



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ÚPRAVA POLOTOVARŮ PRO LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ

WORKING OF SEMI-FINISHED PRODUCT FOR LASER WELDING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Černý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Kubíček

BRNO 2021

Zadaní bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Jan Černý**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Jaroslav Kubíček**
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 bakalářské práce:

Úprava polotovarů pro laserové svařování

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Svařovací proces vyžaduje pečlivou přípravu svarových ploch. Nepřesná příprava opracováním nebo tvářením vede ke vzniku vad svarů, které při malých tloušťkách svařovaných materiálů nelze opravit. Bakalářská práce je zaměřena na hodnocení možností procesu přípravy polotovarů pro laserové svařování korozivzdorných ocelí malých tloušťek.

Cíle bakalářské práce:

- literární studie problematiky tvářecích a obráběcích procesů pro přípravu svarových hran,
- rozbor využitelnosti na daných svařencích,
- příklady použití z oblasti produkce firmy ACO,
- optimalizace procesu a návrh opatření pro snížení vadné produkce.

Seznam doporučené literatury:

OLSON D.L. a kolektiv autorů. ASM Handbook. Welding, brazing, and soldering Volume 6,; Materials Park, Ohio, 2011. ISBN-13978-1-61503-133-7.

BENKO,B. a kol. Laserové technológie, Technická universita, Bratislava 2000, ISBN 80-227-1425-9.

TURŇA,M. Špeciálne metódy zvarovania, 1. vyd. ALFA Bratislava, 1989, ISBN 80-05-000097-9.

KOLEKTIV AUTORŮ. Materiály a jejich svařitelnost, 1. vyd. Zeross, Ostrava 2001, 292s. ISBN 80-85771-85-3.

KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení, 1. vyd. Zeross, Ostrava 2001, 395s. ISBN 80-85771-81-0.

KOLEKTIV AUTORŮ. Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení, 1. vyd. Zeross, Ostrava 1999, 249s. ISBN 80-85771-70-5.

KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1. vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214s. ISBN 80-85771-72-1.

Termín odevzdání bakalářské 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

ČERNÝ Jan: Úprava polotovaru před laserovým svařováním

Práce pojednává o technologii laserového svařování a přípravě polotovarů pro laserové svařování v sériové výrobě. Teoretická část se zabývá fyzikální podstatou laseru, jednotlivými druhy laserů, technologií svařování, přípravou svarových ploch, bezpečností práce s lasery a základním rozdělením korozivzdorných ocelí. Praktická část se zabývá posouzením a vyhodnocením navržených technologií dělení polotovarů pro laserové svařování. V praktické části byly provedeny a zhodnoceny zkoušky drsnosti, rovinnosti a makrostruktury.

Klíčová slova:

laser, laserové svařování, korozivzdorné oceli, ocel 1.4301, příprava polotovarů

ABSTRACT

ČERNÝ Jan: Working of semi-finished product for laser welding

The thesis deals with the technology of laser welding and preparation of semi-finished products for laser welding for serial production. The theoretical part deals with the physical nature of the laser, different types of lasers, welding technology, preparation of welded surfaces, safety of work with lasers and basic division of corrosion resistant steels. The practical part deals with the assessment and evaluation of the proposed technologies of cutting blanks for laser welding. In the practical part, roughness, flatness and macrostructure tests were performed and evaluated.

Keywords:

laser, laser welding, stainless steel, steel 1.4301, preparation of semi-finished products

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČERNÝ, Jan. *Úprava polotovarů pro laserové svařování* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132397>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne: 21.5.2021

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl velmi poděkovat panu Ing. Jaroslavovi Kubíčkovvi za cenné rady a připomínky týkající se zpracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Vojtěchovi Staňkovi za pomoc při přípravě a firmě ACO Industries za uskutečnění výroby vzorků a panu Jiřímu Čechovi za pomoc při měření drsnosti. Poslední největší poděkování bych chtěl svěřit mé rodině, která mě podporovala po dobu celého studia a během tvorby této práce.

Obsah

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	9
1 LASER.....	10
1.1 Fyzikální podstata laseru	10
1.2 Vlastnosti laserového svazku	11
1.3 Součásti laseru	12
1.4 Rozdělení laserů	12
1.5 Nejpoužívanější lasery v průmyslu	13
1.6 Porovnání jednotlivých druhů laserů.....	15
1.7 Rozdělení využití laserové technologie v průmyslu.....	16
2 TECHNOLOGIE LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ	17
2.1 Pulsní svařování	17
2.2 Penetrační svařování.....	17
2.3 Ochranné plyny	18
3 POROVNÁNÍ METOD SVAŘOVÁNÍ	19
3.1 Vyhodnocení laserového svařování.....	19
4 PŘÍPRAVA SVAROVÝCH PLOCH	20
4.1 Typy svarů pro laserové svařování.....	20
4.2 Typy vad svarových spojů.....	21
5 BEZPEČNOST PRÁCE PŘI POUŽÍVÁNÍ LASERŮ.....	22
6 KOROZIVZDORNÉ OCELI A VLASTNOSTI	24
6.1 Základní rozdělení korozivzdorných ocelí	24
6.1.1 Austenitické oceli	25
6.1.2 Martenzitické oceli	25
6.1.3 Feritické oceli	25
7 PRAKTICKÁ ČÁST	26
7.1 Popis zadané součásti	26
7.1.1 Materiálové vlastnosti	27
7.1.2 Posouzení aktuální sériové výroby	28
7.1.3 Svařovací proces.....	29
7.2 Návrhy úpravy polotovarů.....	30
7.2.1 Příprava pomocí řezání na pásové pile	30
7.2.2 Příprava pomocí řezání pomocí laserové paprsku	30
7.2.3 Příprava pomocí řezání vodním paprskem	31
7.2.4 Příprava pomocí řezání plazmou	31
7.3 Měření drsnosti.....	32
7.3.1 Výsledky měření drsnosti	37
7.4 Měření rovinnosti a makrostruktury	37
7.4.1 Výsledky měření makroskopie	40
8 ZÁVĚRY	42
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratk	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	
Seznam grafů	
Seznam příloh	

ÚVOD [11], [20], [26]

Princip laseru byl popsán již na začátku minulého století, jedná se o princip zesílení světla stimulovanou emisí záření, která se řídí zákony kvantové elektroniky a podstatou vynucené emise záření, který popsal Albert Einstein. První prototypy laserového efektu se poté objevily až na počátku 60. let minulého století. Jednalo se o první funkční pevnolátkový laser využívající krystal rubínu dle Teodora Maimana. Postupně laserové technologie začaly procházet progresivním vylepšováním a zdokonalováním, díky čemu našly využití v mnoha oblastech jako je medicína, holografie, přenos dat nebo vojenská technika. Velkou rozmanitost využití laserové technologie má oblast strojírenství, kde se používá například pro dělení, gravírování, svařování materiálu nebo dokonce i pro tepelné zpracování. V tomto průmyslu jsou nejčastější aplikace této technologie v podobě dělení materiálu pomocí laserového paprsku spojeného s plynným médiem a svařování materiálu.

Svět zažívá neustálý rozvoj napříč obory, vznikají tedy vysoké nároky na průmysl. Požadavkem jsou rychlé dodávky produktů ve vysoké kvalitě. Díky tomu jsou výrobní podniky nuceny sledovat trend doby a implementovat nejmodernější technologie do svých výrobních závodů. Mezi nejmodernější technologie ve strojírenském průmyslu se řadí využívání laserového svařování. Svary vytvořené laserovým paprskem se uplatňují na svařencích, které požadují vysokou kvalitu svaru, vysokou hloubku průvaru a velmi malou tepelně ovlivněnou oblast. Ostatní metody převyšuje i díky vysoké produktivitě a vhodnosti pro automatizaci, jelikož svařování probíhá bez přídavného materiálu. Poslední výhodou je možnost svařování nekovových materiálů nebo dokonce plastů a velmi tenkých tloušťek materiálů.

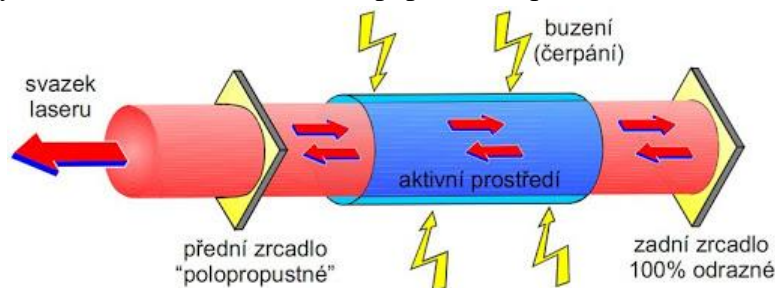
Bakalářská práce se zabývá návrhem úpravy polotovarů pro laserové svařování ve firmě ACO Industries. Cílem je navrhnout úpravu přípravy polotovarů pro zadanou součást. Dále provést zkoušky, kde na základě výsledků z měření budou úpravy porovnány s aktuální sériovou výrobou. Firma pro tuto práci zvolila zátěžový rošt z korozivzdorné oceli svařovaný laserem.



Obr. 1 Laserové svařování [23]

1 LASER [1], [2], [9], [14], [15], [18], [20], [21]

Samotné slovo LASER je složené z počátečních písmen jevu, ke kterému dochází, tj. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (zesilování světla stimulovanou emisí záření). Někdy může být Laser označen za kvantový generátor světla, avšak obecně popisuje optický zesilovač, který generuje elektromagnetické záření pomocí stimulované emise fotonů. Princip je popsán ze zákonů kvantové fyziky a termodynamiky. Samotné záření je v aktivním prostředí buzeno, díky čemu se do laseru dodává energie (elektricky, opticky atd.). Získaná energie je poté vyzářena ve formě laserového paprsku, resp. laserového svazku viz. Obr.2.

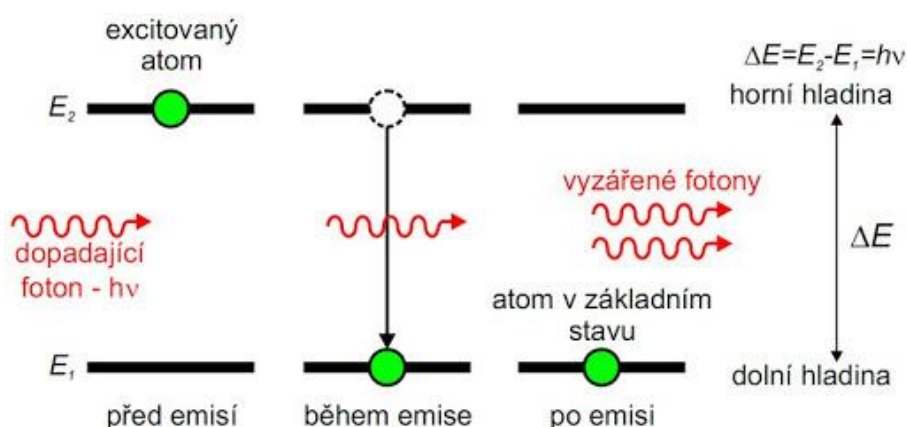


Obr. 2 Schéma laseru [20]

1.1 Fyzikální podstata laseru [1], [2], [9], [14], [15], [18], [20], [21]

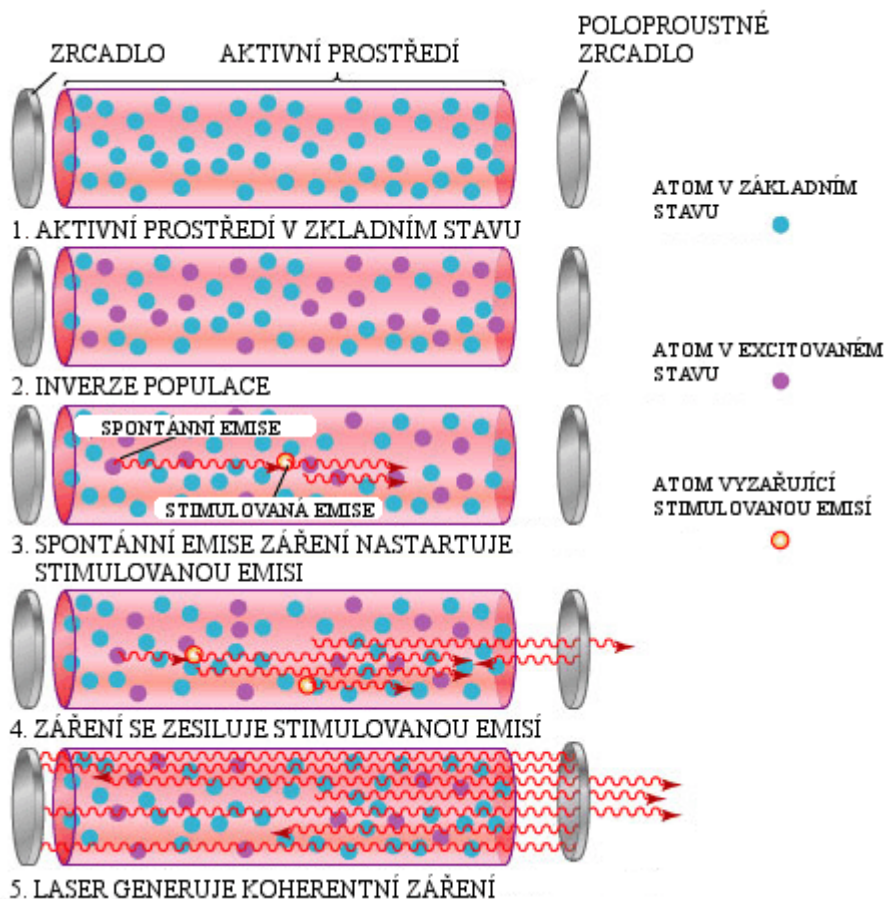
Ze zákona kvantové fyziky je dáno, že prostředí tvořené z molekul a atomů může záření absorbovat nebo emitovat. Samotná emise může být spontánní (resp. samovolná) nebo stimulovaná (resp. vynucená). Dle zákonů je tedy popsáno, že při absorpci fotonu přejde atom z nižší hladiny ve stavu excitovaném (resp. vybuzeném) na vyšší, kde má energii větší o energii pohlceného fotonu. Vybuzený atom má snahu být ve stavu nižší energie, dochází k přechodu na nižší hladinu a zároveň emituje foton s velikostí energie iniciačního fotonu. Vzniká tzv. spontánní emise záření.

K vzniku stimulované emise dochází při kontaktu fotonu s excitovaným atomem na dráze s vyšší energií. Stav atomu je narušen a dojde k jeho uvolnění. Přechází zpět na hladinu s nižší energií a vypouští foton energie iniciačního fotonu. Vzniká zde řetězová reakce dopadajících fotonů na excitované atomy, které stimulují přechod z horní na dolní hladinu viz. Obr.3.



