídavným drátem jsou svařovány rychlostí  $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Svařování pohledové plochy bylo předmětem práce, ta bude tedy svařována rychlostí  $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ . Čistý svařovací čas tak činí 22,7 s. Celkový čas svařování laserem včetně upínání, přejezdu mezi svary apod. je 5 minut na jeden žlab.

Ekonomický přínos je možno vyjádřit pomocí ceny za hodinu provozu svařovacího zařízení MAG v porovnání s cenou za hodinu provozu laseru. Svařování žlabu metodou MAG trvá 12 minut, díky známé ceně za hodinu provozu lze jednoduchým výpočtem spočítat cenu za svařování, ta činí 134,3 Kč. Laserovým svazkem je součást vyrobena za 5 minut, což při ceně 998 Kč za hodinu provozu, znamená celkově 83,2 Kč za jeden svařovaný žlab. Úspora činí 51,1 Kč na jeden žlab.

Roční produkce je přibližně 5000 kusů, při tomto množství se ročně uspoří 255 500 Kč. Laserové zařízení se nepoužívá pouze pro tento typ výrobků, proto by nebylo nutné počítat návratnost na investici do zařízení. Pokud by se ale stroj používal pouze pro tento typ žlabů byla by návratnost přibližně 9,8 let. V tabulce 20 jsou shrnuty finanční i časové náklady na výrobu 1, 1000 a 5000 kusů žlabů.

Tabulka 20 Finanční a časové náklady pro svařování žlabů

Metoda svařování	Cena za svařování [Kč]			Čas výroby [min.]		
	1 ks	1000 ks	5000 ks	1 ks	1000 ks	5000 ks
MAG	134,3	134 300	671 500	12	12 000	60 000
LASER	83,2	83 200	416 000	5	5000	25 000

## 7 ZÁVĚRY

Řešená součást slouží pro odvod procesních tekutin z podlah komerčních kuchyní. Je vyráběna z austenitické korozivzdorné chrom-niklové oceli X5CrNi 18-10 (1.4301, ČSN 17 240). Žlab je v současné době svařovaný metodou MAG, která ale není vhodná pro tvorbu těchto spojů ať už z hygienických důvodů nebo pro svou časovou náročnost.

Po zvážení jiných možných technologií svařování bylo vybráno laserové svařování s přídavným studeným drátem. Přídavný materiál je z austenitické korozivzdorné chrom-nikl-molybdenové oceli X2CrNiMo 17-12-2. Použití tohoto materiálu má prostý důvod. Žlaby se v menší míře vyrábějí i z tohoto materiálu čili aby se nestalo, že bude ušlechtilější materiál legován méně ušlechtilým. Tato technologie byla vybrána na základě strojního vybavení firmy a vhodnosti zařízení pro danou výrobu.

Vytvořené zkušební svary byly podrobeny svarovým zkouškám. Ze vzorků byly vyřezány tělesa pro příčnou zkoušku tahem a pro metalografii. V prvním experimentu bylo vytvořeno 9 vzorků s různými procesními parametry. Po absolvování svarových zkoušek bylo zjištěno, že určitou vhodnost prokázali pouze poslední dva. Tyto skutečnosti pro vybrání nejvhodnějších parametrů nestačily a bylo tak rozhodnuto o realizování ještě jednoho experimentu.

Parametry procesu druhého experimentu byly voleny podobně jako vyhovující svary z předchozího experimentu. Po vizuální kontrole prvních vzorků bylo zřejmé, že rychlost podávání přídavného drátu byla zbytečně velká. Došlo ke snížení rychlosti podávání na 2 m/min a vytvoření dalších 4 vzorků. Celkem bylo vytvořeno 6 vzorků, pro které následovala příčná zkouška tahem a zkoumání makrostruktury a mikrostruktury.

Posouzením makrostruktury byly zjištěny šířky svarů a jejich výška včetně převýšení nad základní materiál. Vzorek číslo 6B vykázal svarové vady v podobě pórů, ty byly změřeny a posouzeny podle normy ČSN EN ISO 13919-1. Velikost a četnost vad je vyhovující. Na konec bylo provedeno zkoumání mikrostruktury pro vzorky č. 5B a 6B. Struktura je tvořena maticí austenitu s doplněním fáze delta feritu. Podíl jednotlivých složek se pro oba vzorky výrazně nemění.

Na základě provedených mechanických a metalografických zkoušek lze pro svařování daného dílu doporučit parametry uvedené v tabulce 21.

Tabulka 21 Doporučené svařovací parametry

Výkon [W]	Rychlost svařování [mm·s <sup>-1</sup> ]	Rychlost podávání drátu [m·min <sup>-1</sup> ]	Odklon laserové hlavy [°]
2500	10	2	20

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [2]

1. VENC, Jan. *Návrh designu žlabu s ohledem na hygienické požadavky*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116667>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Kamil Podaný.
2. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. 2021 [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>
3. KORÁŇ, Pavel. Využití laseru v průmyslu: Minulost a současnost. *Lasery a optika* [online]. 9.9.2014 [cit. 2021-2-15]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/vyuziti-laseru-v-prumyslu--minulost-a-soucasnost-313>
4. Historie vývoje laseru. *Leonardo technology* [online]. [cit. 2021-2-15]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/historie-vyvoje-laseru>
5. TRUMPF. *Svařování laserovým paprskem* [online]. TRUMPF, 2021 [cit. 2021-2-15]. Dostupné z: [https://www.trumpf.com/cs\\_CZ/reseni/pouziti/svarovani-laserovym-paprskem/?LS=](https://www.trumpf.com/cs_CZ/reseni/pouziti/svarovani-laserovym-paprskem/?LS=)
6. Laserové svařování. *Blumenbecker* [online]. [cit. 2021-2-16]. Dostupné z: <https://www.blumenbecker.com/cz/prumyslova-automatizace/prumyslove-roboty/laserove-svarovani>
7. MRŇA, Libor. *Technologie využívající laser: Svařování laserem* [online]. [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory.html>. Prezentace. Vysoké učení technické
8. ACO Industries k.s. [online]. [cit. 2021-03-10]. Dostupné z: <http://www.aco-industries.cz/home/>
9. Interní dokumenty. Příbyslav: ACO Industries, 2021
10. STANĚK, Vojtěch. *Optimalizace procesu výroby vpusti* [online]. Brno, 2012 [cit. 2021-3-17]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=51781](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=51781). Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce Kamil Podaný.
11. Atest svařované oceli X5CrNi 18-10. Isbergues, Francie, 2021-03-07.
12. X5CrNi 18-10. Korozivzdorná austenitická ocel: ocel 17 240. 2021
13. Svařování TIG - seznámení. *Svářečky-elektrody* [online]. Quick-servis [cit. 2021-3-17]. Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-tig-zakladni-seznameni/t-39/t-120>
14. SVARTOP. *Rozdíl mezi MIG nebo MAG*. [online]. Město Touškov, ©2019 [cit. 2021-03-17]. Dostupné z: <https://www.svartop.cz/clanky/rozdil-mezi-mig-nebomag/>

15. The beauty of TIG. *Canadian Fabrication & Welding* [online]. 2015 [cit. 2021-3-18]. Dostupné z: <https://www.canadianmetalworking.com/canadianfabricatingandwelding/article/welding/the-beauty-of-tig>
16. Sváření plasmou. *Sváření - svářečky* [online]. Euronic, 2013 [cit. 2021-3-18]. Dostupné z: <http://www.svareni.eu/metoda-svareni-plasmou/>
17. VANDERWERT, Terry. Today's laser welding. *Welding productivity* [online]. [cit. 2021-3-18]. Dostupné z: <https://weldingproductivity.com/article/todays-laser-welding/>
18. RÝZNAROVÁ, Martina. *Studium vlivu procesních parametrů na vlastnosti heterogenního svaru martenzitické korozivzdorné oceli s uhlíkovou ocelí při laserovém svařování s rozmítáním svazku* [online]. Brno, 2019 [cit. 2021-3-17]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=193052](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=193052). Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce Libor Mrňa.
19. KOŘÁN, Pavel. Seriál na téma lasery: Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. *Lasery a optika* [online]. 2013, 19.2.2013 [cit. 2021-3-18]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
20. LASCAM SYSTEMS S.R.O. *Rozdělení laserů* [online]. 2015 [cit. 2021-02-08]. Dostupné z: <http://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>
21. ŠULC, Jan. Klasifikace laserů. *Úvod do laserové techniky* [online]. Prezentace [cit. 2021-3-17]. Dostupné z: [https://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/ult/ulat\\_08.pdf](https://people.fjfi.cvut.cz/sulcjan1/ult/ulat_08.pdf)
22. CHMELÍČKOVÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi I.: Pevnolátkové lasery* [online]. Olomouc, 2011 [cit. 2021-3-17]. Dostupné z: [http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/ltp1\\_4prez.pdf](http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/ltp1_4prez.pdf)
23. ŘASA, Jaroslav a Radka JINDROVÁ. Lasery, laserové technologie a stroje slaserem. *Měření ve strojírenství* [online]. 17.7.2006, 2006(7,8) [cit. 2021-4-17]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem>
24. DUŠEK, Jiří. Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. *Mega blog* [online]. 28.2.2013 [cit. 2021-4-17]. Dostupné z: <https://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>
25. MIKEŠ, David. *Svařování hliníkových slitin pomocí vysokovýkonového polovodičového laseru* [online]. BRNO, 2015 [cit. 2021-3-17]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=101766](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=101766). Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce Libor Mrňa.
26. KOŘÁN, Pavel. Průmyslové lasery: svařovací lasery. *Průmyslové spektrum* [online]. 2012, 11.4.2012 [cit. 2021-3-9]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-2-svarovaci-lasery>

27. NOVÁK, Miroslav. Průmyslové lasery: Hlavní typy laserů v průmyslové praxi. *Průmyslové spektrum* [online]. 4.9.2012 [cit. 2021-3-8]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi>
28. ROZSYPAL, Oldřich. *Posouzení vlastností heterogenních tupých svarů metodami svařování laserem a svazkem elektronů* [online]. Brno, 2015 [cit. 2021-4-10]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/40504/final-thesis.pdf?sequence=6&isAllowed=y>. Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce Libor Mrňa.
29. SHKOTOVA, Viktoriia. *Vliv procesních parametrů na drsnost řezu při laserovém dělení korozivzdorné oceli tl. 8 mm* [online]. Brno, 2018 [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/83219/final-thesis.pdf?sequence=6&isAllowed=y>. Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce Libor Mrňa.
30. DOČEKAL, Miroslav. *Měření drsnosti řezných hran při laserovém dělení kovů Yb-YAG laserem* [online]. Brno, 2013 [cit. 2021-5-2]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=64576](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=64576). Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce Libor Mrňa.
31. PODANÝ, Petr. *Porovnání drsnosti řezných hran při dělení materiálu CO<sub>2</sub> a YbYAG laserem* [online]. Brno, 2016 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/61149/final-thesis.pdf?sequence=8&isAllowed=y>. Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce Libor Mrňa.
32. NĚMEČEK, Tomáš. *Svařování jemnozrnných ocelí typu Domex vláknovým YbYAG laserem* [online]. Brno, 2012 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/6063/final-thesis.pdf?sequence=6&isAllowed=y>. Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce Libor Mrňa.
33. Rozdělení laserů. *Laserové a optické technologie* [online]. 2015, 2.8.2015 [cit. 2021-5-10]. Dostupné z: <https://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>
34. MRŇA, Libor. *Technologie využívající laser: Základy laserové techniky* [online]. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_zaklady\\_laserove\\_techniky\\_2013\\_mrna.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_zaklady_laserove_techniky_2013_mrna.pdf). Prezentace. Vysoké učení technické
35. ROUPEČ, Tomáš. *Laserový zdroj s optovláknovým výstupem* [online]. Brno, 2019 [cit. 2021-5-11]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=192542](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=192542). Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce Petr Drexler.
36. PASCHOTTA, Rüdiger. 2008. *Semiconductor Lasers. RP Photonics encyklopedia* [online]. [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: [http://www.rp-photonics.com/semiconductor\\_lasers.html](http://www.rp-photonics.com/semiconductor_lasers.html)
37. PASCHOTTA, Rüdiger. 2008. *Diode bars. RP Photonics encyklopedia* [online]. [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: [http://www.rp-photonics.com/diode\\_bars.html](http://www.rp-photonics.com/diode_bars.html)

38. LUKÁŠ, Michal. Laserové diody: Princip funkce laserových diod. *Elektrorevue* [online]. Olomouc, 1.10.2001 [cit. 2021-4-3]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01034/index.html#generacesvetla>
39. High Powered Diode Laser Optics. *PowerPhotonic* [online]. 2016 [cit. 2021-4-3]. Dostupné z: <http://www.powerphotonic.com/applications/high-powered-diode-laser-optics>
40. PASCHOTTA, Rüdiger. 2008. *Diode Stacks*. *RP Photonics encyklopedia* [online]. [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: [http://www.rp-photonics.com/diode\\_stacks.html](http://www.rp-photonics.com/diode_stacks.html)
41. LUGIATO, Luigi, Franco PRATI a Massimo BRAMBILLA. The semiconductor laser. *Nonlinear optical systems*. 1. Cambridge: Cambridge University Press, 2015, s. 177-191. Dostupné z: doi:10.1017/CBO9781107477254.018
42. PASCHOTTA, Rüdiger. 2008 *Thin-disk Lasers*. *RP Photonics encyklopedia* [online]. [cit. 2015-05-8]. Dostupné z: [http://www.rp-photonics.com/thin\\_disk\\_lasers.htm](http://www.rp-photonics.com/thin_disk_lasers.htm)
43. Diskový laser. *TRUMPF* [online]. Praha: TRUMPF [cit. 2021-4-17]. Dostupné z: [https://www.trumpf.com/cs\\_CZ/produkty/laser/diskovy-laser/](https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/laser/diskovy-laser/)
44. HAVRILLA, David a Rüdiger BROCKMANN. Třetí generace diskových laserů. *Pohony ve strojírenství* [online]. 2009, 18.11.2009, (11) [cit. 2021-4-17]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/treti-generace-diskovych-laseru>
45. PASCHOTTA, Rüdiger. 2008. *Fiber lasers*. *RP Photonics encyklopedia* [online]. [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: [http://www.rp-photonics.com/fiber\\_lasers.html?s=ak](http://www.rp-photonics.com/fiber_lasers.html?s=ak)
46. BAZALOVÁ, Lucie. *Porovnání vlastností pevnolátkových laserů* [online]. Brno, 2012 [cit. 2021-5-8]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=53332](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53332).  
Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.
47. PASCHOTTA, Rüdiger. 2008. Double-clad Fibers. *RP Photonics encyklopedia* [online]. [cit. 2015-02-13]. Dostupné z: [http://www.rp-photonics.com/double\\_clad\\_fibers.html](http://www.rp-photonics.com/double_clad_fibers.html)
48. Princip vláknového-Fiber laseru. *Leonardo technology* [online]. [cit. 2021-3-9]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-vlaknoveho-fiber-laseru>
49. Vláknové lasery. *Věda kolem nás* [online]. Praha: Akademie věd ČR [cit. 2021-3-19]. Dostupné z: [https://www.ufe.cz/sites/default/files/Media/vlaknove\\_lasery.pdf](https://www.ufe.cz/sites/default/files/Media/vlaknove_lasery.pdf)
50. PETERKA, Pavel. Vláknové lasery dobývají svět. *Optické systémy* [online]. Akademie věd ČR, 16-19 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: [https://www.ufe.cz/sites/default/files/Media/12\\_peterka\\_21\\_stoleti-panorama.pdf](https://www.ufe.cz/sites/default/files/Media/12_peterka_21_stoleti-panorama.pdf)

51. SHIWEI, Zhang, Sun JUNHAO, Zhu MINHAO, Zhang LIN, Nie PULIN a Li ZHUGUO. Fiber laser welding of HSLA steel by autogenous laser welding and autogenous laser welding with cold wire methods. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2020, 2020, (1), 275 [cit. 2021-5-7]. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0924013619303255>
52. Princip CO<sub>2</sub> laseru. *Leonardo technology* [online]. [cit. 2021-4-17]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-co2-laseru>
53. ŠMÍD, Jiří. Slab, Innoslab, kotoučový, nebo vláknový laser? *Inovace / Technologie* [online]. 2007, 14.3.2007, 2007(3) [cit. 2021-3-10]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/slab-innoslab-kotoucovy-nebo-vlaknovy-laser>
54. PASCHOTTA, Rüdiger. 2008 CO<sub>2</sub> lasers. *RP Photonics encyklopedia* [online]. [cit. 2015-04-13]. Dostupné z: [http://www.rp-photonics.com/thin\\_disk\\_lasers.htm](http://www.rp-photonics.com/thin_disk_lasers.htm)
55. MRŇA, Libor. *Aktuální možnosti v laserovém svařování*. MM Průmyslové spektrum [online]. Praha: MM publishing, 2018, 2018(1) [cit. 2021-02-10]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/aktualnimoznosti-v-laserovem-svarovani.html>
56. ZHOU, Qi, Cao LONGCHAO a Xiang HUANG. *Prediction of angular distortion in the fiber laser keyhole welding process based on a variable-fidelity approximation modeling approach* [online]. 1.3.2018 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-plot-of-laser-welding-process\\_fig1\\_322868455](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-plot-of-laser-welding-process_fig1_322868455)
57. KOŘÁN, Pavel. *Laserové svařování I. Lao: Lasery a optika* [online]. 18. 2. 2013 [cit. 2021-03-15]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-i-laser-welding-134>
58. KOŘÁN, Pavel. Poslední trendy ve svařování laserem. *Spojování a dělení materiálu* [online]. 2009, 7.10.2009, (10) [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/posledni-trendy-ve-svarovani-laserem>
59. IONIX. 2015. Laser welding [online]. 2015 [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://ionix.fi/en/technologies/laser-processing/laser-welding/>
60. PRIMUS, Tomáš. Technologie svařování laserem. *Czech lasers* [online]. 2018 [cit. 2021-4-17]. Dostupné z: <https://czechlasers.cz/studovna/laserovy-den-pro-stredni-skoly/>
61. Laser welding: Efficiency and Strength. *Alfa Metal Machinery* [online]. 13.7.2017 [cit. 2021-4-19]. Dostupné z: <https://blog.alfamm.ro/laser-welding-efficiency-strength/>
62. OLIVEIRA, João Pedro a Zhi ZENG. *Laser Welding*. MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020. ISBN 9783039288618.