Obr. 3 Schéma fyzikální podstaty laseru [20]

Dopadající fotony na vybuzené atomy způsobují vznik nových fotonů. Ty se následně hromadí a odrážejí v rezonátoru od jednoho zrcadla k druhému. Počet fotonů narůstá, díky čemu dochází k nahromadění energie a zesilování stimulované emise. Nahromaděná energie vyúští v podobě proudu fotonů (svazek laseru) viz. Obr.4



Obr. 4 Schéma vzniku stimulované emise [20]

1.2 Vlastnosti laserového svazku [15], [21], [26]

Velkou a dominantní vlastností laserového paprsku je vlnová délka stimulovaných fotonů. Každý stimulovaný foton má stejnou vlnovou délku jako jeho předchůdce, a tím i stejnou energii a směr. Dalšími významnými vlastnostmi je koherentnost, vysoká intenzita, malá rozbíhavost a monochromaticnost laserového svazku.

Jednotlivé vlastnosti jsou charakterizovány takto:

- **Koherentnost** – uspořádanost, souvislost – světelné vlnění má stejné frekvence a fázový rozdíl je v bodě prostoru konstantní.
- **Monochromaticnost** – jednobarevnost – proud fotonů má stejnou frekvenci, resp. vlnovou délku. Ta má za následek barvy daného světelného toku podle druhu aktivního prostředí.
- **Směrovost** – nerozbíhavost – díky této vlastnosti lze proud fotonů usměrnit do jednoho velmi malého bodu.

1.3 Součásti laseru [9], [11], [14], [15], [26]

Pro samotné vytvoření svazku laseru, a tedy stimulované emise záření je zapotřebí několik základních součástí. Mimo již zmíněné aktivní prostředí je součástí každého laserového zařízení také optický rezonátor, čerpací zařízení, chlazení, vedení svazku a řídicí počítač.

- **Aktivní prostředí** – je látkou obsahující odděleně kvantové energetické hladiny elektronů na kterých dochází k excitaci fotonů a následně k vytvoření stimulované emise.
- **Optický rezonátor** – využívá se pro zesilování světla, a tedy energie excitovaných atomů. Jedná se o dvě rovnoběžně usazená zrcadla kolmé na osu laseru, kde jedno je polopropustné a druhé nepropustné. Mezi zrcadly je umístěno aktivní prostředí, kde vzniká zesilující stimulovaná emise odrazy fotonů mezi zrcadly.
- **Čerpací zařízení** – hlavní systém poskytující dostatek energie aktivnímu prostředí pro tvorbu přebytku částic ve vyšším energetickém stavu tedy pro tvorbu stimulované emise. Mezi nejčastěji používanými budicími zařízeními se v praxi používá světlo, elektrická energie nebo chemická reakce.
- **Chlazení** – při vysokých výkonech laseru je svazek doprovázen vysokými teplotami. Chlazení ochraňuje probíhající proces a chladí prouděním kapaliny aktivní prostředí, rezonátor a optické prvky. Chladicím médiem je nejčastěji demineralizovaná voda.
- **Vedení svazku** – Expander – systém čoček a clon, které vedou laserový paprsek a zvyšují kvalitu a průměr svazku. Hlavní účel expanderu je snížení divergence svazku, společně se ale snižuje účinnost, resp. vznikají energetické ztráty. Ve většině případů se ale výrobci laser zaměřují na kvalitu svazku a s jistými ztrátami počítají.
- **Řídicí počítač** – pomocí softwaru lze nastavit veškeré volitelné parametry pro optimální chod laseru. Pohyby laseru jsou vedeny pomocí naprogramovaného souboru z CAD programů. Díky tomuto lze lasery jednoduše automatizovat.

1.4 Rozdělení laserů [26], [37]

S rozvíjející laserovou technologií se rozšiřují i jednotlivé kategorie druhů laserů. V tomto rozdělení bude zaměřeno na nejzákladnější druhy.

a) Podle aktivního prostředí:

- Pevnolátkové (Nd:YAG, Yb:YAG)
- Plynné (He-Ne, Ar, Kr, CO₂, KrO)
- Kapalinové (fluorescein, rhodamin)
- Polovodičové (GaAs, GaN, InAsSb)

b) Podle vlnových délek optického záření:

- Infračervené (780 nm – 1 mm)
- Ultrafialové (10 nm – 360 nm)
- Viditelné pásmo (360 nm – 780 nm)

c) Podle časového provozu:

- Kontinuální (CW) – nepřetržitá generace záření
- Pulsní (PW) – pulzy s vysokou opakovací frekvencí, může být různá doba trvání pulzu
- Impulsní (Qs) – vysoce energetické pulsy s nízkou opakovací frekvencí

d) Podle délky generovaného pulsu:

- Dlouhé pulsy

- Krátké pulsy
 - Velmi krátké pulsy
- e) Podle typu buzení:
- Opticky
 - Elektrickým výbojem
 - Elektronovým svazkem
 - Chemicky
 - Tepelnými změnami

1.5 Nejpoužívanější lasery v průmyslu [4], [5], [8], [9], [12], [13], [16], [22], [23], [24], [26]

Lasery využívá mnoho odvětví v průmyslu i napříč obory. Staly se nezaměnitelnou součástí výrobních a technologických postupů. Používají se pro gravírování nebo dokonce nahrazují již klasické metody dělení a svařování. Mezi nejběžnější a nejrozšířenější patří plyný CO₂ Laser. Dalším zástupcem je pevnolátkový Nd:YAG laser. Posledními zástupci jsou diodové a nejmodernější vláknové lasery.

Plyný CO₂ laser

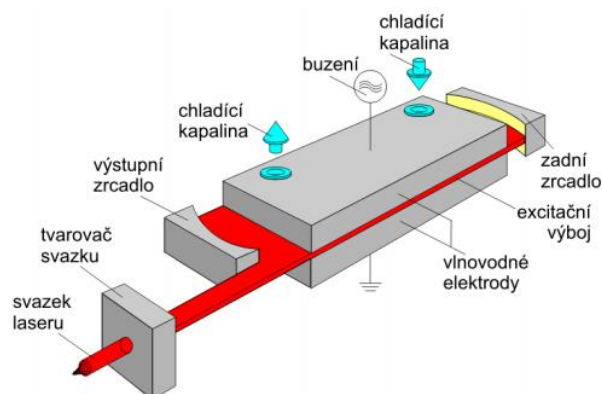
Plynné lasery jsou lasery s aktivním prostředím skládajícím se z plynu nebo jejich směsi, které lze budít různými způsoby – nejčastěji elektricky, radiofrekvenčními vlnami nebo opticky. Výhodou plyných laserů je schopnost pracovat v nepřetržitém režimu. Plynové lasery také disponují vyšší účinností a hospodárností díky přeměně elektrické energie ve výboj. Při práci v nepřetržitém režimu je ale jejich trvalý výkon poměrně malý. Mezi nejvýkonnější a nejpoužívanější lasery patří CO₂ lasery. Pracovní vlnová délka je 10,6 μm, tuto vlnovou délku nelze vést optickým vláknem a je nutno pro vedení paprsku používat zrcadla viz Obr. 5. Vzniká složitější dráha pro vedení paprsku, je nutná častá kalibrace a jsou zde vysoké nároky na čistotu a údržbu zrcadel. Další nevýhodou je velká hmotnost i velikost laserového pracoviště, požadavky na dodávku chladicí kapaliny a pracovních plynů. Nejčastější výkonnost CO₂ laseru je do 5 kW, jsou chlazeny difúzně a aktivní prostředí je buzeno radio-frekvenčním vlněním. CO₂ lasery jsou používány převážně pro průmyslovou aplikaci v řezání a svařování, kde je všeobecná účinnost až 20 % a maximální výkon až 20 kW.

Výhody

- Práce v nepřetržitém režimu
- Hospodárný chod

Nevýhody

- Složitější vedení paprsku
- Vysoký nárok na údržbu
- Velké zařízení



Obr. 5 Schéma CO₂ Slab laseru [23]

Pevnolátkový Nd:YAG laser

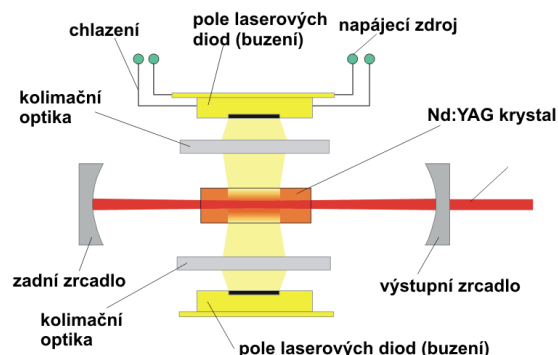
Pevnolátkové lasery mají pevné krystalické, nebo amorfni látky s příměsí vhodných aktivačních prvků. Buzení laseru je většinou optické pomocí xenonových výbojek nebo laserovými diodami. Nejpoužívanější pevnolátkový laser je Nd:YAG laser, kde YAG krystal (ytrium aluminium granát) je válcová matrice aktivního prostředí obsahující ionty Neodymu (Nd) a Yterbia (Yb) viz Obr. 6. Buzení prostředí je většinou pomocí výbojek nebo laserovými diodami. Účinnost laserů s výbojkami je okolo 3 %, naproti tomu s diodami až 20 %. Díky tomu se zvyšuje životnost a klesají provozní náklady. Výstupní svazek laseru Nd:YAG má vlnovou délku okolo 1 μm , při dosažení výkonu až 100 kW. Výhodou tohoto typu je schopnost udržovat velmi stabilní aktivní prostředí s velkou hustotou energie, která umožňuje generovat krátké pulzy o vysokém výkonu. Velikost energie dodané laserem v pulsu je až 100 J/ms. Proto se nejčastěji používají pro svařování v leteckém průmyslu a vrtání děr ušlechtilých ocelí. Velké nároky na chlazení jsou společně s vysokými náklady na provoz nevýhodami těchto laserů.

Výhody

- Velká hustota energie paprsku
- Možnost vrtání děr

Nevýhody

- Nutná údržba
- Vysoké náklady na provoz



Obr. 6 Schéma pevnolátkového laseru [23]

Diodový laser

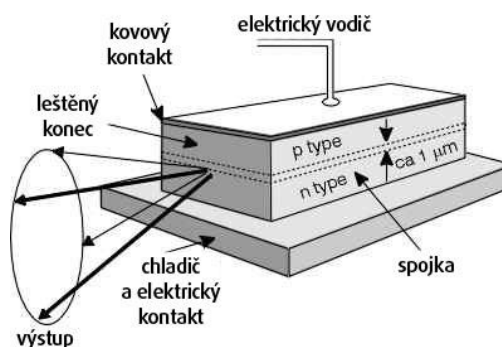
Aktivním prostředím je zde elektricky čerpaná polovodičová dioda, díky které je možné dosáhnout velkého optického zesílení. Tato skupina laserů je charakteristická svým složením pole laserových diod, kde se laserový paprsek vede přímo do fokusační optiky nebo na navázání do optického vlákna. Diodové lasery pracují jak pulsním, tak kontinuálním režimem s vlnovou délkou 780 – 980 nm. Laserový paprsek je zaměřován do plošky, která je oproti jiným, klasickým laserům větší, a proto mají tyto druhy časté využití ve svařování, povrchovém kalení, pájení, lepení, popouštění, přetváření nebo popisování. Vzhledem k nízkým vlnovým délkám lze svařovat dokonce i plasty. Diodové lasery viz Obr. 7 dosahují výkonu až 20 kW a účinnosti až 50 %.

Výhody

- Vysoká účinnost
- Svařování plastů

Nevýhody

- Nižší životnost stroje
- Vyšší pořizovací cena



Obr. 7 Schéma diodového laseru [23]

Vláknový laser

Jde o zástupce technologicky nejmodernějšího typu pevnolátkových laserů, kde aktivní prostředí je tvořeno dlouhým optickým křemíkovým vláknem obohaceným o prvky jako je Yb (ytterbiem), Er (erbiem) nebo Nd (neodymem). O buzení aktivního prostředí se stará série nízko výkonových laserových diod. Vybuzené záření je vedeno optickým vláknem přes spojku aktivního vlákna, kde na místo zrcadel jsou tzv. Braggovské mřížky. Přes tyto mřížky vede vlákno do výstupního kolimátoru, odkud vystupuje svazek laseru viz Obr. 7. Pracovní režim vláknových laserů je buď pulsní, kontinuální nebo kvazipulsní. Vzhledem k absenci zrcadel je vláknový laser bez mechanických optických součástí (zrcadla apod.), díky čemu se jedná o zcela bezúdržbový, výkonný (až 40 kW), efektivní (až 35% účinnost), skladný stroj s vysokou životností a modularitou (lze navyšovat výkon pomocí spojování laserových modulů).

Výhody

- Bezúdržbový
- Vysoký výkon
- Malé rozměry
- Dlouhá životnost



Obr. 8 Schéma vláknového laseru [23]

1.6 Porovnání jednotlivých druhů laserů [22], [23]

V tabulce Tab.1 jsou shrnuty a uvedeny základní informace ohledně jednotlivých typů laserů, které se v dnešní době používají. Vysvětlující označení jsou popsána pod tabulkou.

Tab. 1 Porovnání jednotlivých druhů laserů [22],[23]

Laser	Vlnová délka [nm]	Buzení	Účinnost [%]	Prac. režim	Výkon [W]	Životnost [hod]	Údržba	Aplikace
Plynný	10600	RF	10	CW/pulsní	10-250 kW	20 000	ANO	Z,G,Ř
		El.	25		až 5 kW			Ř,S
Pevnolátkový	1064	LD	7	CW	až 6 kW	10 000	ANO	ŘS
		lampy	3	pulsní	(100 W)			Z,G
Diodový	808-980	EL	60	PULSNÍ	až 20 kW	15 000	NE	S,K
Vláknový	1070	LD	30	CW	až 80 kW	100 000	NE	Ř,S
				QCW	(1,2 kW)			Z,G
				PULSNÍ	(100 W)			Z,G

Buzení: LD-laserové diody, RF-radiofrekvenčně, El.-elektrický výboj

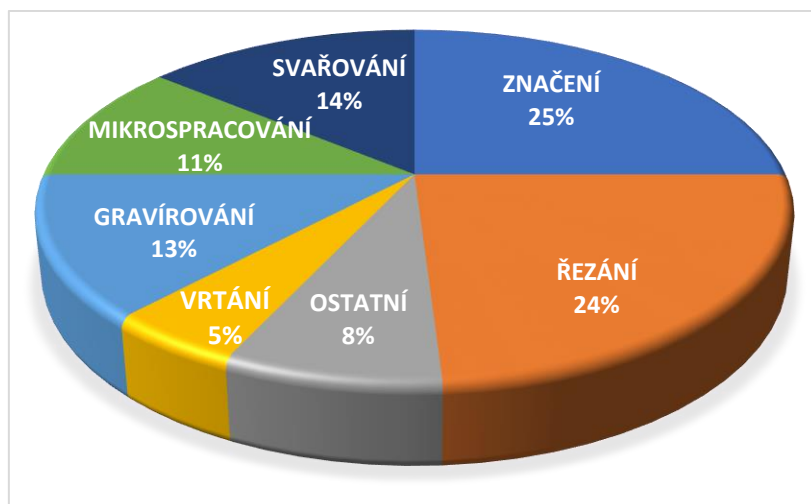
Účinnost: efektivita přeměny elektrické energie na světelnou

Pracovní režim: CW-kontinuální, QCW-kvazikontinuální, u pulsních laserů se udává hodnota energie v pulsu a doba pulsu, případně se udává výkon v závorce

Nejčastější aplikace: Z-značení, G-gravírování, Ř-řezání, S-svařování, K-kalení

1.7 Rozdělení využití laserové technologie v průmyslu [36]

Využití laserové technologie čítá mnoho aplikací. Všeobecné rozdělení využití této technologie je možné vidět v grafu 1. Největší využití stále zaujímá značení společně s řezáním materiálů, které následuje svařování a gravírování. Univerzálnost a typické vlastnosti umožňují této technologii rozmach do vícero odvětví a průmyslů.



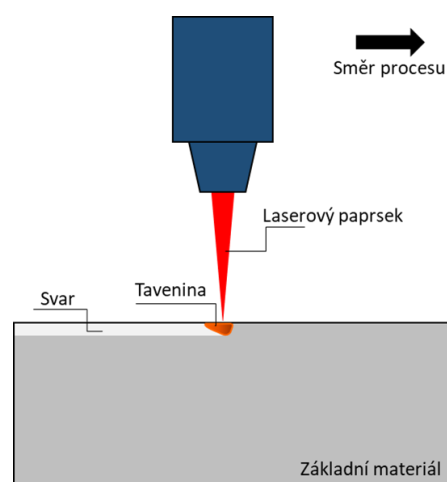
Graf 1 Využití laserové technologie [36]

2 TECHNOLOGIE LASEROVÉHO SVAŘOVÁNÍ [1], [12], [19]

Laserové svařování patří k moderním technologiím, které se využívá převážně pro svařování materiálů a součástí s požadavkem na velmi malou tepelně ovlivněnou oblast, hluboké a úzké svary a přesný a kvalitní svar bez trhlin. Svařování pomocí laserového paprsku umožňuje pracovat ve vysokých rychlostech a možnosti zautomatizování procesu svařování. Svarové spojení materiálu vzniká pod vysokou koncentrací tepla v malém bodě dopadu svazku. Tímto přenosem můžeme rozdělit metody svařování na dva typy.

2.1 Pulsní svařování [12], [16], [20], [26]

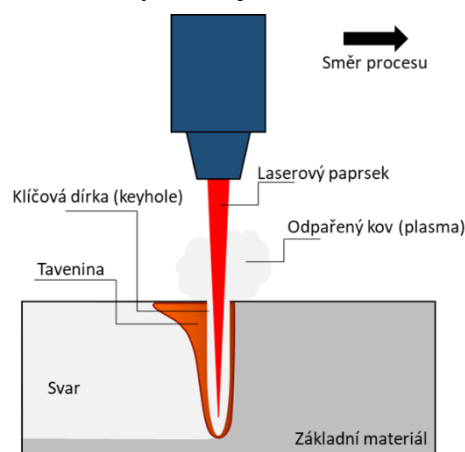
Jedná se o svařování s nízkou opakovací frekvencí, kde samotný chod svařování probíhá pulsním natavením svarových ploch. Následuje prodleva, kde zcela nebo částečně ztuhne svarová lázeň. Svařování probíhá při nízké hustotě výkonu, a tedy dochází jen k mírnému natavení ploch, a tedy i malé tepelně ovlivněné oblasti. Část energie, která je emitována do materiálu, se odrazí, zbytek se absorbuje viz Obr. 9. Svařovaný materiál se odpařuje jen z části. Svarová housenka je tvořena mnoha body, které se vzájemně překrývají. Svarový spoj je na pohled hladký, hloubka svaru je většinou menší než šířka svaru. Tento postup je hojně využíván v malosériové nebo kusové výrobě a u menších tloušťkách materiálů jako jsou například fólie. Zároveň se tento postup využívá i u obtížně svařitelných materiálů a u svarů, kde konstrukční řešení neumožňuje efektivně využít jinou metodu. Nejčastěji tuto metodu využíváme na pevnolátkových laserech.



Obr. 9 Kondukční svařování [47]

2.2 Penetrační svařování [12], [16], [20], [26]

V této metodě svařování probíhá paroplynový princip označovaný často jako „klíčová dírka“ (anglicky - key hole). Hustota záření dopadající na povrch materiálu je velmi silná, tímto se liší od kondukčního svařování viz Obr. 10. Pod vlivem dopadajícího paprsku vzniká plasma z odpařeného materiálu. Působením laserového paprsku se prohlubuje dutina a stěny dutiny tvoří taveninu. Plyny následně expandují a udržují ji otevřenou. Následně vytvořenou dutinu uzavře tavenina, která velmi rychle krystalizuje. Dle tohoto efektu lze vytvářet svary s velmi dobrým poměrem šířky a hloubky.



Obr. 10 Metoda Key hole [47]

2.3 Ochranné plyny [3], [17], [18]

Ochranné plyny u laserového svařování slouží ke stejnému účelu jako u ostatních metod svařování, tedy cíleně optimalizují svařovací proces použitím správných plynů. Hlavním úkolem ochranných plynů je ochrana svařovaného materiálu před vzdušným kyslíkem, resp. okolní atmosférou. Omezí se tak kontakt kyslíku, dusíku a vzdušné vlhkosti se svarovou lázní. Nedochozí tak k tvorbě vad jako jsou oxidy, póry a nitridy. Plyn také chrání optiku a odčukuje vzniklou plazmu vystupující ze svarové housenky. Volba ochranného plynu závisí na druhu svařovaného materiálu, typu laseru a jeho výkonu. Nejpoužívanější ochranné plyny jsou argon, helium, oxid uhličitý a dusík.

- **Argon** – jednoatomový inertní plyn, vyznačující se chemickou netečností. Na základě své měrné hmotnosti $1,7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ plní velmi dobře svou funkci ochranného plynu. Argon je těžší než vzduch, v atmosféře volně klesá. Při vhánění plynu při svařování tak vytváří dobrou ochranu svarové lázně. Argon je vhodné použít s lasery o výkonu do 3 kW. Vylepšení vlastností tohoto ochranného plynu lze docílit smícháním s heliem, kyslíkem nebo oxidem uhličitým.
- **Helium** – jednoatomový inertní plyn. Měrná hmotnost oproti argonu je desetinásobně menší, tedy pouze $0,16 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Je tedy lehčí než vzduch a pro ochranu svarové lázně je zapotřebí zvýšit tlak a průtok plynu na $30\text{--}35 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ do svarové lázně. Hlavní vlastností helia je vysoký ionizační potenciál, který snižuje tvorbu plynového plazmatu. Díky použití helia lze docílit vyšších svařovacích rychlostí než při použití argonu
- **Oxid uhličitý, dusík** – jsou reaktivní plyny, které při reakci s kovem mohou tvořit karbidy, oxidy nebo nitridy. Vzniká zde riziko snížení kvality výsledných svarů po mechanické stránce. Existují aplikace těchto plynů, kde je toto riziko tolerováno pro zlepšení vlastností, například u korozivzdorných ocelí dusík zajišťuje lepší korozivzdornost a lepší mikrostrukturu svarů.

3 POROVNÁNÍ METOD SVAŘOVÁNÍ [10], [12]

Při pohledu na ostatní metody svařování můžeme porovnat jednotlivé technologie podle základních parametrů, které jsou při svařování nejčastěji sledované. Dle výsledků lze vyhodnotit, že el. paprsek společně s laserovou technologií dosahují nejhlubších průvarů, společně s hustotou dodané energie do materiálu. Velkou výhodou je i velmi malá teplotně ovlivněná oblast po vytvoření svařence, která má velký vliv na výsledné mechanické vlastnosti. Jsou to i technologie umožňující pracovat bez přídavného materiálu. Zdají se být nejlepší variantou, ale nesou s sebou vysoké nároky na přípravu svarových ploch a pracoviště (tzn. pořizovací cena, náročnost na pracovní prostor), které zbylé technologie nevyžadují.

Tab. 2 Porovnání metoda svařování [10],[12].

Metoda	Hustota energie [W/cm ²]	Hloubka průvaru [mm]	Šířka/hloubka svaru [mm]	Svařovací rychlost [m/min]
Laser	10 ⁷ –10 ⁹	25	0,1-0,5	10
Plamen	10 ³	3	3	0,01
El. oblouk	10 ⁴	4	2	0,5-3
Plasma	10 ⁶	až 12	1	0,5-5
El. paprsek	10 ⁸	200	0,03	0,5-5

3.1 Vyhodnocení laserového svařování [6], [8], [10], [19], [25]

Technologie laserového svařování je moderní technologií přinášející spoustu užitečných vlastností do odvětví průmyslu. Ve strojírenské praxi se vyvyšuje svojí možností vytvoření hlubokých svárů s velmi úzkou svarovou housenkou.

Výhody

- velmi malá teplotně ovlivněná oblast
- vysoká kvalita svarového spoje
- velmi dobré mechanické vlastnosti svařence
- vysoká produktivita
- vysoké svařovací rychlosti
- nákladově efektivní výroba
- možnost automatizace
- svařování bez přídavného materiálu
- možnost svařování tenkých plechů (v řádech mikrometrů)
- přesné vedení
- tichý chod stroje
- jednoduchá regulace svařovacího procesu
- svařování heterogenních materiálů

Nevýhody

- vysoké pořizovací náklady zařízení
- účinnost přeměny energie je nízká
- požadavek na přesně vyrobené součásti
- problém se svařováním vysoce odrazivých materiálů

4 PŘÍPRAVA SVAROVÝCH PLOCH [5], [8], [10], [12]

Technologie laserového svařování je metoda svařování bez přídavného materiálu, proto je v praxi kladen velký důraz na přípravu součástí s vysokou kvalitou svarových ploch. Dalšími parametry, které mají vliv na správně vytvořený svar jsou správně a vhodně zvolené přípravky s vyšší přesností uložení a správně navrhnutým svarem.

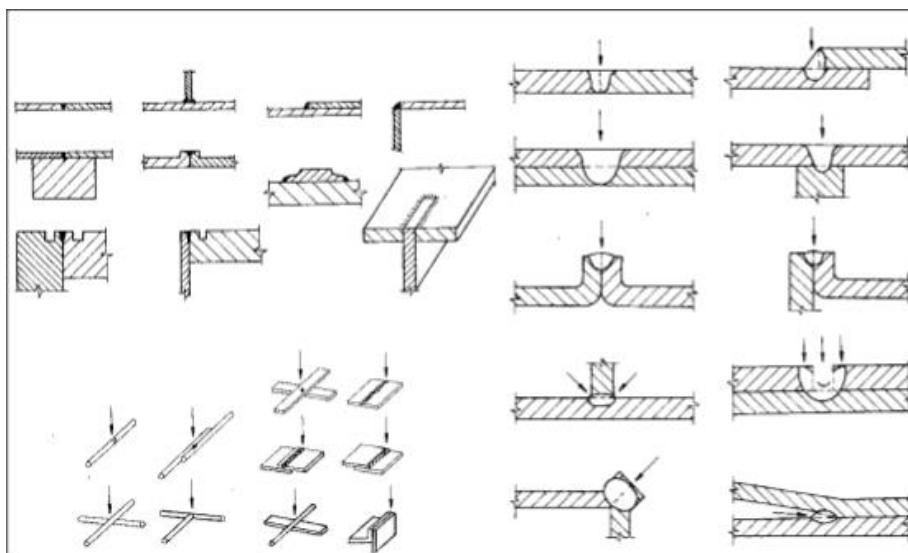
Při svařování laserem dbáme na čistotu svarových ploch. Nečistoty nebo tuky usazené na svarových plochách jsou při svařování, vlivem emitace velké energie z laserového paprsku, zcela odpařeny. Tyto výpary pak mohou iniciovat vady svarů ve formě puklin. Svařované plochy jsou k sobě umísťovány na velmi malou vzdálenost, která se pohybuje v řádech setin až desetin milimetru (0,05-0,2 mm). Pokud svařujeme velmi tenké plechy, vzdálenost svarových ploch je na tisíce milimetru. Z tohoto důvodu je povinnost zajistit rovinnost svarových ploch. Pokud by toto nebylo dodrženo, výsledný svar nebude dosahovat požadované jakosti a svarová housenka nebude celistvá.

Samotná příprava svarových ploch probíhá standartními způsoby – tedy ručním nebo strojním obráběním (broušení, frézování, řezání, soustružení).

4.1 Typy svarů pro laserové svařování [5], [8], [10], [12]

Laserové svařování je charakterizováno schopností provést téměř všechny typy svarových spojů, jaké se vytvářejí jinými druhy svařování jako je např. svar natupo, koutový bodový viz Obr. 11. Největší výhodou je vysoká jakost, štíhlost a hloubka sváru s minimální teplotně ovlivněnou oblastí.

Vzhledem k povaze svařování laserovým paprskem existuje jeden typ svaru, který lze provést pouze svařováním za pomoci laseru nebo elektronového paprsku. Jedná se o svařování překlátováním, tedy provaření dvou nebo více materiálů na sobě položených. Materiály mohou být různých typů a dokonce různých tlouštěk. Důraz je zde kladen na co nejtěsnější dotyk materiálů.

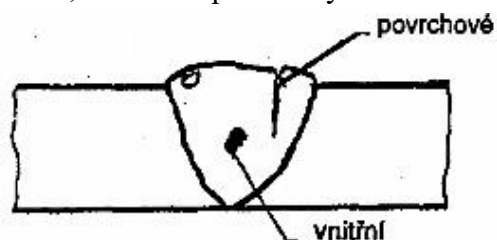


Obr. 11 Typy svarů provedených laserem [12]

4.2 Typy vad svarových spojů [8], [38], [39], [40], [41]

Průběh svařovacího procesu je velmi náročný a technologicky složitý postup spojování materiálu. Velkou roli zde hraje několik proměnných, na které je důležité se při vytváření svaru zaměřit, aby se zamezil výskyt vad ve výsledném svaru. Jelikož právě tyto vady, které mohou být viditelné (povrchové viz Obr. 12) nebo skryté (vnitřní viz Obr. 12), jsou prvními faktory pro snižování mechanických vlastností svařence. Při ustavení svařence do své pracovní pozice se může pod vlivem mechanického zatížení začít iniciovat křehký lom v místě dané vady. Je tedy maximálně důležité se těchto vad vyvarovat. Pokud už vada vznikne, je třeba ji zavčas odhalit pomocí přístrojové techniky nebo laboratorními zkouškami. Dle předepsaných předpisů rozeznáváme vady přípustné (tj. vady, které povoluje norma, technické podmínky nebo smluvní vzorek) a nepřípustné (tj. vady, které překračují stanovené hodnoty). Tyto vady mohou být také opravitelné nebo neopravitelné.

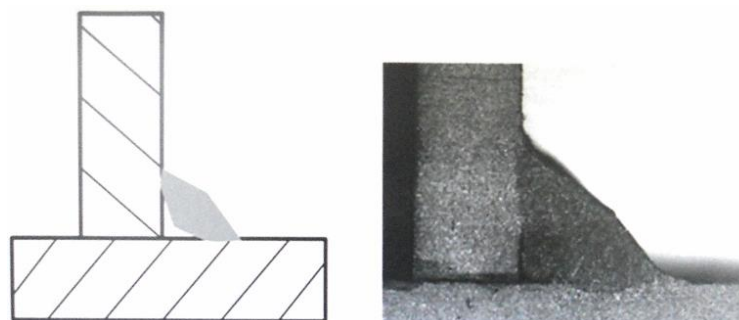
Existují tedy vady, o kterých je známo, že nemají vliv na bezpečnost provozu, a proto svařence neabsolvují další dodatečné opravy.