63. DULEY, Walter. *Materials and Manufacturing Processes* [online]. 14. 1. Hoboken: Wiley, 1999. ISBN 0-471-24679-4. ISSN 1042-6914.
64. AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s. ISBN 80-85771-81-0.
65. MRŇA, Libor a Petr HORNÍK. Pokročilé metody laserového svařování. *Automatizace výrobních systémů ve strojírenské výrobě. Měření ve strojírenství. Lineární technika, odměřování. Logistika, manipulační technika*. [online]. 2017, 8.3.2017, 2017(3) [cit. 2021-4-17]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/pokrocile-metody-laseroveho-svarovani>
66. HERRMANN, Dirk a Peter HERZOG. Laser welding of copper. *Industrial laser solutions* [online]. 2013, 1.1.2013 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.industrial-lasers.com/welding/article/16485604/laser-welding-of-copper>
67. ŠPLÍCHAL, Jan. Dělení materiálů laserovým paprskem je stále na vzestupu zájmu. *Konstrukce 2021* [online]. 2020, 9.10.2020 [cit. 2021-4-17]. Dostupné z: <https://konstrukce.cz/svarovani-a-deleni-materialu/deleni-materialu-laserovym-paprskem-je-stale-na-vzestupu-zajmu-591>
68. SUDER, W., S. GANGULY, S. WILLIAMS a B.Y.B. YUDODIBROTO. Penetration and mixing of filler wire in hybrid laser welding. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2021(1) [cit. 2021-4-5]. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013620304623>
69. NĚMEČEK, Stanislav. Laserové svařování s přídavným drátem. *Průmyslové spektrum* [online]. 2015 [cit. 2021-4-10]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-svarovani-s-pridavnym-dratem>
70. Hybridní svařování. *TRUMPF* [online]. [cit. 2021-3-21]. Dostupné z: [https://www.trumpf.com/cs\\_CZ/reseni/pouziti/svarovani-laserovym-paprskem/hybridni-svarovani/](https://www.trumpf.com/cs_CZ/reseni/pouziti/svarovani-laserovym-paprskem/hybridni-svarovani/)
71. IONIX. 2015. Hybrid laser welding [online]. [cit. 2015-03-13]. Dostupné z: <http://ionix.fi/en/technologies/laser-processing/hybrid-laser-welding/>
72. FERNANDES, Camila, Natália LOPES DO VALE, Tiago Felipe Abreu SANTOS a Severino Urtiga FILHO. *Investigation of transverse shrinkage and angular distortion caused by hybrid laser-arc welding* [online]. 3.4.2020 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-020-05343-5
73. KARLSSON, J. a A.F.H. KAPLAN. Analysis of a fibre laser welding case study, utilising a matrix flow chart. *Applied Surface Science*. 9. Amsterdam: Elsevier, 2011, s. 4113-4122. ISBN 0169-4332.
74. ČSN EN ISO 6520-1 (050005). *Svařování a příbuzné procesy - Klasifikace geometrických vad kovových materiálů*. Část 1: Tavné svařování. Praha: Český normalizační institut, 2008.

75. ČSN EN 1011-6 (052210). *Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů. Část 6: Laserové svařování*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
76. ČSN EN ISO 13919-1 (050335). *Svařování - Svarové spoje zhotovené elektronovým a laserovým svařováním - Směrnice pro určování stupňů jakosti. Část 1: Ocel*. Praha: Český normalizační institut, 1998.
77. ČSN EN ISO 17637 (051180). *Nedestruktivní zkoušení svarů – Vizuální kontrola tavných svarů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
78. ČSN EN ISO 4136. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Příčná zkouška tahem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
79. ČSN EN ISO 17639 (051128). *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
80. ČSN EN ISO 9015-2 (051134). *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkoušení tvrdosti. Část 2, Zkoušení mikrotvrdosti svarových spojů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
81. BLAHUTA, Ladislav. *Nedestruktivní zkoušky svarů* [online]. [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/4239492-Nedestruktivni-zkousky-svaru.html> Prezentace.
82. POTANKO, Andrej. *Nedestruktivní metody zkoušení svarů* [online]. Brno, 2019 [cit. 2021-4-17]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/192161/final-thesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce Marián Sigmund.
83. MARTINEC, Jiří, Zdeněk ŠVEIDLER a Jiří JANOVEC. *Korozivzdorné materiály: základní typy ocelí a doporučení pro jejich svařitelnost. Konstrukce* [online]. 2.12.2014 [cit. 2021-4-17]. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/korozivzdorne-materialy-zakladni-typy-oceli-a-doporuceni-pro-jejich-svaritelnost/>
84. *Atest oceli X2CrNiMo 17-12-2. Isbergues, Francie, 2021-03-07.*
85. CUNAT, Pierre-Jean. *Svařování korozivzdorných ocelí* [online]. 3. Lucembursko: Euro Inox, 2007 [cit. 2021-4-17]. ISBN 978-2-87997-177-3. Dostupné z: [https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro\\_Inox/BrochureWeldability\\_CZ.pdf](https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/BrochureWeldability_CZ.pdf)
86. *Korozivzdorné oceli: vlastnosti* [online]. Lucembursko: Euro Inox, 2002 [cit. 2021-4-15]. ISBN 2-87997-082-2. Dostupné z: [https://www.cedinox.es/opencms901/export/sites/cedinox/.galleries/publicaciones-tecnicas/StainlessSteelProperties\\_CZ.pdf](https://www.cedinox.es/opencms901/export/sites/cedinox/.galleries/publicaciones-tecnicas/StainlessSteelProperties_CZ.pdf)

87. NAĎ, Tomáš. *Svařování tenkostěnných potrubí z korozivzdorných ocelí* [online]. Brno, 2020 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/192242/final-thesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. VUT. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.
88. NEJEDLÝ, Zdeněk. *Mechanické a technologické vlastnosti duplexních ocelí v závislosti na hodnotě  $p_{ren}$*  [online]. Brno, 2014 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=86490](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=86490). Diplomová práce. VUT. Vedoucí práce Antonín Záděra.
89. Charakteristika korozivzdorných materiálů a základní informace o použití, zpracování, svařování a možné korozi. *Italinox* [online]. 2020 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.italinox.cz/plechy/charakteristika-materialu/strana-2>
90. ČSN EN 1011-3. *Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů – Část 3: Obloukové svařování korozivzdorných ocelí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
91. X2CrNiMo 17-12-2: Korozivzdorná austenitická Ocel 17 349. 2021
92. ŠUMSKÝ, Ladislav. *Žárovzdorné oceli pro energetický průmysl* [online]. Praha, 2017 [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/128480394.pdf>. Bakalářská práce. ČVUT. Vedoucí práce Pavlína Hájková.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A <sub>80</sub>	Tažnost	[%]
A	Austenit	[-]
BPP	Beam Parameter Product	[mm·mrad]
Cr <sub>e</sub>	Chromový ekvivalent	[-]
ČSN	Česká státní norma	[-]
d <sub>1</sub> , d <sub>2</sub>	Úhlopříčky vtisku	[μm]
EN	Evropská norma	[-]
F	Ferit	[-]
F <sub>max</sub>	Maximální zatížení	[N]
HV	Tvrdost podle Vickerse	[-]
ISO	International organization for standardization	[-]
M	Martenzit	[-]
MAG	Metal Active Gas	[-]
MIG	Metal Inert Gas	[-]
Ni <sub>e</sub>	Niklový ekvivalent	[-]
P	Výkon laseru	[W]
R <sub>m</sub>	Mez pevnosti	[MPa]
R <sub>p0,2</sub>	Smluvní mez kluzu	[MPa]
s	Dráha příčnicku	[mm]
TIG	Tungsten Inert Gas	[-]
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	[-]
v <sub>d</sub>	Rychlost podávání drátu	[m·min <sup>-1</sup> ]
v <sub>s</sub>	Rychlost svařování	[mm·s <sup>-1</sup> ]
YAG	Yttrium Aluminium Granát	[-]
σ	Tahové napětí	[MPa]