Obr. 12 Vady svarových spojů [39]

Základní druhy vad svarových spojů

- **Trhliny horké** – vznikají na základě chemického složení základního materiálu (vysoký uhlík, mangan, popř. vyšší obsah síry) při teplotách mezi 800 – 900 °C
- **Trhliny studené** – častý výskyt při svařování feritických a martenzitických ocelí při působení vodíku ve svaru, který se do svarové lázně dostal z okolní atmosféry, z nedostatečně očištěných svarových ploch nebo vlhkých elektrod. Vznikají po svařování a vychladnutí svaru při svařování pod 3000 °C.
- **Zápaly** – Nejčastější důvod vzniku zápalu jsou špatně nastavené svařovací parametry nebo nesprávné vedení svařovací oblouku. Nejčastější výskyt těchto vad je u koutových svarů. Jedná se o natavené prohloubení na hranicích svarové housenky a základního materiálu.
- **Neprůvary** – Jedná se o defekty svarového spoje vznikající při nedokonalém natavení základního materiálu a svarové housenky viz Obr. 13. Velký vliv na vznik má velká svařovací rychlost, nízký svařovací proud, předběhnutí lázně, vysoká housenka nebo velký průměr použité elektrody.



Obr. 13 Neprůvar svaru [38]

5 BEZPEČNOST PRÁCE PŘI POUŽÍVÁNÍ LASERŮ [26], [32], [33], [34]

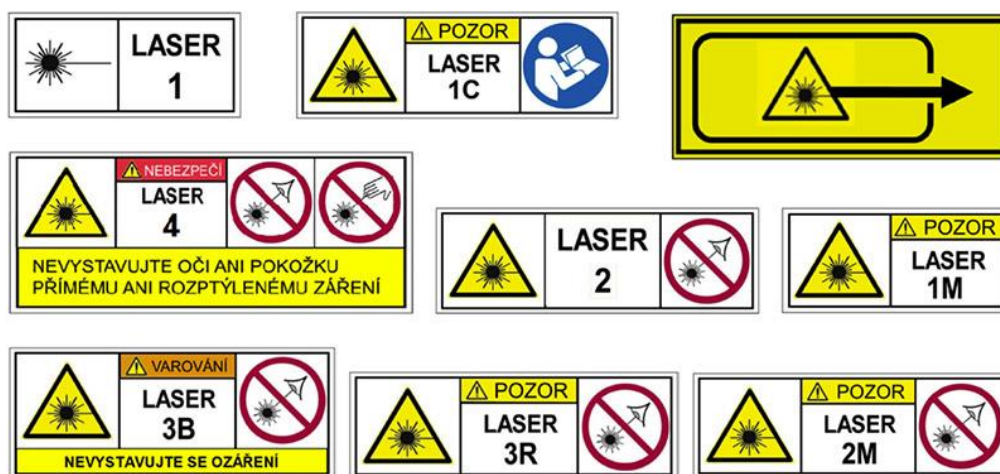
Práce s různými zařízeními je vždy doprovázena školením a složkou platných právních předpisů ohledně bezpečnosti práce s danými zařízeními. Na základě těchto opatření se výrobní podniky snaží eliminovat počet pracovních úrazů na svých pracovištích. U rizikových oblastí v podnicích jsou ve většině případů výstražné nebo upozorňovací tabule pro informování zaměstnanců o možném nebezpečí. Konkrétně u laserových zařízení jsou tato opatření zcela žádoucí, jelikož poranění laserovým paprskem bývají velmi vážná. Každý typ laseru musí být označen příslušnou bezpečnostní tabulkou viz Obr. 14.

Při práci s laserovým paprskem jsou nebezpečí rozdělena do dvou základních skupin:

- **nepřímé nebezpečí** – jedná se o nebezpečí vyvolané nepřímým zásahem laserového paprsku (jeho vedlejšími účinky). Do této skupiny se zařazují uvolněné nebezpečné látky a zplodiny z materiálů nebo látek, které byly pod vlivem laserového paprsku zasaženy.
- **přímé nebezpečí** – jedná se o nebezpečí, které je vyvolané přímým kontaktem laserového paprsku, například s lidskou kůží nebo okem. Nejčastěji se jedná o popáleniny nebo ztráty vidění, popř. poruchy rohovky.

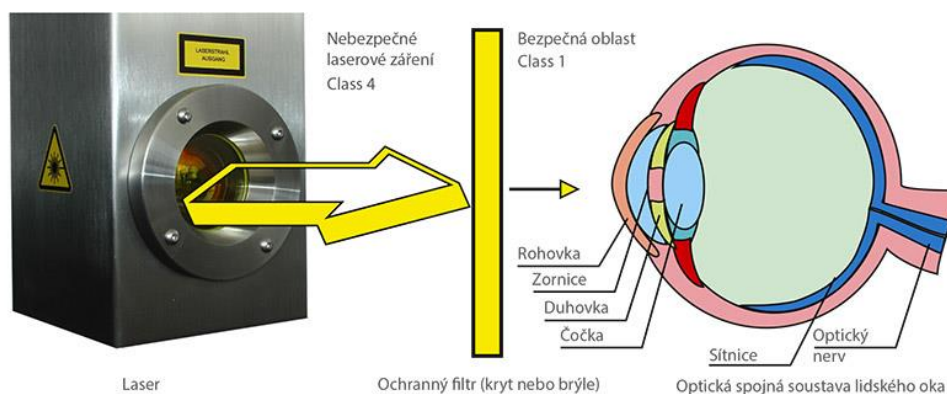
Při zasažení očí laserovým paprskem dochází vlivem kontaktu vysoce energetického svazku mířícího do jednoho bodu k poškození sítnice, resp. její popáleniny. V horším případě může dojít až k poškození rohovky nebo ztrátě zraku. Při kontaktu laserového paprsku s kůží závisí hlavně na typu laseru, jeho výkonu společně s dobou kontaktu. Nejčastěji se jedná o popáleniny. Při výkonnějším laseru může dojít až hlubokému zářezu do lidské tkáně.

Jednotlivé bezpečnostní typy (resp. třídy) laserů jsou rozděleny na základě MPE (maximum permissible exposure – maximální přípustná dávka ozáření). Samotné úrovně odpovídají maximální úrovni záření, které může být vystaveno oko nebo pokožka bez okamžitého nebo pozdějšího poranění. Úrovně ozáření jsou vztaženy k vlnové délce laserového svazku, délce impulsu nebo délce ozáření.



Obr. 14 Bezpečnostní tabulky pro práci s lasery [32]

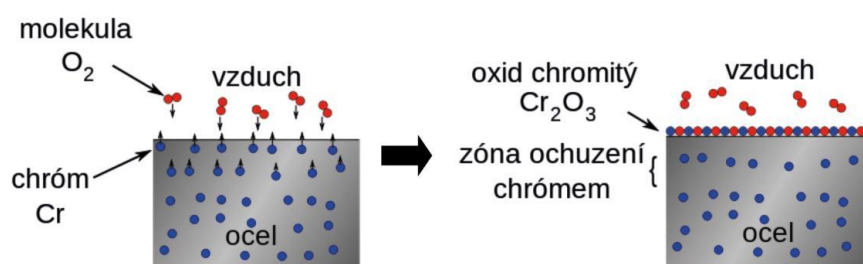
- **Laserové zařízení třídy I.** – při provozu není umožněn přístup obsluhy k záření, ale je bezpečné i po dlouhodobém sledování paprsku. Jako ochranné pomůcky jsou doporučovány ochranné brýle.
- **Laserové zařízení třídy I M.** – bezpečná zařízení během provozu, riziko vzniku poškození zraku při záměrně dlouhodobém sledování paprsku pomocí optických pomůcek jako například dalekohled – vzniká zde oslňující efekt záření.
- **Laserové zařízení třídy I C.** – zařízení pro přímou aplikaci laseru na vnitřní lidské tkáň nebo pokožku. Při používání této třídy je výrazně doporučeno používání osobních ochranných pomůcek v podobě ochranných brýlí.
- **Laserové zařízení třídy II.** – při provozu není umožněn přístup k záření, při záměrném pohledu do svazku hrozí oslnění, zábleskové oslepnutí nebo chvilkové zrakové vjemy. Vše probíhá dočasně, pokud byl pohled dostatečně rychle odvrácen. K ochraně proti ozáření slouží brýle nebo reflex obsluhy v podobě mrknutí nebo otočení hlavy.
- **Laserové zařízení třídy II M.** - zařízení vyzařující viditelné laserové svazky, která jsou bezpečná pro krátkodobá ozáření pro oči bez ochranných pomůcek. Při nízké úrovni okolního světla zde hrozí oslnění, záblesková slepota nebo přetrvávající zrakové vjemy.
- **Laserové zařízení třídy III B.** – riziko a velikost zranění se zvyšuje s délkou ozáření, doporučuje se používat osobní ochranné pomůcky pro zrak. Chvilkové ozáření způsobuje ve většině případů zábleskovou slepotu, oslnění a přetrvávající zrakové vjemy.
- **Laserové zařízení třídy III R.** – u této třídy již existuje riziko způsobení vzplanutí hořlavých materiálů při kontaktu s laserovým paprskem. Se silou paprsku může dojít i k malému poškození oka nebo pokožky při přímém kontaktu.
- **Laserové zařízení třídy IV.** – při kontaktu s pokožkou nebo přímým zásahem paprsku do oka hrozí nebezpečné a trvalé poškození (spáleniny, oslepnutí). Hrozí zde nebezpečí vzniku požáru. U těchto zařízení je prostor laserového paprsku krytý ochranným filtrem jako je na Obr.15.



Obr. 15 Laserové zařízení třídy IV. [32]

6 KOROZIVZDORNÉ OCELI A VLASTNOSTI [27], [28], [29], [30], [42]

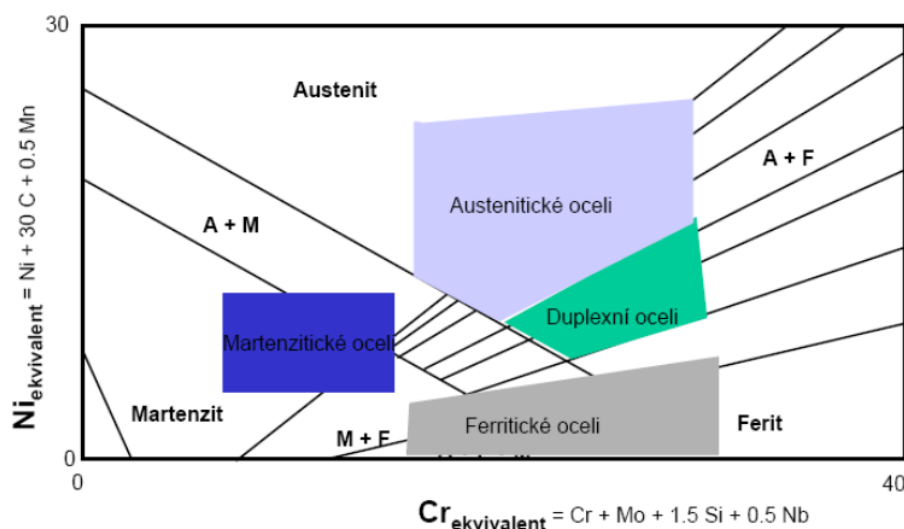
Do kategorie korozivzdorných ocelí a jejich slitin zařazujeme konstrukční kovové materiály, které obsahují více než 12 % chromu a méně než 1,2 % uhlíku, bez popř. s dalšími legujícími prvky jako jsou například Ni (až 30 %), Mn (až 24 %), Mo, Cu a další. Charakteristickým rysem jsou nízké obsahy S a P, které jsou většinou do 0,03 %. Jedná se tedy o ušlechtilé oceli s přesně daným chemickým složením. Samotná korozivzdornost těchto materiálů je způsobena jevem, který se nazývá pasivace. Jde o schopnost materiálu vytvářet v reakci s vzdušným kyslíkem tenkou oxidační vrstvičku (oxid chromitý), která chrání materiál před korozí viz Obr. 16. Pokud je tato vrstva narušena, mohou vznikat lokální formy koroze (např. bodové, švové). Při mechanickém poškození má vrstva schopnost regenerace, resp. spontánně se obnovuje. Pro ještě lepší korozní odolnost jsou přidávány legující prvky, které korozivzdornost navyšují.



Obr. 16 Princip oxidační vrstvy oxidu chromitého [42]

6.1 Základní rozdělení korozivzdorných ocelí [27], [28], [29], [30], [31], [43], [44]

Rozdělení ocelí můžeme brát podle více faktorů, nejčastější je ale na základě struktury. Tedy podle chemického složení a poměru jednotlivých prvků. Díky tomu se může dosáhnout různých typů mikrostruktur, a tedy jejich různých vlastností. Jednotlivé druhy korozivzdorných ocelí jsou zobrazeny na Obr. 17. Hlavním rozdílem mezi nimi je rozdíl chemického složení, mimo obsah uhlíku, který je u korozivzdorných ocelí vždy nízký, se zde řeší hlavní poměr mezi prvky Cr a Ni. Dle poměru obsahu těchto prvků, můžeme měnit strukturu oceli, a tím i vlastnosti, popř. cenu.



Obr. 17 Druhy korozivzdorných ocelí [43]

6.1.1 Austenitické oceli

Jedná se nejčastěji používanou korozivzdornou ocel, která je nemagnetická a vysoce odolná proti korozi. Disponuje dobrou svařitelností, vysokou houževnatostí, žáruvzdorností a žarupevností. Velkou nevýhodou je vysoká výrobní cena (z důvodu velkého obsahu Ni), další nevýhodou je špatná obrobitelnost nebo sklon ke koroznímu praskání pod napětím. Využívá se nejčastěji na místech, kde se dbá na vysokou hygienu díky snadnému čištění (kuchyňské potřeby). Používá se také v chemickém průmyslu a průmyslu energetiky.

Typické složení austenitické korozivzdorné oceli

Tab. 3 Chemické složení Austenitické korozivzdorné oceli [44].

Označení prvku	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	C [%]
Hodnota	16-28	6-34	0-6	max. 0,2

6.1.2 Martenzitické oceli

Částečně svařitelné oceli (za splnění jistých podmínek => $C < 0,15\%$) jsou magnetické a vysoce pevné korozivzdorné oceli, které obsahují minimální množství Ni. Jsou tedy velmi levné a využívají se na místa, kde jsou vysoké nároky na pevnost, a vzhledem k nižší korozní ochranně, než jsou austenitické nebo feritické oceli, se využívají v prostředí vody, vodní páry (vodní turbíny), potravinářském průmyslu a zdravotnictví. Pokud je obsah Ni a Mo vyšší, může se tato ocel použít i v prostředí mořské vody.

Typické složení martenzitické korozivzdorné oceli

Tab. 4 Chemické složení Martenzitické korozivzdorné oceli [44].