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Svařování laserem [6], [7] .....	9
Obr. 2 Řešená součást [9] .....	10
Obr. 3 Základní rozměry žlabu [9] .....	10
Obr. 4 Plazmový paprsek [16] .....	11
Obr. 5 Svařování metodou TIG [15].....	11
Obr. 6 Svařování laserem [17] .....	12
Obr. 7 Schéma laserové diody [41] .....	14
Obr. 8 Absorpce fotonu v polovodiči [35].....	14
Obr. 9 Spojení emitorů ve stohy [39] .....	15
Obr. 10 Druhy pevnolátkových laserů [19] .....	15
Obr. 11 Nd:YAG buzení pomocí LPSS [19] .....	16
Obr. 12 Boční buzení pomocí laserových diod [19].....	16
Obr. 13 Zadní buzení pomocí laserových diod [19] .....	17
Obr. 14 Schéma diskového laseru [42] .....	17
Obr. 15 Princip vláknového laseru [19].....	18
Obr. 16 Struktura dvojitého optického vlákna [48] .....	18
Obr. 17 Princip buzení vláknového laseru [49] .....	19
Obr. 18 Schéma vláknového laseru [49].....	19
Obr. 19 Schéma laserového svařování [56] .....	21
Obr. 20 Kondukční režim [57].....	22
Obr. 21 Penetrační režim [57].....	23
Obr. 22 Závislost absorpce na vlnové délce [66].....	24
Obr. 23 Schéma laserového svařování bez přídavného materiálu [59] .....	25
Obr. 24 Laserové svařování s přídavným materiálem [61] .....	25
Obr. 25 Schéma hybridního svařování [72].....	26
Obr. 26 Nejčastější vady po laserovém svařování [32] .....	29
Obr. 27 Vizualní kontrola svaru [82].....	30
Obr. 28 Rozměry vzorku pro zkoušku tahem .....	31
Obr. 29 Leštící kotouč .....	32
Obr. 30 Zkouška tvrdosti dle Vickerse [18] .....	33
Obr. 31 Kompletní žlab [9].....	35
Obr. 32 Robotické pracoviště [9].....	36
Obr. 33 Průmyslový robot KUKA KR 30-60 [9] .....	37
Obr. 34 Podavač Fronius KD 7000.....	37
Obr. 35 Upnutí vzorku do přípravku .....	38
Obr. 36 Natočení laserové hlavy.....	39
Obr. 37 Grafický výstup tahové zkoušky prvního vzorku.....	40
Obr. 38 Vzorek po tahové zkoušce základního materiálu .....	41
Obr. 39 Vzorek č. 6 po tahové zkoušce .....	42
Obr. 40 Vzorky č. 8 a 9 po tahové zkoušce .....	42
Obr. 41 Zařízení pro přípravu metalografických výbrusů .....	43
Obr. 42 Bruska/leštička Tegramin-20.....	43
Obr. 43 Stereomikroskop.....	44
Obr. 44 Makroskopické snímky vybraných vzorků.....	44
Obr. 45 Vzhled svarových spojů.....	46
Obr. 46 Vzorky č. 1B a 2B po tahové zkoušce.....	47
Obr. 47 Tahový diagram pro druhý experiment .....	47
Obr. 48 Makroskopický snímek vzorku č. 1B .....	48

Obr. 49 Makroskopický snímek vzorku č. 2B .....	49
Obr. 50 Makroskopický snímek vzorku č. 3B .....	50
Obr. 51 Makroskopický snímek vzorku č. 4B .....	51
Obr. 52 Makroskopický snímek vzorku č. 5B .....	52
Obr. 53 Makroskopický snímek vzorku č. 6B .....	53
Obr. 54 Schöfflerův diagram [92] .....	54
Obr. 55 Mikroskopické snímky základního materiálu.....	55
Obr. 56 Mikroskopické snímky vzorku č. 5B.....	56
Obr. 57 Mikroskopické snímky vzorku č. 6B.....	57

## SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Vlastnosti svařovaného materiálu [12] .....	10
Tab. 2 Základní přehled průmyslových laserů [19] .....	13
Tab. 3 Porovnání svařovacích parametrů s ostatními metodami [7] .....	22
Tab. 4 Základní parametry laserového svařování [9] .....	27
Tab. 5 Svarové vady [18] .....	28
Tab. 6 Stupně jakosti svarového spoje [76] .....	28
Tab. 7 Základní nedestruktivní zkoušky [18] .....	30
Tab. 8 Základní destruktivní zkoušky [18] .....	31
Tab. 9 Chemické složení oceli X2CrNiMo 17-12-2 [91] .....	34
Tab. 10 Chemické složení korozivzdorných ocelí [11,84] .....	35
Tab. 11 Výchozí svařovací parametry .....	38
Tab. 12 Procesní parametry vzorků .....	39
Tab. 13 Základní mechanické vlastnosti [12] .....	40
Tab. 14 Výsledky tahové zkoušky základního materiálu .....	40
Tab. 15 Výsledky tahové zkoušky vzorků .....	41
Tab. 16 Svařovací parametry druhého experimentu .....	45
Tab. 17 Mechanické vlastnosti svarů pro experiment B .....	46
Tab. 18 Shrnutí výsledků ze zkoumání makroskopie .....	53
Tab. 19 Porovnání metody MAG a laseru [9] .....	58
Tab. 20 Finanční a časové náklady pro svařování žlabů .....	58
Tab. 21 Doporučené svařovací parametry .....	59

## **SEZNAM PŘÍLOH**

- Příloha 1 Materiálový list X5CrNi 18-10 [12]
- Příloha 2 Materiálový list X2CrNiMo 17-12-2 [91]
- Příloha 3 Atest materiálu X5CrNi 18-10 [11]
- Příloha 4 Atest materiálu X2CrNiMo 17-12-2 [84]
- Příloha 5 Hydraulický zkušební stroj ZD40
- Příloha 6 Atest materiálu X5CrNi 18-10 z druhého experimentu



## Příloha 1 Materiálový list oceli X5CrNi 18-10

### Část 1

<b>1.4301</b>		<b>Cr-Ni austenitická ocel odolná korozi</b>				<b>X5CrNi18-10</b>	
Číselné označení						Značka	
<b>Chemické složení [hm. %]<sup>7)</sup></b>							
C	Si	Mn	P	S <sup>1)</sup>	Cr	Ni	N <sup>8)</sup>
max 0,07	max 1,00	max 2,00	max 0,045	max 0,015	17,5–19,5	8,00–10,5	max 0,11
<b>Normy EN</b>							
[1] 10088-1,-2, -3	[6] 10222-5	[11] 10270-3	[16] 10312				
[2] 10028-7	[7] 10250-4	[12] 10272	[17] 10088-4,-5				
[3] 10151	[8] 10263-5	[13] 10294-2	[18] 10357				
[4] 10216-5	[9] 10264-4	[14] 10296-2					
[5] 10217-7	[10] 10269	[15] 10297-2					
<b>Mechanické vlastnosti</b>							
Polotovary, norma		C <sup>2)</sup> [1][2][17]	H <sup>3)</sup> [1][2][17]	P <sup>4)</sup> [1][2][17]	T <sup>5)</sup> [1][12][17]		
Rozměr t, d [mm]		≤ 8	≤ 13,5	≤ 75	≤ 160	> 160 ≤ 250	
Stav		po rozpouštěcím žhání (+AT)					
Mez kluzu R <sub>p0,2</sub> [MPa] min		230	210		190		
Mez kluzu R <sub>p1,0</sub> [MPa] min		260	250		225		
Mez pevnosti R <sub>m</sub> [MPa]		540–750	520–720		500–700		
Tažnost A [%]	podél min	–				45	–
	příčně min	45				–	35
Nárazová práce KV <sub>2</sub> [J]	podél min	–	100		100	–	
	příčně min	–	60		–	60	
	KV <sub>2</sub> <sup>196</sup> [J]	–	60		–	–	

## Příloha 1 Materiálový list oceli X5CrNi 18-10

### Část 2

Polotovar, norma	pásy [3]	trubky [4] [5] [14] [15] [16]	výkovky [6] [7]	duť tyče [13]					
Rozměr $t_n$ [mm]	$\leq 3$	$\leq 60$	$\leq 250$	–					
Stav	zpevněný za studena (+C)	po rozpouštěcím žhání (+AT)	po rozpouštěcím žhání (+AT)	po rozpouštěcím žhání (+AT)					
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa] min	–	195	200	195					
Mez kluzu $R_{p1,0}$ [MPa] min	–	230	230	225					
Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	700–1500 <sup>6)</sup>	500–700	500–700	500–700					
Tažnost A [%]	podél min	–	40	45	45				
	příčně min	–	35	35	35				
Nárazová práce $KV_2$ [J]	podél min	–	100	100	–				
	příčně min	–	60	60	–				
$KV_2^{196}$ [J]	příčně min	–	60	60	–				
Polotovar, norma	dráty válcované, tyče a dráty tažené [8]						upevňovací prvky [10]		
Rozměr $t, d$ [mm]	$>5 \leq 50$	$>5 \leq 10$	$>10 \leq 25$	$\geq 2 \leq 5$	$>5 \leq 25$	$>2 \leq 5$	$\geq 5 \leq 10$	$\leq 35$	$\leq 160$
Stav	+ AT nebo +AT+PE	+ AT + C	+ AT + C + AT	+ AT + C + AT + LC	+ AT + C + AT + LC	+C700	+AT		
Mez kluzu R [MPa]	–	–	–	–	–	–	–	350	190
Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	max 650	max 820	max 780	max 700	max 650	max 750	max 700	700– –850	500– –700
Tažnost A [%]	–	–	–	–	–	–	–	20	45
Kontrakce Z [%] min	65	–	60	65	60	60	–	–	–
Nárazová práce $KV_2$ [J] min	–	–	–	–	–	–	–	80	100
$KV_2^{196}$ [J] min	–	–	–	–	–	–	–	50	60
Tvrдость	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Polotovar, norma	lesklé tyče [17]								
Rozměr $t, d$ [mm]	$\leq 16$	$>16 \leq 40$	$>40 \leq 63$	$>63 \leq 160$	$>160 \leq 250$				
Stav	po rozpouštěcím žhání (+AT)								
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa] min	400	190							
Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	600–950	600–850	580–850	500–700					
Tažnost A [%]	podél min	25	30			45		–	
	příčně min	–						35	
Nárazová práce $KV_2$ [J]	podél min	–	100					–	
	příčně min	–						60	

## Příloha 1 Materiálový list oceli X5CrNi 18-10

### Část 3

Polotovar, norma	drát na lana [9]										
Rozměr d [mm]	≤ 0,20	>0,40 ≤ 0,50	>0,80 ≤ 1,00	>1,75 ≤ 2,00	>2,50 ≤ 3,00						
Stav	-										
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa] min	-	-	-	-	-						
Mez pevnosti $R_m$ [MPa] min	2050	1900	1750	1550	1450						
Tažnost A [%]	-	-	-	-	-						
Kontrakce Z [%]	-	-	-	-	-						
Polotovar, norma	drát na pružiny [11]										
Rozměr d [mm]	≤ 0,20	>1,00 ≤ 1,25	>2,00 ≤ 2,50	>4,25 ≤ 5,00	>8,50 ≤ 10,00						
Stav	tažený za studena (+C)										
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	-	-	-	-	-						
Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	2000–2150	1725–1750	1525–1550	1350–1400	1175–1250						
Tažnost A [%]	-	-	-	-	-						
Kontrakce Z [%]	-	-	-	-	-						
Mechanické vlastnosti za zvýšených/snížených teplot											
Min. hodnoty meze kluzu $R_{p0,2}$ a $R_{p1,0}$ a meze pevnosti $R_m$ při zvýšených teplotách (stav +AT)											
Teplota [°C]	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	
Mez kluzu [MPa]	$R_{p0,2}$	155	140	127	118	110	104	98	95	92	90
	$R_{p1,0}$	191	172	157	145	135	129	125	122	120	120
Mez pevnosti $R_m$ [MPa]	450	420	400	390	380	380	380	375	360	335	
Hodnoty modulu pružnosti E při normální a zvýšených teplotách											
Teplota [°C]	20	100	200	300	400	500					
Modul pružnosti E [GPa]	200	194	186	179	172	165					
Min. mechanické vlastnosti při snížených teplotách (norma [2])											
Teplota [°C]	20	-80	-150	-196							
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	210	270	315	300							
Mez kluzu $R_{p1,0}$ [MPa]	250	350	415	400							
Pevnost $R_m$ [MPa]	520	860	1100	1250							
Tažnost A [%]	45	35	30	30							
Fyzikální vlastnosti											
Hustota $\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	Měrná tepelná kapacita $c_p$ [J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Teplotní součinitel roztažnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ]	Tepelná vodivost $\lambda_t$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Elektrický odpor při 20 °C [ $\Omega$ ·mm <sup>2</sup> ·m <sup>-1</sup> ]							
7900	500	18,0·10 <sup>-6</sup> (20–500 °C)	15	0,73							

## Příloha 1 Materiálový list oceli X5CrNi 18-10

### Část 4

Odolnost degračním procesům	
Odolnost mezikrystalové korozi – v dodávaném stavu: ano – po zcitlivění: ne	
Dosažitelné hodnoty pevnosti v tahu (+C) a smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ (+CP) ve stavu za studena zpevněném (2H)	
+ C 700 ( $R_m = 700\text{--}850$ MPa) + C 850 ( $R_m = 850\text{--}1000$ MPa) + C 1000 ( $R_m = 1000\text{--}1150$ MPa) + C 1150 ( $R_m = 1150\text{--}1300$ MPa) + C 1300 ( $R_m = 1300\text{--}1450$ MPa) + CP 350 ( $R_{p0,2} = 350\text{--}500$ MPa) + CP 500 ( $R_{p0,2} = 500\text{--}700$ MPa) + CP700 ( $R_{p0,2} = 700\text{--}900$ MPa) + CP900 ( $R_{p0,2} = 900\text{--}1100$ MPa) + CP1100 ( $R_{p0,2} = 1100\text{--}1300$ MPa)	
Tepelné zpracování	
Rozpouštěcí žihání 1000–1100 °C ochlazovat ve vodě nebo rychle na vzduchu Zpracování pružin Válcování za studena + popuštění 250 °C / 24 h až 450 °C / 30 min – ochlazovat na vzduchu	
Tváření za tepla	
1200–900 °C ochlazovat na vzduchu	
Obrábění	
Požadované řezné rychlosti podle normy [13] – obrábění na hrubo 190 m/min – obrábění na jemno 240 m/min	
Ostatní vlastnosti	
Nemagnetovatelná ocel běžné jakosti	
Použití	
Pro obecné použití v korozním prostředí. Různé součásti např. v potravinářském průmyslu (ocel je svařitelná, dobře leštitelná, zvláště hlubokotažná, odolná proti opotřebení).	

Porovnání se zahraničními materiály					
EURO		Česká republika		Německo	
X5CrNi18-10	EN 10088	17 240	ČSN 41 7240	X5CrNi18-10	DIN 17440
Francie		Velká Británie		Itálie	
Z6CN18-09	NF A36-209	304S15	BS 970-1	X5CrNi1810KW,KT,KG	–
ISO		USA		Rusko	
X5CrNi18-10	ISO 6931-2	304	ASTM A167	08Ch18N10	GOST 5632
Japonsko		Čína		–	
SUS 304	JIS G3448	0Ch18N9	GB 4239	–	–
Poznámky					
1) Pro výrobky určené k obrábění je doporučen a povolen obsah S = 0,015–0,030 %, pro svařitelnost řízený obsah S = 0,008–0,030 %, pro leštitelnost obsah S = max 0,015 % 2) C – za studena válcovaný pás 3) H – za tepla válcovaný pás 4) P – za tepla válcovaný plech 5) T – tyče, dráty, tvarová ocel, lesklé výrobky 6) Ve stupních + C700 ( $R_m = 700\text{--}850$ MPa, A = min 25 %), + C850 ( $R_m = 850\text{--}1000$ MPa, A = min 12 %), + C 1000 ( $R_m = 1000\text{--}1150$ MPa, A = min 5 %), + C1150 ( $R_m = 1150\text{--}1300$ MPa, A = min 3 %), + C1300 ( $R_m = 1300\text{--}1500$ MPa, A = min 1 %)					
7) Odchytky od uvedeného chemického složení v následujících normách: – [4] – P = max 0,040 %, – [7], [8], [10], [11] – S = max 0,030 %, – [8] – Cu = max 1,00 % – [9], [10], [13] – Cr = 17,0–19,5					
8) Podle [1], [2], [5], [10], [12] a [17] N = max 0,10 %					