Označení prvku	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	C [%]
Hodnota	12-18	4-6	0-6	0,05-1

6.1.3 Feritické oceli

Nekalitelné oceli s vyšší pevností než uhlíkaté oceli. Tyto oceli mají náchylnost ke křehnutí za vysokých teplot, která význačně ovlivňuje mechanické vlastnosti. Feritické oceli jsou vhodným materiálem pro svařování elektrickým odporem, s touto technologií svařování je zde riziko klesající tažnosti. Disponují dobrou korozní a žárovou odolností, a tedy hlavní využití těchto ocelí nacházíme v energetickém průmyslu na díly pro tepelné výměníky, součásti kotlů a předhřívače vzduchu.

Typické složení feritické korozivzdorné oceli

Tab. 5 Chemické složení Feritické korozivzdorné oceli [44].

Označení prvku	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	C [%]
Hodnota	13-30	4-6	0-6	<0,1

7 PRAKTICKÁ ČÁST

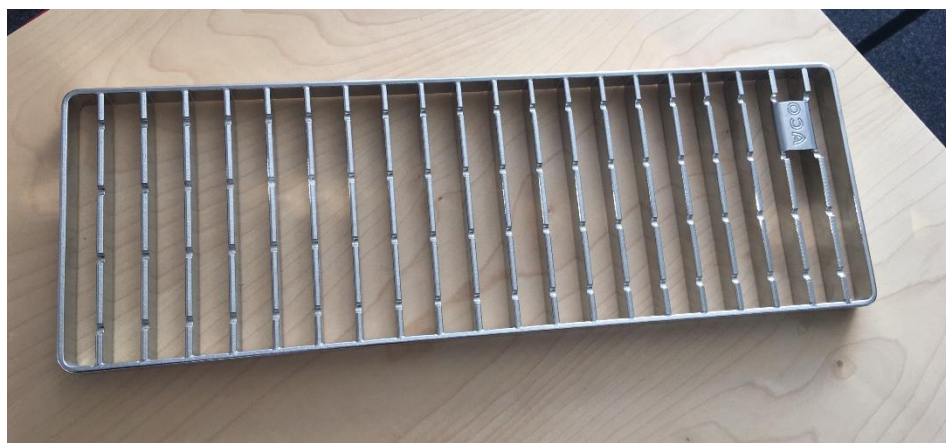
Experimentální část této práce se zabývá návrhem úpravy výroby polotovarů a následným posouzením výsledků dle měření drsnosti, rovinnosti a po svaření i makrostruktury svarového spoje. Jednotlivé vzorky byly svařeny na stejném zařízení i se stejnými svařovacími parametry.

Téma této bakalářské práce je ve spolupráci s firmou ACO Industries, která se zabývá výrobou odvodňovacích systémů pro vnitřní a venkovní odvodnění. Jejich produkce zahrnuje zakázkovou i sériovou výrobu. Právě při sériové výrobě je kladen vysoký nárok na spolehlivost a rychlost výroby. ACO Industries je vybavena laserovým svařovacím pracovištěm. Konkrétně se jedná o diodový laser značky LASERLINE, model LDM 2500-60, který je na robotickém rameni, svařování je tedy automatizované a uzpůsobené pro sériovou výrobu. Firmou byl zadán, pro tuto bakalářskou práci, produkt, který je svařován na tomto zařízení.

7.1 Popis zadané součásti

Hlavními produkty firmy jsou odvodňovací systémy kanálů, odpadů a žlabů zapuštěné v zemi nebo podlaze, které mohou odvádět odpadní vodu nebo dokonce chemikálie. Již zmíněné produkty jsou osazeny i pohledovými krycími příčkovými rošty. Dle přání zákazníka je možné nakonfigurovat kombinaci roštu s daným žlabem. Dané rošty jsou většinou zátěžové a jsou vyráběny z různých tloušťek. Vzhledem k velikosti zakázek bylo nutné zrychlit výrobu těchto produktů a tyto rošty se začaly vyrábět na robotickém laserovém pracovišti. Tato součást byla zvolena jako téma bakalářské práce.

Zvolená součást je příčkový zátěžový rošt s protiskluzovými prvky – viz Obr. 18. Základní rozměry roštu jsou 500x165x20 mm. Rošt je tvořen 20 příčkami, které jsou po obvodu kontaktních ploch s rámem svařeny. Samotné příčky jsou stříhány z pásovinu plechu na výstředníkovém lisu ve střížném nástroji. Ze stejného polotovaru je připravován i rám roštu, který je poté ohýbán a ručně svařen.



Obr. 18 Příčkový zátěžový rošt

7.1.1 Materiálové vlastnosti

Pro výrobu celého produktu je používána korozivzdorná ocel 1.4301 (AISI 304, X5CrNi 18-9), která disponuje vynikající odolností vůči korozi v přirozeném prostředí (voda, venkovská nebo městská atmosféra). Ocel je velmi dobře svařitelná, a to i bez přídavného materiálu. Je tedy velmi vhodným materiálem pro laserové svařování. Chemické složení je uvedeno v tabulce 6 dle dat z Přílohy 1 a mechanické vlastnosti v tabulce 7 dle dat viz Příloha 1.

Tab. 6 Přesné chemické složení oceli 17 240.

Označení prvku	Cr [%]	Ni [%]	Mn [%]	Si [%]	P [%]	C [%]	S [%]	N [%]
Ocel 1.4301	18,02	8,06	1,76	0,33	0,031	0,03	0,001	0,064

Tab. 7 Mechanické vlastnosti oceli 17240.

Mechanické vlastnosti	Mez kluzu Rp 0,2 [MPa]	Mez pevnosti Rm [Mpa]	Tažnost A [%]
Ocel 1.4301	287	626	51,9

Odhad mikrostruktury pomocí Schaefflerova diagramu

Schaefflerův diagram je možno použít pro zjištění mikrostruktury korozivzdorných ocelí. Struktury těchto ocelí závisí na obsahu prvků, které oblast tuhého roztoku γ zužují (tj feritotvorné prvky), a prvků, které tuto oblast naopak rozšiřují (tj. austenitotvorné prvky). Dle těchto prvků jsou udávány pojmy ekvivalent niklu $Ni_{ekv.}$ a ekvivalent chromu $Cr_{ekv.}$. Z výsledných hodnot ekvivalentů byly hodnoty vyneseny do Schaefflerova diagramu viz Obr. 19, a tedy zjištěna mikrostruktura používané oceli.

Ekvivalent Niklu se počítá podle vzorce:

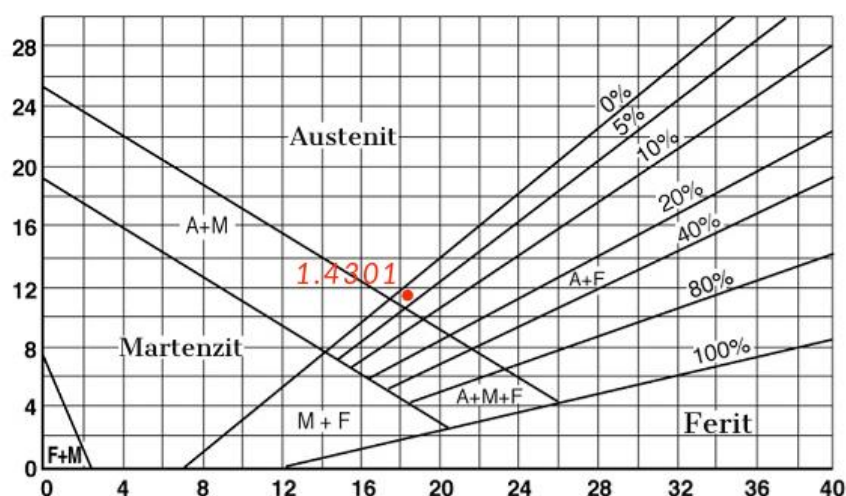
$$Ni_{ekv.} = \%Ni + 30 \cdot \%C + 0,5 \cdot \%Mn + 30 \cdot \%N \quad (9.1)$$

$$Ni_{ekv.} = 8,06 + 30 \cdot 0,03 + 0,5 \cdot 1,76 + 30 \cdot 0,064 = 11,76 \%$$

Ekvivalent Chromu se počítá podle vzorce:

$$Cr_{ekv.} = \%Cr + \%Mo + 1,5 \cdot \%Si + 0,5 \cdot \%Nb \quad (9.2)$$

$$Cr_{ekv.} = 18,02 + 0 + 1,5 \cdot 0,33 + 0,5 \cdot 0 = 18,515 \%$$

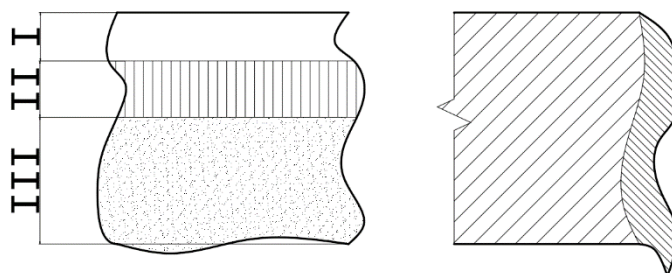


Obr. 19 Schaefflerův diagram [29]

7.1.2 Posouzení aktuální sériové výroby

Dosavadní postup výroby příček pro výrobu roštu je na výstředníkovém lisu v postupovém střížném nástroji. Výběr této metody je vhodný díky možnosti automatizace stříhání v postupovém střížném nástroji viz Obr. 21, díky čemu se dosahuje vysoké produktivity. Kvalita stříhu je dostačující, ale není zajištěna dokonalá rovinnost kontaktních ploch v přípravku při svařování. Hlavním důvodem je charakteristický tvar střížné plochy, jež je charakterizována třemi pásmy, která jsou znázorněna na Obr. 20.

- I-Pásma elastické deformace vzniklé při vnikání nástroje do materiálu
- II-Pásma hladké a lesklé střížné plochy, která je tvořena plastickým stříhem
- III-Samovolné oddělení materiálu pod vlivem smykového napětí



Obr. 20 Schéma střížné plochy

Výhody

- Ideální pro sériovou výrobu
- Přesné vedení materiálu
- Součásti bez TOO

Nevýhody

- Kontrola stavu střížníku
- Hluk na při chodu stroje
- Velký nárok na plochu stříhací linky
- Pro automatizaci nutné další stroje



Obr. 21 Střížná linka

Právě I a III pásma ovlivňuje kvalitu svarové plochy při svařování. U I pásma je možné vidět mírné zaoblení a jistý úbytek materiálu při vniku nástroje. Tato část materiálu může následně chybět při samotném svařování. Naopak u III pásma, kde se materiál samovolně oddělí, vzniká otrp, který naopak přebývá a vytváří jakýsi přídatný materiál pro svařování. Takto připravená svarová plocha je dostačující pro laserové svařování, které dokáže svařovat bez přídatného materiálu, ale ne vyhovující. Hrozí zde možné problémy vzniklé na základě otupeného nástroje při stříhání materiálu. Výsledek tohoto otupení vyústí v nekvalitně vyhotovené střížné ploše viz Obr. 20. Hrozí zde tedy výskyt větší mezery mezi svarovými plochami a součásti se vlivem nedostatku materiálu nemusí dokonale svařit.

7.1.3 Svařovací proces

Svařování součástí probíhá pomocí laserového paprsku ve firmě ACO Industries a.s. při standardních technologických podmínkách. Samotné svařovací pracoviště je uzavřeno v ochranném boxu z důvodu bezpečnosti. Svařovací hlava je připevněna na robotickém rameni, které vede laserový paprsek. Svařovací zařízení je značky LASERLINE, model LDM 2500-60 (diodový laser) viz Obr. 22.

Laser LDM 2500-60 je diodový laser firmy LASERLINE.

Technické parametry:

- Výrobce – LASERLINE
- Vlnová délka – 900–1080 nm
- Výkon – 2,5 kW



Obr. 22 Laserové pracoviště v ACO Industries

Robotické rameno KUKA KR 60-3

Flexibilní a cenově nejlepší pracovní robot ve své třídě který disponuje libovolnou montážní polohou s nosností ramena až 95 kg.

Technické parametry:

- Výrobce – KUKA
- Nosnost – až 95 kg
- Přesnost – až $\pm 0,2$ mm
- Dosah – 2,033 m
- Hmotnost - 665 kg

Polotovary pro svařování jsou usazovány do pneumatického svařovacího přípravku, který ustavuje součásti pro svařování viz Obr. 23. Přípravek je vlivem vysokých teplot při svařování chlazen vodním okruhem.



Obr. 23 Svařovací přípravek v ACO Industries

7.2 Návrhy úpravy polotovarů [5], [26], [35], [45], [46]

Kvalitní příprava polotovarů pro sériovou výrobu je velmi důležitým faktorem každého výrobního podniku. Důraz je kladen na předepsanou přesnost a hlavně opakovatelnost. Aktuální výroba splňuje dané parametry, ale je potřeba dbát na správně seřízenou výrobní linku s kvalitními nástroji při stříhání.

7.2.1 Příprava pomocí řezání na pásové pile

Jako první metoda byla zvolena metoda třískového obrábění, kde hlavním a dominantním strojem pro tuto přípravu je pásová pila – viz Obr. 24. Tato metoda byla první volbou z hlediska velké dostupnosti stroje na dílnách firmy a také rychlosti výroby. Řezání na pásové pile umožňuje řezat více příček najednou a lze provozovat i více strojovou obsluhu. Efektivita výroby je zde tedy na vysoké úrovni.

Výhody

- Možnost řezání několika pásů najednou
- Více strojová obsluha
- Poloautomatický chod
- Rovinný řez

Nevýhody

- Mastné součásti od emulze
- Delší výrobní časy
- Možnost vzniku otřepu
- Velmi nízká přesnost výroby



Obr. 24 Pásová pila

7.2.2 Příprava pomocí řezání pomocí laserové paprsku

Druhá metoda byla zvolena dle možností výroby ve firmě, a to příprava pomocí laserového paprsku – viz Obr. 25. Tato technologie byla vybrána na základě vysoké řezné rychlosti, a tedy vysokého objemu výroby. Vzhledem k tloušťce materiálu 4 mm je zajištěna i vysoká jakost a kvalita řezné plochy (Ra 1,6). Výhodou je i minimální deformace výpalků. Velkou nevýhodou laseru, resp. obsluhy laseru je, pokud je laserové pracoviště špatně seřízeno (špatná fokusace, špinavá čočka, průvan v řezací komoře), že může vzniknout spousta proměnných, které ovlivní výslednou kvalitu svarové plochy, jako je například vytvoření otřepů.