## Příloha 2 Materiálový list oceli X2CrNiMo 17-12-2

### Část 1

1.4404		Cr-Ni-Mo austenitická ocel odolná korozi				X2CrNiMo17-12-2 Značka				
Číselné označení										
<b>Chemické složení [hm. %]<sup>17)</sup></b>										
C	Si	Mn	P	S <sup>1)</sup>	Cr	Ni <sup>2)</sup>	Mo	N <sup>16)</sup>	Cu <sup>12)</sup>	
max 0,030	max 1,00	max 2,00	max 0,045	max 0,015	16,5–18,5	10,0–13,0	2,00–2,50	max 0,11	max 1,00	
<b>Normy EN</b>										
[1] 10088-1,-2,-3,-4,-5	[6] 10250-4	[11] 10296-2								
[2] 10028-7	[7] 10263-5	[12] 10297-2								
[3] 10216-5	[8] 10269	[13] 10312								
[4] 10217-7	[9] 10272	[14] 10357								
[5] 10222-5	[10] 10294-2									
<b>Mechanické vlastnosti</b>										
Polotovár, norma		C <sup>3)</sup>	H <sup>4)</sup>	P <sup>5)</sup>	T <sup>6)</sup> DT <sup>18)</sup>		TB <sup>7)</sup> TS <sup>8)</sup>		V <sup>9)</sup>	V1 <sup>10)</sup>
Rozměr t, t <sub>1</sub> [mm]		≤ 8	≤ 13,5	≤ 75	≤ 160	>160 ≤ 250	≤ 60		≤ 250	≤ 250
Stav		po rozpouštěcím žhání (+AT)								
Mez kluzu R <sub>p0,2</sub> [MPa] min		240	220	200		190		190	200	
Mez kluzu R <sub>p1,0</sub> [MPa] min		270	260	235		225		225	235	
Mez pevnosti R <sub>m</sub> [MPa]		530–680	520–670	500–700		490–690		490–690	500–700	
Tažnost A [%]	podél min	–		–	40	–		40	45	–
	příčně min	40		45	–	30	30		35	30
Nárazová práce KV <sub>2</sub> [J]	podél min	–		100	100	–		100	100	100
	příčně min	–		60	–	60	60		60	60
KV <sub>2</sub> <sup>196</sup> [J]		–		60	–	60	60		60	–
Polotovár		L <sup>11)</sup>					U <sup>12)</sup>			
Rozměr t, d [mm]		≤ 10	>10 ≤ 16	>16 ≤ 63	>63 ≤ 160	>160 ≤ 250	≤ 160	≤ 35	≤ 25	
Stav		–					+ AT	+ C700	+ C800	
Mez kluzu R <sub>p0,2</sub> [MPa] min		400	380	200	200		200	350	500	
Mez pevnosti R <sub>m</sub> [MPa]		600–930	580–930	500–830	500–700		500–700	700–850	800–1000	
Tažnost A [%]	podél min	25		30	40	–		40	20	12
	příčně min	–		–	–	30		–	–	–
Nárazová práce KV <sub>2</sub> [J]	podél min	–		100	100	–		100	80	80
	příčně min	–		–	–	60		–	–	–
KV <sub>2</sub> <sup>196</sup> [J]		–		–	–	–		–	50	–

## Příloha 2 Materiálový list oceli X2CrNiMo 17-12-2

### Část 2

Polotovár	T <sup>b)</sup>										
Rozměr d [mm]	≤ 35			≤ 25							
Stav	zpevněný tvářením za studena (2H) +C700										
Mez kluzu R <sub>p0,2</sub> [MPa] min	350			500							
Mez pevnosti R <sub>m</sub> [MPa]	700–850			800–1000							
Tažnost A [%] min	20			12							
Polotovár	D <sup>14)</sup>										
Rozměr t, d [mm]	>5 ≤ 50	>5 ≤ 10	>10 ≤ 25	≥ 2 ≤ 5	>5 ≤ 25	>2 ≤ 5	>5 ≤ 10				
Stav	+AT nebo +AT + PE	+ AT + C		+ AT + C + AT		+ AT + C + AT + LC					
Mez kluzu R [MPa]	–	–	–	–	–	–	–				
Mez pevnosti R <sub>m</sub> [MPa] max	650	780	750	670	650	720	700				
Tažnost A [%]	–	–	–	–	–	–	–				
Kontrakce Z [%] min	68	–	–	68		63					
Nárazová práce KV [J]	–	–		–		–					
Tvrdość	–	–		–		–					
<b>Mechanické vlastnosti za zvýšených/snížených teplot</b>											
Min. hodnoty meze kluzu R <sub>p0,2</sub> a R <sub>p1,0</sub> a meze pevnosti R <sub>m</sub> při zvýšených teplotách (stav +AT)											
Teplota [°C]	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	
Mez kluzu [MPa]	R <sub>p0,2</sub>	165	150	137	127	119	113	108	103	100	98
	R <sub>p1,0</sub>	200	180	165	153	145	139	135	130	128	127
Mez pevnosti R <sub>m</sub> [MPa]	430	410	390	385	380	380	380	375	360	335	
Hodnoty modulu pružnosti E při normální a zvýšených teplotách											
Teplota [°C]	20	100	200	300	400	500					
Modul pružnosti E [GPa]	200	194	186	179	172	165					
Mechanické vlastnosti při nízkých teplotách (inf. údaje)											
	R <sub>p0,2</sub> [MPa]	R <sub>p1,0</sub> [MPa]	R <sub>m</sub> [MPa]	A [%]							
Teplota [°C]	–80	275	355	840	40						
	–150	315	415	1070	40						
	–196	350	450	1200	35						

## Příloha 2 Materiálový list oceli X2CrNiMo 17-12-2

### Část 3

Fyzikální vlastnosti				
Hustota $\rho$ [kg·m <sup>-3</sup> ]	Měrná tepelná kapacita $c_p$ [J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Tepelný součinitel roztažnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ]	Tepelná vodivost $\lambda_t$ [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Elektrický odpor při 20 °C [ $\Omega$ ·mm <sup>2</sup> ·m <sup>-1</sup> ]
8000	500	18,0·10 <sup>-6</sup> (20–500 °C)	15	0,75
Odolnost degračním procesům				
Odolnost mezikystalové koroze (EN ISO 3651-2) – v dodávaném stavu: ano – po zcitlivění: ano				
Svařování				
Doporučené tepelné zpracování po svařování			960–1040 °C <sup>15)</sup>	
Tepelné zpracování				
Rozpouštěcí žhání	1020–1120 °C	ochlazovat ve vodě nebo rychle na vzduchu		
Tvářením za tepla				
1150–850 °C	ochlazovat na vzduchu			
Obrábění				
Požadované řezné rychlosti podle normy [10] – obrábění na hrubo 190 m/min – obrábění na jemno 240 m/min				
Ostatní vlastnosti				
Nemagnetovatelná ocel běžné jakosti				
Použití				
Součásti zařízení v chemickém průmyslu, ve výrobě celulózy, barev, mýdel, textilu, v mlékárnách a pivovarech. Součásti pracující při zvýšených i nízkých teplotách.				



### Porovnání se zahraničními materiály

EURO		Česká republika		Německo	
X2CrNiMo17-12-2	EN 10088	17 349	ČSN 41 7349	X2CrNiMo17-12-2	DIN 17440
Francie		Velká Británie		Itálie	
Z2CND17-12	NF A35-577	316S11	BS 970-1	X2CrNiMo17-12-2	UNI 6904
ISO		USA		Rusko	
X2CrNiMo17-12-2	ISO 9328-7	316L	ASTM A182	–	–
Japonsko		Čína		–	
SUS 316L	JIS G4303	00Cr17Ni14Mo2	GB T1220	–	–

### Poznámky




- <sup>1)</sup> Pro tyče, dráty, profily, lesklé výrobky a odpovídající polotovary platí max. obsah S 0,030%. Jednotlivé rozsahy obsahu S poskytují možnost zlepšení určitých vlastností. Pro výrobky určené k obrábění je doporučen povolen obsah S = 0,015–0,030 %, pro svařitelnost řízený obsah S = 0,008–0,030 %, pro leštitelnost obsah S = max 0,015 %
- <sup>2)</sup> Pokud je třeba pro zvláštní účely, např. pro válcování bežešvých trub za tepla, minimalizovat obsah delta feritu nebo dosáhnout nízké magnetické permeability je možné zvýšit max. obsah Ni na 14,5 %
- <sup>3)</sup> C – za studena válcovaný pás
- <sup>4)</sup> H – za tepla válcovaný pás
- <sup>5)</sup> P – za tepla válcovaný plech
- <sup>6)</sup> T – tyče, dráty, tvarová ocel, lesklé výrobky
- <sup>7)</sup> TB – trubky bežešvé
- <sup>8)</sup> TS – trubky svařované
- <sup>9)</sup> V – výkovky (podle normy [5])
- <sup>10)</sup> VI – výkovky (podle normy [6])
- <sup>11)</sup> L – lesklé tyče
- <sup>12)</sup> Pouze podle normy [7]
- <sup>13)</sup> U – upevňovací prvky
- <sup>14)</sup> D – dráty válcované, tyče a dráty tažené pro petchování a protlačování za studena
- <sup>15)</sup> Nedoporučeno, pokud se svařuje stabilizovaným přídavným kovem
- <sup>16)</sup> Podle [2], [8], [9] a [1] (pouze část -4 a -5) N = max 0,10 %
- <sup>17)</sup> Podle [10] je P = max 0,040 %, S = 0,015–0,030 % a N = max 0,10 %
- <sup>18)</sup> DT – duté tyče, podle [10]