Výhody

- Rychlá a efektivní výroba
- Automatizace stroje
- Jednoduchá změna programu
- Vhodné pro sériovou výrobu

Nevýhody

- Teplotně ovlivněný řez
- Malý prořez tabule plechu
- Vysoké pořizovací náklady



Obr. 25 Laserové pracoviště

7.2.3 Příprava pomocí řezání vodním paprskem

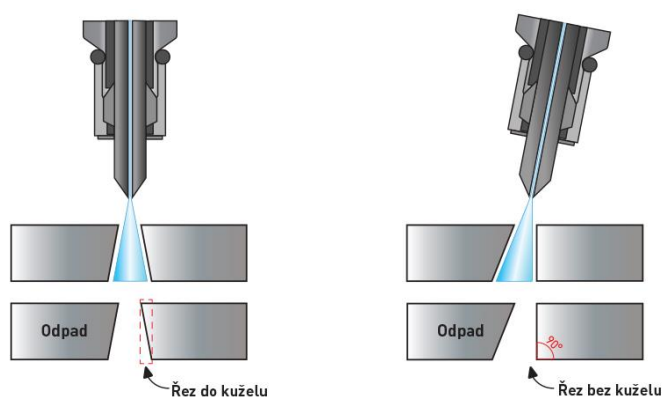
Třetí metoda zvolená pro přípravu součástí byla nekonvenční výroba pomocí vodního paprsku – viz Obr. 26. Tato technologie byla vybrána kvůli kvalitě rezné plochy bez teplotně ovlivněné oblasti a vzniku mikrotrhlin. Princip dělení spočívá v obrušování materiálů tlakem vodního paprsku, který je čistý nebo obsahuje abraziva. Díky abrazivům se zvyšuje účinnost samotného paprsku. Přidávají se přírodní abrazivní materiály jako je například křemičitý písek, korundová nebo olivínová zrna. Jedná se o moderní, kvalitní a ekologickou metodu dělení materiálu, kde díky tzv. studenému řezu nevznikají žádné změny struktury, žádné mechanické ani fyzikální změny a materiál je připraven pro následné operace bez dalšího opracování. Výhodou vodního paprsku oproti laseru je velká využitelnost polotovaru, jelikož mezera mezi jednotlivými řezy může být až 3 mm. S vodním paprskem je možné obrábět materiály s velmi vysokou pevností, ale i měkké, křehké a houževnaté materiály. Přesné vedení paprsku zajišťuje počítač. Nevýhodou vodního paprsku je kuželovitost rezného paprsku. Vodní paprsek se od opuštění trysky začíná rozšiřovat, což neumožňuje dosáhnout dokonale kolmých rezných ploch. Eliminace tohoto problému ale může jednoduše vyřešit náklon hlavice vodního paprsku, díky němuž lze získat jednu stranu řezu bez kuželového zkosení.

Výhody

- Řez bez TOO
- Kvalitní rezná plocha
- Využitelnost polotovaru

Nevýhody

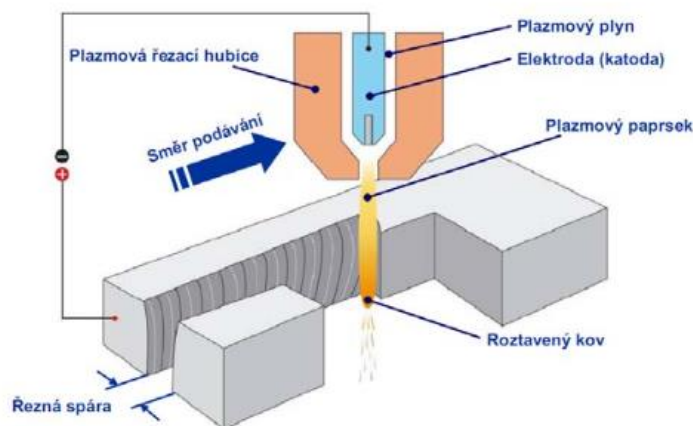
- Drahá metoda
- Kuželový řez
- Dlouhé výrobní časy
- Sušení vyřezaných součástí
- Nevhodné pro sériovou výrobu



Obr. 26 Schéma vodního paprsku [45]

7.2.4 Příprava pomocí řezání plazmou

Řezání materiálu pomocí paprsku plazmy je velmi častou součástí strojírenských podniků. Princip dělení materiálu plazmou – viz Obr. 27 – je dělení materiálu za pomoci vysoce žhavého ionizovaného plynu, někdy nazývaného jako čtvrté skupenství, tvořeného pozitivními a negativními ionty, elektrony a vybuzenými atomy a molekulami. Tomuto plynu se říká plazma a vzhledem k jejím vysokým teplotám (až 30 000 °C) může dělit většinu kovových materiálů, a to až do tlouštěk 180 mm. Plazmové dělení materiálů může probíhat ve velkých rychlostech. Hlavní důvod, proč tato technologie nebyla zvolena jako návrh pro přípravu součástí, je velká teplotně ovlivněná oblast a velmi nekvalitní rezná plocha. Při vstupu paprsku do materiálu vzniká rádius, který je pro kvalitní přípravu svarové plochy pro laserové svařování nežádoucí.



Obr. 27 Schéma řezání plazmou [35]

7.3 Měření drsnosti

Měření drsnosti probíhalo na mobilním drsnoměru značky Taylor Hobson, model Surtronic S128 – viz Obr. 28. Jedná se o všestranné mobilní měřicí zařízení s možností měření drsnosti kdekoli je potřeba. Díky interní baterii není potřeba mít přístroj připojený k pevné síti a možnosti ukládání dat přímo na paměťového zařízení je ideálním strojem pro několikadenní měření bez nutnosti použití stolního počítače. Jednotlivé vzorky byly upnuty do svěraku a vyrovnány do vodorovné polohy vůči měřicímu hrotu drsnoměru. Měřicí parametry byly zvoleny pro všechny vzorky stejné (filtr vlnové délky $\lambda_c=0,8$ mm; délka měření = 4 mm, měřicí rozsah = 100 μm), kromě vzorku z pásové pily. U tohoto vzorku byla při nastavení měřicího rozsahu 100 μm zjištěna přístrojem chyba měření. Řešením tohoto problému bylo zvýšení měřicího rozsahu na 400 μm , kde délka měření a filtr vlnové délky λ_c zůstaly stejné. Měření drsnosti bylo měřeno na každém vzorku 5x a vždy bylo změněno místo měření. Získané výsledky byly od každé metody zaznamenány a sepsány do jednotlivých tabulek.

Technické parametry:

- Výrobce – Taylor Hobson
- Měřicí rozsah – 400 μm
- Rozlišení – 50 nm
- Možná délka měření – 0,25-25 mm
- Životnost baterie- 2000 měření



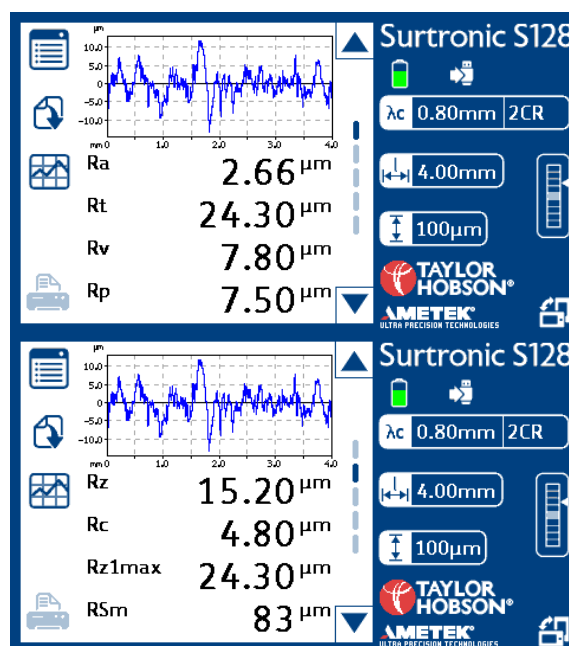
Obr. 28 Drsnoměr Taylor Hobson

Výsledky technologie stříhání

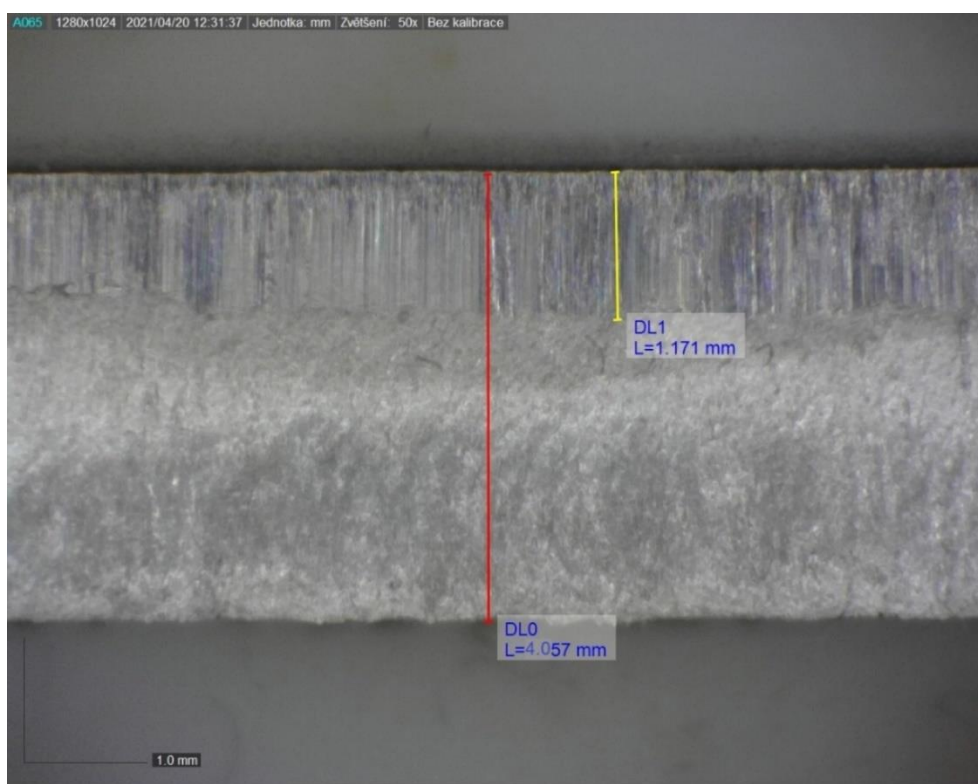
Tab. 8 Hodnoty drsnosti metody stříhání.

Číslo měření	Ra [μm]	Rz [μm]	Rsm [μm]
1.	2,66	15,2	83
2.	0,58	3,6	101
3.	0,73	4,7	87
4.	2,64	14,1	102
5.	0,55	3,4	99

Dle výsledků z prvního měření (viz Obr. 29) je velmi dobře zobrazen rozdíl kvality ploch při stříhání viz Obr 30, což je vidět z Tabulky 8. Hodnoty $Ra \leq 0,73$ byly změřeny v oblasti I. fáze stříhu materiálu, tedy při vniku nástroje do materiálu, které odpovídají pohledovému zhodnocení drsnosti povrchu. Horší výsledky byly získány z oblasti fáze utržení materiálu při stříhu. Výsledky této technologie jsou dostačující z hlediska kvality připravených ploch



Obr. 30 Měření drsnosti povrchu metody stříhání



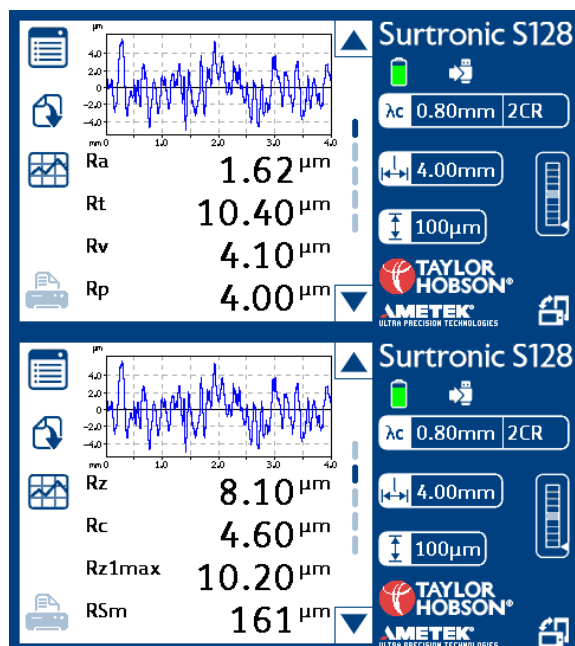
Obr. 29 Střížná plocha polotovaru

Výsledky z technologie laserového řezání

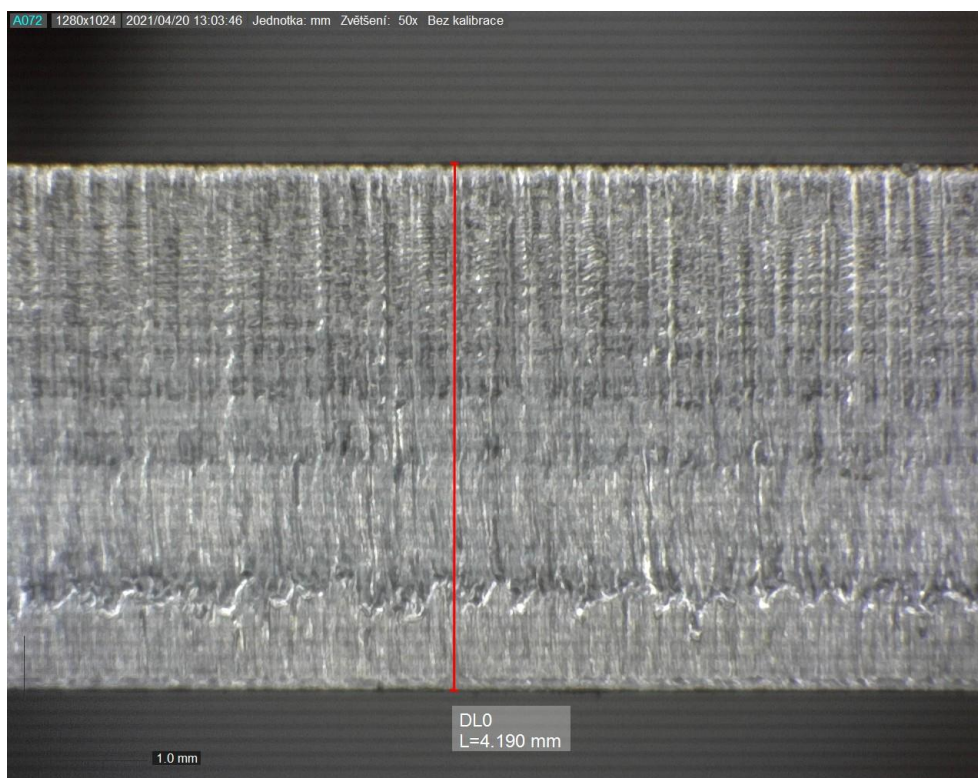
Tab. 9 Hodnoty drsnosti metody dělení laserem.

Číslo měření	Ra [μm]	Rz [μm]	Rsm [μm]
1.	1,62	8,1	161
2.	1,25	6,6	140
3.	1,44	7,7	123
4.	1,36	7,1	143
5.	1,51	8,2	84

Na základě výsledků z Tabulky 9 a předchozího odhadu vyšla technologie řezání laserem jako nejlepší metoda co se týká konstantního výsledku drsnosti v celé kontaktní ploše viz Obr. 32. Výsledky této technologie jsou vyhovující z hlediska kvality připravených svarových ploch viz. Obr. 31.



Obr. 31 Měření drsnosti povrchu metody laserového řezání



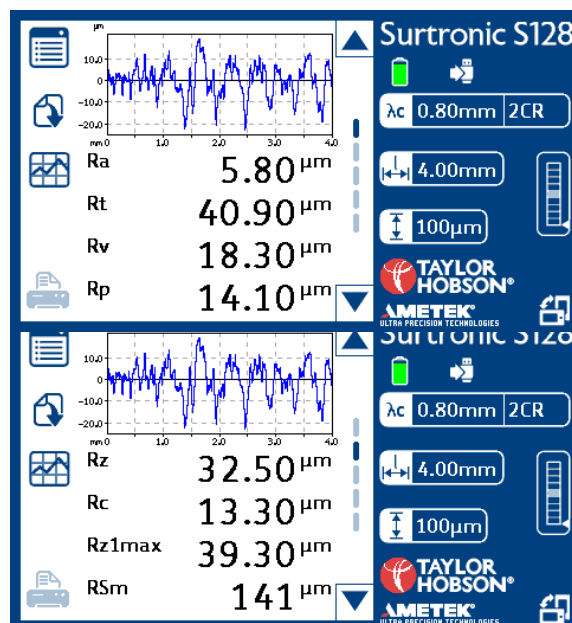
Obr. 32 Svarová plocha po dělení laserovým paprskem

Výsledky z technologie vodního řezání

Tab. 10 Hodnoty drsnosti metody dělení vodním paprskem.

Číslo měření	Ra [μm]	Rz [μm]	Rsm [μm]
1.	5,8	32,5	141
2.	6,55	32,1	157
3.	5,88	33,2	152
4.	4,68	26,10	110
5.	5,7	31	118

Dle výsledků z Tabulky 10 je možné vyhodnotit metodu vodního paprsku jako plně dostatečnou pro přípravu polotovarů z hlediska drsnosti – viz Obr. 34. Kvalita řezu z hlediska hodnot Ra odpovídá kvalitě dělicího řezu vodního paprsku. Výsledky udávají podobné výsledky drsnosti na celé své ploše viz. Obr.33.



Obr. 33 Měření drsnosti povrchu metody vodního paprsku



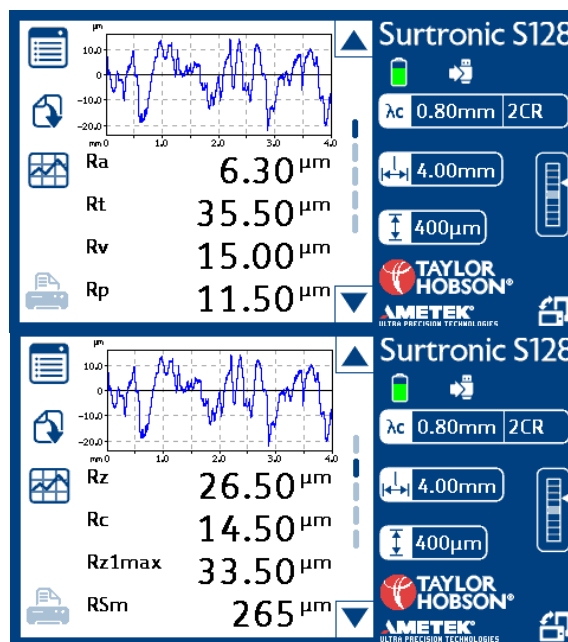
Obr. 34 Svarová plocha po dělení vodním paprskem

Výsledky z technologie řezání pásovou pilou

Tab. 11 Hodnoty drsnosti metody dělení pásovou pilou.

Číslo měření	Ra [μm]	Rz [μm]	Rsm [μm]
1.	6,3	26,5	265
2.	6,5	31,5	281
3.	5,6	26,5	376
4.	6,5	32	385
5.	6,5	31,7	295

Technologie řezání pásovou pilou ukázala nejkonstantnější výsledky měření drsnosti (viz Tabulka 11) ze všech návrhů. Z hlediska kvality svarové plochy (viz Obr. 37) je tato technologie plně dostačující pro přípravu polotovarů.



Obr. 35 Měření drsnosti pásovou pilou



Obr. 36 Svarová plocha po dělení pásovou pilou

7.3.1 Výsledky měření drsnosti

Výsledky jednotlivých vzorků jsou zapsány v Tabulce 12. Jednotlivé metody přípravy polotovarů byly zkontrolovány pod stereoskopem a následně změřeny pomocí měřícího programu rovinnosti svarových ploch. Nejhorší výsledky se změřily u vodního paprsku, kde se projevilo typické zkosení řezné plochy po vodním paprsku. Nejlepší výsledky byly zaznamenány u technologie stříhání, kde nebyl naměřen žádný úhel. Zcela zanedbatelných výsledků bylo zjištěno u metody pásové pily a laserového paprsku.

Tab. 12 Hodnoty rovinnosti.

Technologie	Střih	Laser	Voda	Pila
Hodnota [°]	0	0,792	3,629	0,791

7.4 Měření rovinnosti a makrostruktury

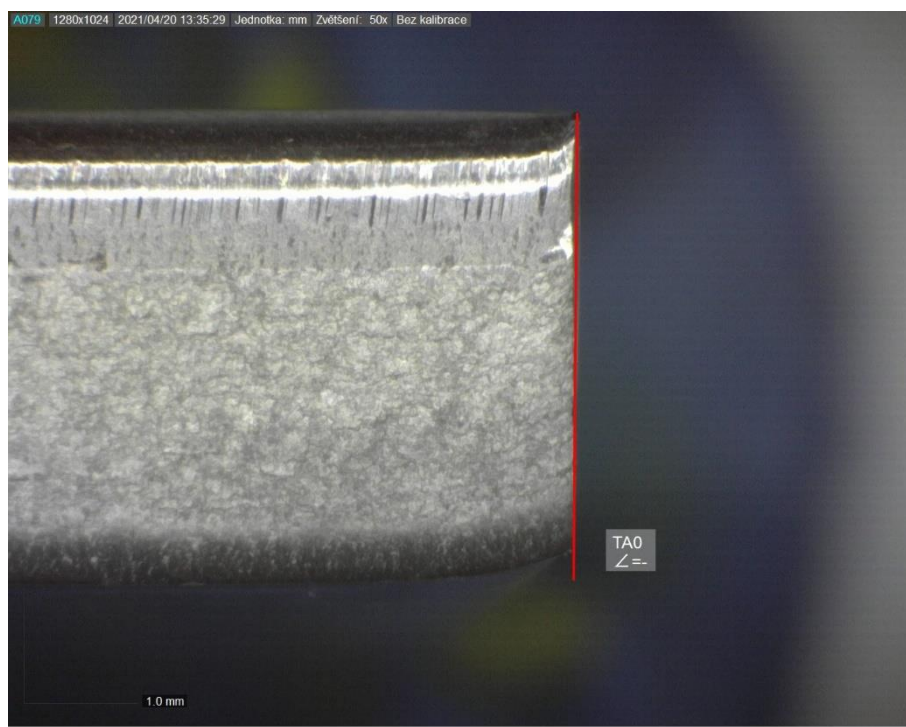
Měření rovinnosti ploch a makrostruktury vzorků probíhalo na stereomikroskopu SCHUT, model SSM-EC2 se snímací kamerou Dino Lite připojenou na stolní počítač do programu Dino Capture viz Obr. 29. Jedná se o všestranné zařízení pro základní měření a vyhodnocování kvality makrostruktury vybroušených a vyleptaných vzorků. Samotnému měření rovinnosti předcházelo očištění a odmaštění vzorků. Následně byly vzorky usazeny do svěráku a měřeny pod stereomikroskopem. Stejným způsobem byla měřena i makroskopie. Pro správné zobrazení struktury byly součásti ještě broušeny na metalografickém brusném zařízení. Následně proběhlo vyleptání a očištění.

Technické parametry:

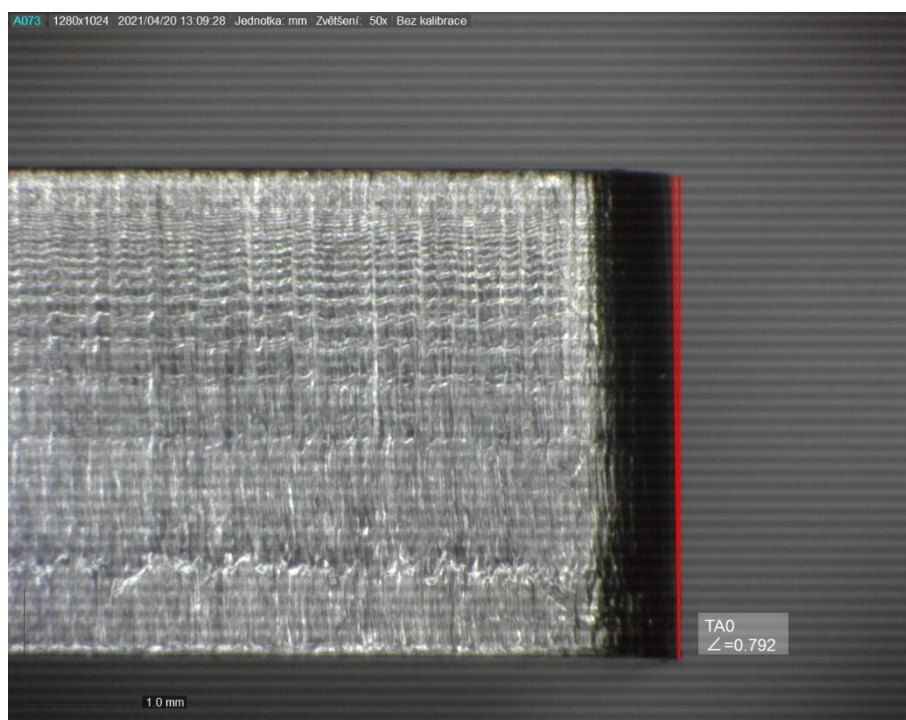
- Výrobce – SCHUT
- Rozsah zvětšení – 10-60 x
- Pracovní vzdálenost - 85 mm
- Zorné pole – 10x/ø23 mm; 40x/ø5,5 mm



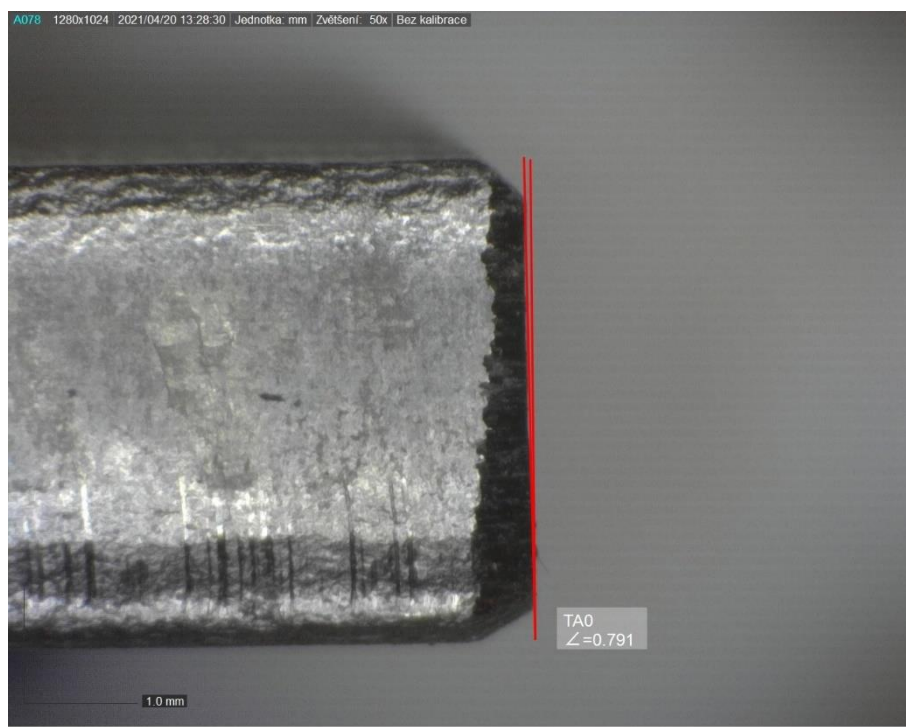
Obr. 37 Stereoskop Schut

Technologie výroby – stříhání

Obr. 38 Měření rovinnosti – stříh

Technologie výroby - řezání laserovým paprskem

Obr. 39 Měření rovinnosti – laser

Technologie výroby - řezání pásovou pilou

Obr. 40 Měření rovinnosti – pásová pila

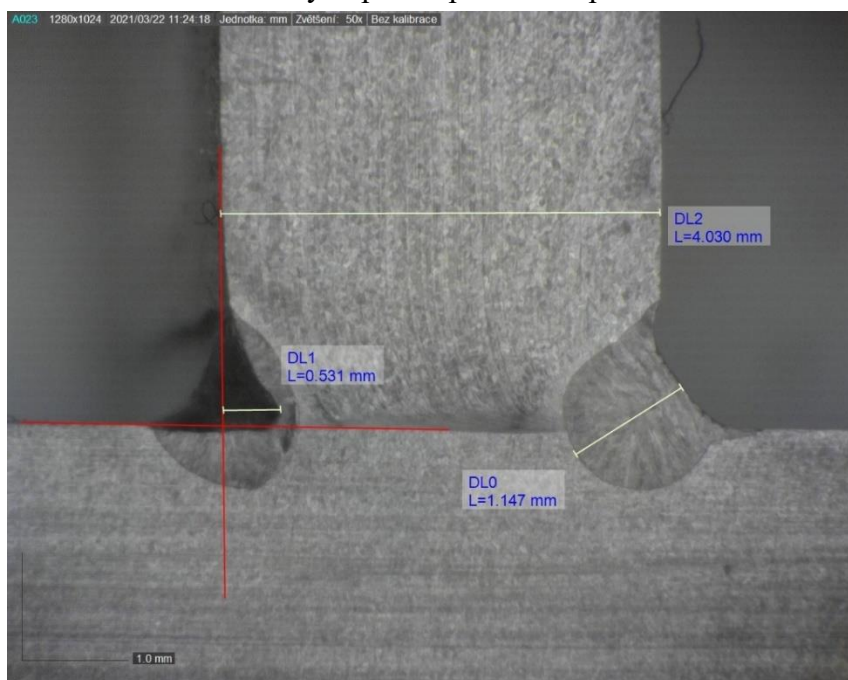
Technologie výroby – řezání vodním paprskem

Obr. 41 Měření rovinnosti – vodní paprsek

7.4.1 Výsledky měření makroskopie

Technologie výroby – stříhání

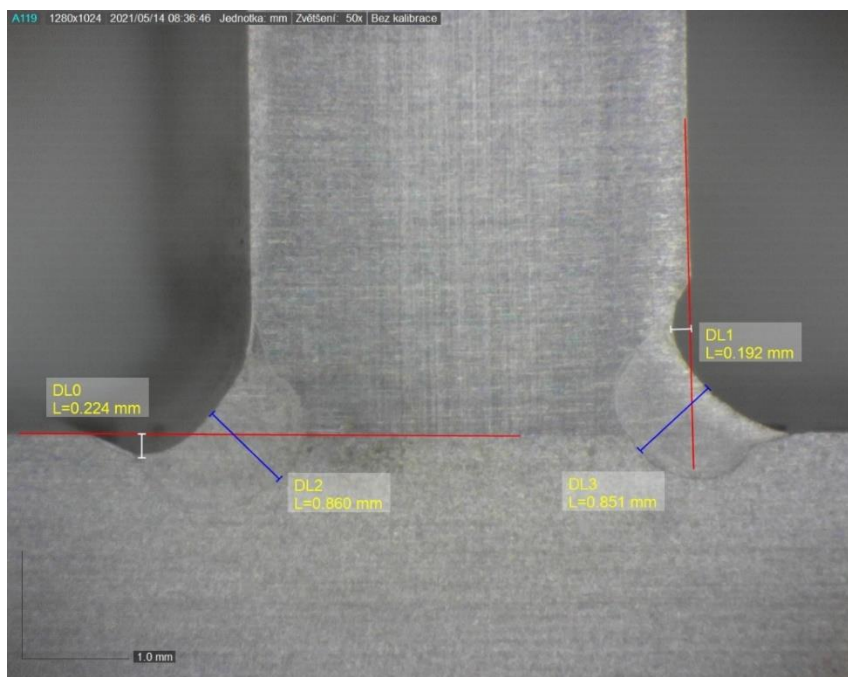
První měření probíhalo na vzorku z metody stříhání, daný vzorek byl vyřazen z výroby z důvodu vady svaru viz Obr. 42. Daná vada byla pravděpodobně způsobena mastnotou polotovaru, jelikož se jedná o dutinu vytvořenou vypařenými plyny. Optimalizace, resp. předejití této vady je v důkladném odmaštění a očištění součástí před samotným svařováním. Koutový svar na druhé straně je ideálně provedený s minimální TOO. Takový svar dodává této součásti funkčnost a záruku dodržení mechanických vlastností.