Příloha 3 Atest materiálu X5CrNi 18-10

 <p>Aperam - Stainless France Aperam Isbergues 62330 Isbergues FRANCE</p>		<b>MILL CERTIFICATE BS EN 10204/3.1</b> <b>CERTIFICAT DE RECEPTION NF EN 10204/3.1</b> <b>ABNAHMEPRUEFZEUGNIS DIN EN 10204/3.1</b>								N-Nr-N 1910570951-01 V01											
ISO 9001:2015 - IATF 16949:2016 - ISO 14001:2015		Ausgestellt im Einvernehmen mit dem TÜV SÜD - Auf Gegenseichnung wird verzichtet Issued in accordance with TÜV SÜD - Verification is not required Etabli en accord avec le TÜV SÜD - Dispense de contresignature AD 2000 Merkblatt W0 - PED 2014/68 EU Annex I, Point 4.3																			
Manufacturer's works order number N° de la commande usine productrice Werkauftragsnummer <b>80477704 /03-61854/1</b>		Surveyor's mark Cachet de l'expert Stempel des Werkssachverständigen 		Purchaser and/or consignee Client et/ou destinataire Besteller und/oder Empfänger ITALINOX S.R.O. ZDEBRADSKA 58/59 251 01 RICANY JAZLOVICE REPUBLIQUE TCHEQUE				Purchaser's order number N° de commande client Kundenbestellnummer <b>2018-OUP-20</b>													
Product - Produit - Erzeugnis COLD-ROLLED COIL BOBBINE LAMINEE A FROID KALTGEWALZTES BAND								Customer article number N'article client Artikelnummer des Kunden													
Steel designation Désignation de l'acier Stahlbezeichnung EN 10028-7 / 16 - W2-W30 - 1.4307 EN 10088-2 / 14 - 1.4307 ASTM A 240 / 17 - TYPE 304L ASME SA 240 / 17 - TYPE 304L EN 10088-4 / 09 - 1.4307		Finish Présentation Auslieferung 2B 2B 2B 2B 2B		Steelmaking process Mode d'élaboration de l'acier - Stahlherstellungsverfahren Prod. process: Electric arc furnace - VOD/AOD - Continuous casting Proc. fabric.: Four à arc - VOD/AOD - Couée continue Fertigungsablauf: Elektro-Ofen - VOD/AOD - Stranggussanlage				Product delivery condition Etat de livraison du produit - Lieferzustand Solution treated Hypertrempe : <b>1040 C MINI</b> Loesungsgegl/-abgeschreckt Forced Air Air forcé - Gebläse Luft													
Identification of the product Identification du produit - Identifizierung des Erzeugnisses MELTED IN BELGIUM, MADE IN FRANCE		Dimensions Dimensions - Abmessungen Thickness Epaisseur - Stärke 1,500 mm				Width Largeur - Breite 1500,00 mm		Length Longueur - Länge		Number of pieces Nb de pièces - Stückzahl <b>2</b>											
Coil n. N. Bobine - Band Nr. 89227		Heat n. N. Couée - Schmelz Nr. 335770								Net weight Poids net - netto Gewicht <b>22070 KGS</b>											
CHEMICAL ANALYSIS - ANALYSE CHIMIQUE - CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG																					
		C		Si		Mn		Ni		Cr		Mo		Ti		N		S		P	
Required - Exigé %mini Anforderung. %maxi		0,030		0,75		2,00		8,00 10,50		17,50 19,50						0,100		0,0150		0,045	
Cast Analysis Analyse coulée Analyse Schmelze		0,025		0,38		1,40		8,03		18,12						0,069		0,0010		0,036	
		G71		G72		G73		G74		G75		G76		G77		G78		G79		G80	
		G81		G82		G83		G84		G85		G86		G87		G88		G89		G90	
Positive material identification carried out : OK Tests de vérification de la conformité de la nuance fournie : OK Verwechslungsprüfung wurde durchgeführt : OK																					
Location (1) Room temperature - Température ambiante - Raumtemperatur		MECHANICAL PROPERTIES - PROPRIETES MECANQUES - MECHANISCHE WERTE								Test temperature (°C) :											
Direction (2) Required Exigé Anforderung		Yield or proof strength Limite d'élasticité Dehngrenze MPa		Tensile Strength Résistance à la traction Zugfestigkeit MPa		Elongation after fracture Allongement après rupt. Bruchdehnung %		Hardness Dureté Härte		Yield or proof strength Limite d'élasticité Dehngrenze MPa		Tensile str. Résist. MPa Zugfestigkeit		Elongation % Allongement. Bruchdehnung							
		Rp0.2%		Rp1%		Rm		50mm HBW1		Rp0.2%		Rp1%		Rm							
1		220		250		520 700		45		201											
2		293		328		649		55		179		177									
		G11		G14		G12		G13		G15		G31		G18							
Impact strength test Essai de résilience Kerbschlagachgiebigkeitstest		Corrosion test Test de corrosion Korrosionstest																			
C40 10°C		C44																			
		C42		EN ISO 3651-2 :OK		D51		C50		C51		C52		C53							
Location of the sample (1) Emplacement de l'échantillon Lage des Probenabschnittes 1. Front - Début - Anfang 2. Back - Fin - Ende 3. Middle - Milieu - Mitte		The delivery is in accordance with the order La fourniture est conforme aux exigences de la commande Die Lieferung entspricht den Bestellbedingungen				Packing list Avis d'expédition Lieferscheinnummer <b>190111101325-15255</b>				Organisation inspection Organisme et/ou service contrôle Ueberwachungsabteilung Quality Control 15/01/2019 <b>Laurent DUBOIS</b> The inspector Le responsable Der Werkssachverständige											
Direction of the test pieces (2) Orientation des éprouvettes Probenrichtung T. Transverse - Travers - Quer L. Longitudinal - Long - Laengs																					



**Příloha 4 Atest materiálu X2CrNiMo 17-12-2**

		<b>MILL CERTIFICATE BS EN 10204/3.1</b> <b>CERTIFICAT DE RECEPTION NF EN 10204/3.1</b> <b>ABNAHMEPRUEFZEUGNIS DIN EN 10204/3.1</b>										N-Nr-N <b>1910585418-01 V01</b>									
Aperam - Stainless France Aperam Isbergues 62330 Isbergues FRANCE		Ausgestellt im Einvernehmen mit dem TÜV SÜD - Auf Gegenzeichnung wird verzichtet Issued in accordance with TÜV SÜD - Verification is not required Etabli en accord avec le TÜV SÜD - Dispense de contresignature AD 2000 Merkblatt W0 - PED 2014/68 EU Annex I Point 4.3																			
ISO 9001:2015 - IATF 16949:2016 - ISO 14001:2015																					
<b>Manufacturer's works order number</b> N° de la commande usine productrice Werksauftragsnummer <b>80491280 /04-65437/1</b>		<b>Surveyor's mark</b> Cachet de l'expert Stempel des Werkstoffverständigen				<b>Purchaser and/or consignee</b> Client et/ou destinataire Besteller und/oder Empfänger  ACCIAI VENDER SPA VIA NOBEL 4/A  43100 PARMA ITALIE				<b>Purchaser's order number</b> N° de commande client Kundenbestellnummer Bestellnummer des Kunden <b>UAP916 APR 316L 2B</b>											
<b>Product - Produit - Erzeugnis</b> COLD-ROLLED COIL BOBINE LAMINEE A FROID KALTGEWALZTES BAND						<b>Customer article number</b> N'article client Artikelnummer des Kunden															
<b>Steel designation</b> Désignation de l'acier Stahlbezeichnung  EN 10028-7/16 - W2-W10 -1.4404 -1.4401 EN 10088-2/14 - 1.4404 -1.4401 EN 10088-4/09 - 1.4404 -1.4401 ASTM A 240 / 17 - TYPE 316L -TYPE 316 ASME SA 240 / 17 - TYPE 316L -TYPE 316		<b>Finish</b> Présentation Ausführung  2B 2B 2B 2B		<b>Steelmaking process</b> Mode d'élaboration de l'acier - Stahlherstellungsverfahren Proc. proces: Electric arc furnace - VOD/AOD - Continuous casting Proc. fabric.: Four à arc - VOD/AOD - Coulée continue Fertigungsablauf: Elektro-Ofen - VOD/AOD - Stranggussanlage  <b>Any supplementary requirements</b> Prescriptions supplémentaires - Zusätzliche Anforderungen <b>ST 009 REV.4</b>				<b>Product delivery condition</b> Etat de livraison du produit - Lieferzustand  <b>Solution treated</b> Hypertrempe : <b>1040 C MINI</b> Lösungsgegl+abgeschreckt  <b>Forced Air</b> Air forcé - Gebläse Luft													
CORR. TEST:ASTM A 262-E OK ASTM A480 / A480M - ASME SA 480/SA 480M NACE MR 0175 / ISO 15156-1 / ISO 15156-3 - NACE MR 0103 / ISO 17945																					
<b>Identification of the product</b> Identification du produit - Identifizierung des Erzeugnisses <b>MELTED IN BELGIUM, MADE IN FRANCE</b>						<b>Dimensions</b> Dimensions - Abmessungen  Thickness - Epaisseur - Stärke: 1,500 mm Width - Largeur - Breite: 1000,00 mm Length - Longueur - Laenge:				<b>Number of pieces</b> Nb de pièces - Stückzahl: <b>1</b>											
<b>Coil n.</b> N. Bobine - Band Nr. 91130		<b>Heat n.</b> N. Coulée - Schmelz Nr. 904040								<b>Net weight</b> Poids net - netto Gewicht: <b>11960 KGS</b>											
<b>CHEMICAL ANALYSIS - ANALYSE CHIMIQUE - CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG</b>																					
		<b>C</b>		<b>Si</b>		<b>Mn</b>		<b>Ni</b>		<b>Cr</b>		<b>Mo</b>		<b>Ti</b>		<b>N</b>		<b>S</b>		<b>P</b>	
<b>Required - Exigé %mini</b> Anforderung %mini		0,030		0,75		2,00		10,00 13,00		16,50 18,00		2,000 2,500				0,100		0,0150		0,045	
Cast Analysis Analyse coulée Analyse Schmelze		0,024		0,51		1,29		10,00 16,68		16,68 2,090				0,033		0,0043		0,036			
Positive material identification carried out : OK Tests de vérification de la conformité de la nuance fournie : OK Verwechslungsprüfung wurde durchgeführt : OK																					
<b>Location (1)</b>		<b>MECHANICAL PROPERTIES - PROPRIETES MECANQUES - MECHANISCHE WERTE</b>										Test temperature (°C) :									
Direction (2)		<b>Yield or proof strength</b> Limite d'élasticité Dehngrenze MPa		<b>Tensile Strength</b> Résistance à la traction Zugfestigkeit MPa		<b>Elongation after fracture</b> Allongement après rupt. Bruchdehnung %		<b>Hardness</b> Dureté Härte		<b>Yield or proof strength</b> Limite d'élasticité Dehngrenze MPa		<b>Tensile str.</b> Résist. MPa Zugfestigkeit		<b>Elongation %</b> Allongement. Bruchdehnung							
Required Exigé Anforderung		Rp0.2% Rp1%		Rm		50mm		HBW1		Rp0.2% Rp1%		Rm									
1 T		240 270		550 680		40		217		Rp0.2% Rp1%		Rm									
2 T		292 323		618		51		160 161		Rp0.2% Rp1%		Rm									
Impact strength test Essai de résilience Kerbschlagzähigkeitstest		G40 (°C)		C44		C42		C50 C51		C52 C53		C54 C55									
Location of the sample (1) Emplacement de l'échantillon Lage des Probenabschnittes 1. Front - Début - Anfang 2. Back - Fin - Ende 3. Middle - Milieu - Mitte		The delivery is in accordance with the order La fourniture est conforme aux exigences de la commande Die Lieferung entspricht den Bestellbedingungen				Organisation inspection Organisme et/ou service contrôle Überwachungsabteilung															
Direction of the test pieces (2) Orientation des éprouvettes Probenrichtung T. Transverse - Travers - Quer L. Longitudinal - Long - Längs		Marking, inspection and measurement : without objection Contrôle de marquage, d'aspect et de dimensions : satisfaisants Prüfung der Stempelung, des Oberflächenaspekts und der Abmessungen : ohne Beanstandung				Quality Control  08/04/2019 <b>Laurent DUBOIS</b>  The inspector Le responsable  Der Werkstoffverständige															

## Příloha 5 Hydraulický zkušební stroj ZD40

Stroj umožňuje provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů do 400 kN s řízením rychlosti zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60.

Řídicí jednotka EDC 60 je vysoce precizní elektronické zařízení speciálně konstruované pro řízení servo-hydraulických zkušebních strojů. Je vyráběna speciálně pro aplikace řízení zkušebních strojů a využívají ji přední evropští výrobci universálních zkušebních strojů. Jednotka je opatřena programem pro zkoušky kovů s možností provádět zkoušky bez PC u jednoduchých aplikací bez použití průtahoměru.

Technické parametry:



- Výrobce: HBM /SRN/
- Měřicí rozsah: 8 ÷ 400 kN
- Chyba měření síly: 1/100 jmenovitého rozsahu síly, tj.  $\pm 1 \%$  odpovídá třídě přesnosti 1
- Měřicí rozsah měření dráhy: 0 ÷ 280 mm
- Chyba měření dráhy:  $\pm 0,01$  mm
- sériové rozhraní RS 232 pro komunikaci s nadřazeným PC
- COM1 pro PC s FIFO s maximální rychlostí 115 KB
- inkrementální vstup pro napojení snímače dráhy

Počítač je vybaven programem M-TEST v.1.7 pro tahovou, tlakovou a ohybovou zkoušku kovových materiálů dle EN 10001-2 s vyhodnocením výsledků, grafickým zpracováním.



Řídicí jednotka EDC 60

## Příloha 6 Atest materiálu X5CrNi 18-10 z druhého experimentu

		Type Inspection Certificate 3.1 AD-2000 EN10204		Number 10721295908		Issued On 19/04/2021					
		- QMS approved acc AD-2000 W0 with Cert 01 202 IQ-08 5131 by TUV Rheinland (0035), cert. PED 2014/68/E Annex I §4.3 by TUV Rheinland (0035) - Material acc. AD2000 W2 - W10 in ref to EN10028-7 - Material conforming to NACE MR0175/MR0103 - ISO15156-1/ISO15156-3									
Customer ITALINOX S.R.O. ZDEBRADSKA 58/59 251 01 RICANY - JAZLOVICE CZ		Consignee ITALINOX S.R.O. ZDEBRADSKA 58/59 251 01 RICANY - JAZLOVICE CZ		Delivery N° 835116782 Of 19/04/2021 Delivery note nr 1007004512	Quality Control Q.M.D./Q.M. A.Venturini Plant Of Gazoldo	Pages 4/7					
Material LXF002		Norm/Grade EN10028-7, EN10088-2, EN10088-4, ASTM A240, ASME SA240, ASTM A480, ASME SA480				Order N° 1191249961/190		Client Order OIP-1203/2020 APRIL			
Description LXF002 1,50 X 1500 X 3020 4307/304L NOP		Quality/Qualità X2CrNi18-9, WNR1.4307, 304L, X5CrNi18-10, 1.4301, 304				Client Date 9/15/2020					
Item	Identification Nr	Heat	Quantity	Dimensional tolerances/ EN9445-2		Steel Processing/ Electric arc furnace VOD/AOD, continuous casting, heat treatment /annealing at 1050°C, forced air cooling		Mark Tester/ - Organization inspection: CQ3			
1	21XA017362	0539530	888 KG								
2	21XA017363	0539530	898 KG								
3	21XA017364	0539530	893 KG								
4	21XA017365	0539530	900 KG			- ASME norms acc. Sec. II Part A Ed. 2019		Terms of Delivery/			
Identification Nr	Chemical Type	Mark	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	N (%)	Cr (%)	Ni (%)	
21XA017362		21YP004162	.030	.330	1.760	.0310	.0010	.0640	18.020	8.060	
21XA017363		21YP004162	.030	.330	1.760	.0310	.0010	.0640	18.020	8.060	
21XA017364		21YP004162	.030	.330	1.760	.0310	.0010	.0640	18.020	8.060	
21XA017365		21YP004162	.030	.330	1.760	.0310	.0010	.0640	18.020	8.060	
Identification Nr	Test position	Test direction	Mark	Rm [N/mm <sup>2</sup> ]	Rp 0.2 [N/mm <sup>2</sup> ]	RP 1 [N/mm <sup>2</sup> ]	A80 (%)	A50 (%)	HRB B	HRB T	
21XA017362	B	T	21YP004162	626	287	327	51.9	55.1	82	81	
21XA017363	B	T	21YP004162	626	287	327	51.9	55.1	82	81	
21XA017364	B	T	21YP004162	626	287	327	51.9	55.1	82	81	
21XA017365	B	T	21YP004162	626	287	327	51.9	55.1	82	81	
Test Position/Posizione Prova	Test Direction/Direzione Prova		Remarks about tensile test: - Renounced of counter signature agreed by TUV Rheinland (01/03/2012)				Other controls: - Dimensions within tolerances, spectrometrical identity test OK - Corrosion Test EN ISO3651-2 Method A and ASTM A262 pract.E OK				
T=coil head C=middle legh B=coil end	T=transverse L=longitudinal D=diagonal										
Remarks: - Surface finish 2B - We certify that products listed above comply with order requirements - Document validated acc. EN10204 par. 5 - Norms are intended in the valid edition at the time of the order - Durability: NPD				- Regulated Substances: NPD - Intended Uses: Building Constructions or Civil Engineering - DoP available at <a href="http://www.marcegaglia.com/brochure/e/quality/dop.html">http://www.marcegaglia.com/brochure/e/quality/dop.html</a> -surface finish 2B				 0474 13 MARCEGAGLIA SPECIALTIES s. Marco 18 45040 - Scandole S.P. Modugno - Italy EN 10088-4:2009			