Obr. 42 Makroskopie metody – stříh

Technologie výroby – laserové řezání

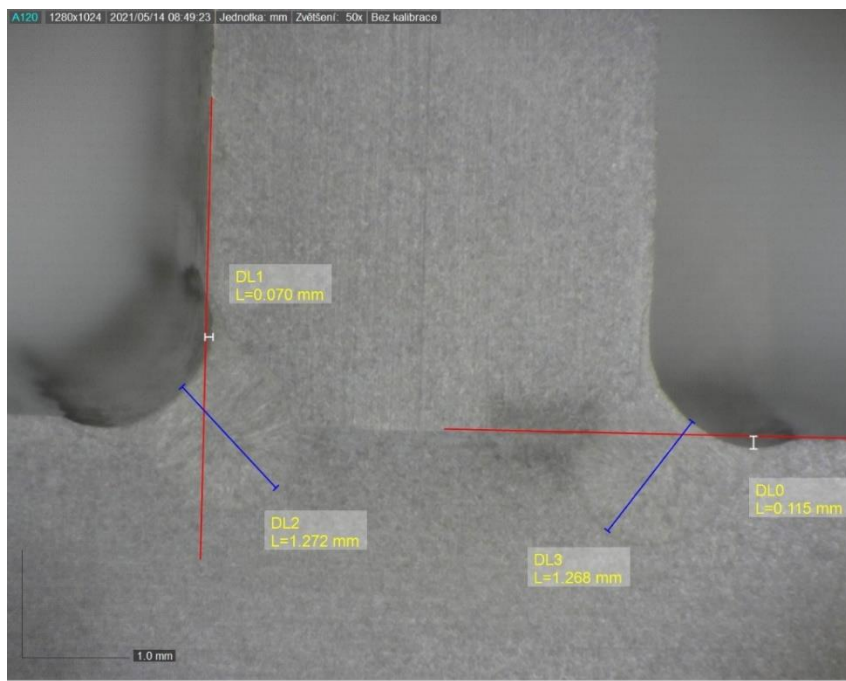
Vzorek připravený pomocí laserového řezání (viz Obr. 43) byl odmaštěn, očištěn a svařen stejnými svařovacími parametry jako je sériová výroba. Dle výsledků měření je možné stanovit podkročení velikosti obou svarů dané součásti. Kvůli této vadě je možná snížená životnost konstrukce. Opatření proti této vadě je optimalizace svařovacích podmínek a nastavení výkonu laseru.



Obr. 43 Makroskopie metody – laser

Technologie výroby – řezání pásovou pilou

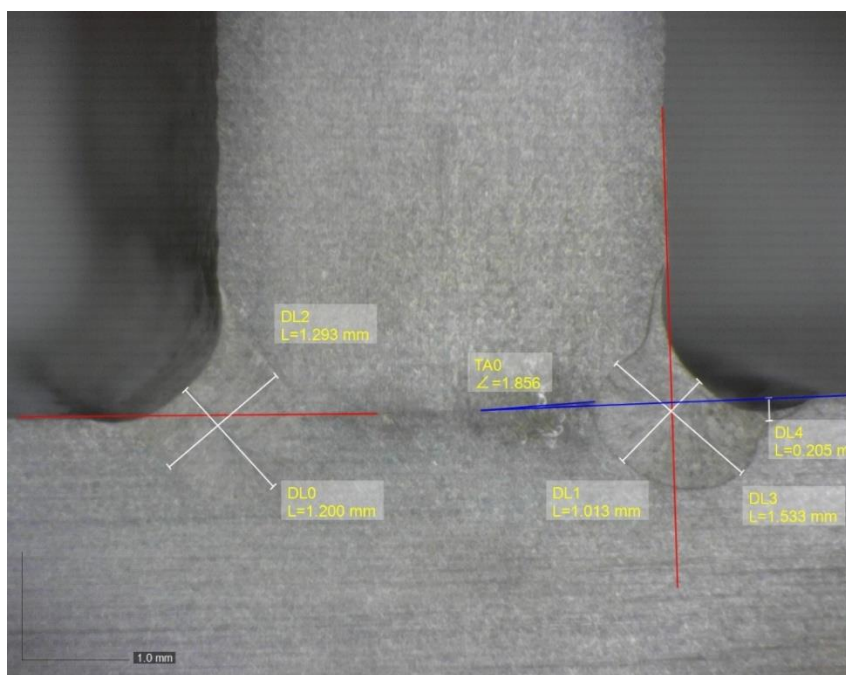
Vzorek připravený metodou dělení pásovou pilou (viz Obr. 44) byl odmaštěn, očištěn a svařen stejnými svařovacími parametry jako je sériová výroba. Dle výsledků a měření byly svary vyhodnoceny jako optimální. Na vzorku bylo zjištěno mírné podkročení velikosti svaru, ale hodnoty jsou oproti ostatním metodám velmi malé a tedy zanedbatelné. Opatření proti této vadě je optimalizace svařovacích podmínek a nastavení výkonu laseru.



Obr. 44 Makroskopie metody – pásová pila

Technologie výroby – řezání vodním paprskem

Vzorek připravený metodou vodního paprsku (viz Obr. 45) byl odmaštěn, očištěn a svařen stejnými svařovacími parametry jako je sériová výroba. Na základě měření lze pozorovat vadu ve formě podkročení velikosti svaru na pravé straně. Zde tuto vadu mohla způsobit spolu se špatně nastavenými podmínkami i zkosená svařová plocha. Opatření proti této vadě je optimalizace svařovacích podmínek a výkonu laseru, zlepšit kvalitu svařové plochy součásti nastavením řezací trysky.



Obr. 45 Makroskopie metody – vodní paprsek

8 ZÁVĚRY

Bakalářská práce se v teoretické části zabývá fyzikální podstatou laseru, rozdělením laserů, technologií svařování laserem a základním rozdělením korozivzdorných ocelí. V praktické části byl zvolen pro experiment příčkový rošt z firmy ACO Industries a.s. Cílem praktické části bylo navrhnout úpravy polotovarů pro laserové svařování za cílem snížení vadné produkce. Dosavadní sériová výroba polotovarů probíhá formou stříhání v nástroji. Navrhnuté úpravy přípravy polotovaru byly formou laserového řezání, pásovou pilou a vodním paprskem. Pro svaření součástí byl použit diodový laser značky LASERLINE, ve firmě ACO Industries. K vyhodnocení kvality připravených polotovarů byly součásti změřeny pomocí drsnoměru a stereoskopu pro zjištění úhlu zkosení svarových ploch. Následně svařené vzorky byly rozřezány a připraveny pro vyhodnocení makrostruktury svarů.

Hodnoty drsnosti byly změřeny na kontaktních svarových plochách, kde vyhodnocovacím prostředkem byla hodnota Ra. Při této zkoušce bylo zjištěno nejlepších výsledků drsnosti u technologie přípravy laserovým paprskem a nejhorší příprava pásovou pilou. Výroba metodou stříhání měla v jistých bodech lepší hodnoty drsnosti než laserový paprsek, ale tato oblast zaujímá pouze jednu třetinu celé svarové plochy, kde zbylá část dosahovala horších výsledků.

Další zkouškou bylo měření rovinnosti svarových ploch. Nejlepších výsledků zde dosáhla technologie stříhání, kde nebylo na měřeném vzorku zjištěno žádné zkosení. Minimálních úhlů v řádech desetin dosáhly technologie laseru a pásové pily. Naopak nejhorší výsledek byl změřen u technologie vodního paprsku. Hodnota úhlu zkosení dosahovala přes 3°.

Při kontrole makrostruktury byla u vzorku ze stříhání nalezena vada způsobená nedostatečným odmaštěním před svařováním. Vzorky z navrhnutých technologií přípravy polotovarů, byly svařeny stejnými svařovacími podmínkami jako je u stávající výroby. U vzorku z laserového řezání vznikla vada, a to podkročení velikosti svaru. Stejná vada byla identifikována u všech metod, ale u metody vodního paprsku se projevilo i zkosení svarové plochy, které zapříčinilo horší kvalitu svaru. Nejlepších výsledků dosáhla metoda řezání pásovou pilou, která měla nejmenší vadu a nejhlubší průvar.

Dle výsledků praktické části lze navrhnout formy přípravy polotovarů pásovou pilou a dělením materiálu pomocí laserového paprsku jako zcela vhodné pro efektivní sériovou výrobu. Při zoptimalizování svařovacích podmínek a důkladném odmaštění součástí lze docílit velmi kvalitních svarů a poměrně rychlé přípravy součástí pro samotné svařování. V opačném případě lze pro stávající výrobu metodou stříhání doporučit dodržování důkladného očištění součástí před svařováním a dodržování intervalů výměny stříhadel v nástroji. Metoda přípravy vodním paprskem je zcela nevhodná z hlediska sériové výroby polotovarů. Výroba je pomalá a velmi drahá. Zkosené plochy lze eliminovat natočením trysky a tím docílit kolmých ploch.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [7]

1. *Laserové technológie*. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity, 2000. Edícia monografií. ISBN 80-227-1425-9.
2. *Špeciálne metódy zvarovania*. Bratislava: Vydavateľstvo ALFA Bratislava, 1989, ISBN 80-05-000097-9.
3. KUBÍČEK, Jaroslav, 2006. *TECHNOLOGIE II ČÁST SVAŘOVÁNÍ: Díl 1 ZÁKLADNÍ METODY TAVNÉHO SVAŘOVÁNÍ* [online]. Brno [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te_technologie_2_svarovani_tavne_kubicek.pdf. Syllabus přednášek. Vysoké Učení Technické v Brně.
4. KUBÍČEK, Jaroslav, 2006. *TECHNOLOGIE II ČÁST SVAŘOVÁNÍ: Díl 2 SPECIÁLNÍ METODY TAVNÉHO SVAŘOVÁNÍ TLAKOVÉ SVAŘOVÁNÍ* [online]. Brno [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te_technologie_2_specialni_metody_svarovani_kubicek.pdf. Syllabus přednášek. Vysoké Učení Technické v Brně.
5. KUBÍČEK, Jaroslav, 2018. *TECHNOLOGIE II ČÁST SVAŘOVÁNÍ: ČÁST SVAŘOVÁNÍ - 2* [online]. Brno [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te_technologie_II_opora_svarovani_2018_II_kubicek.pdf. Syllabus přednášek. Vysoké Učení Technické v Brně.
6. KUBÍČEK, Jaroslav, 2018. *TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ* [online]. Brno [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/ctv_technologie_vyroby_I_svarovani_kubicek.pdf. Syllabus přednášek. Vysoké Učení Technické v Brně.
7. CITACE PRO: *Generátor citací* [online]. 2021. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com>.
8. LIBOR, Mrňa, 2013. *Technologie využívající laser* [online]. Brno [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_svarovani_laserem_2013_mrna.pdf. Studijní opory. Vysoké Učení Technické v Brně.
9. LIBOR, Mrňa, 2013. *Základy laserové techniky* [online]. Brno [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_zaklady_laserove_techiky_2013_mrna.pdf. Studijní opory. Vysoké Učení Technické v Brně.
10. KUBÍČEK, Jaroslav, 2018. *Technické aspekty svařování laserem* [online]. Brno [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <http://www.svarak.cz/images/stories/pdf/Svarov%C3%A1ni%20laserem.pdf>.
11. FILIP, Vojta, 2015. *PRINCIP LASERU* [online]. [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <http://www.pf.jcu.cz/stru/katedry/fyzika/prof/Svadlenkova/Princip%20laseru.pdf>. Odborný text.
12. *Nekonvenční metody svařování: laser* [online], 2016. DocPlayer: Vladimír Bureš [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/2962761-1-nekonvencni-metody-svarovani-laser-2-svarovani-laserem-51.html>
13. *Vláknové lasery: nový nástroj pro průmysl a medicínu* [online], 2015. Praha 8: Ústav fotoniky a elektroniky Akademie věd ČR [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/144877685-Vlaknove-lasery-novy-nastroj-pro-prumysl-a-medicinu.html>

14. PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Laserové svařování* [online]. 2012 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-3-lasero-vesvarovani.html>. Odborný článek. Průmyslové spektrum
15. PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Princip laseru* [online]. 2012 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-1-princip-laseru.html>. Odborný článek. Průmyslové spektrum
16. PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Svařovací lasery* [online]. 2012 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-2-svarovacilasery.htm>. Odborný článek. Průmyslové spektrum
17. PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Laserové svařování posouzení vlivu ochranného plynu* [online]. 2014 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lasero-vesvarovani-posouzeni-vlivu-ochranneho-plynu>. Odborný článek. Průmyslové spektrum
18. AIR PRODUCTS. *Laserové svařování* [online]. 2014 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <http://www.airproducts.cz/industries/Construction/construction-Metal-Fabrication/product-list/laser-welding-construction-metal-fabrication.aspx?itemId=FCCE0EF4C54D44A19148B2E389F79BE6>. Odborný článek. AIR PRODUCTS
19. HARSLE. *Princip a vlastnosti laserového svařovacího spoje* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://cs.harsle.com/Princip-a-vlastnosti-laserov%C3%A9ho-sva%C5%99ovac%C3%ADho-stroje-id8163094.html>. Odborný článek.
20. LASERY A OPTIKA. *Seriál na téma lasery – Laserové svařování I* [online]. 2008 [cit. 2021-5-14]. Dostupné také z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---lasero-vesvarovani-i-laser-welding-134>. Odborný článek. Lasery a optika
21. LASERY A OPTIKA. *Seriál na téma lasery – Základní princip laseru a jejich dělení* [online]. 2013 [cit. 2021-5-5]. Dostupné také z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-natema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>. Odborný článek. Lasery a optika
22. LASERY A OPTIKA. *Seriál na téma lasery – Hlavní typy laserů používaných v průmyslu* [online]. 2013 [cit. 2021-5-5]. Dostupné také z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>. Odborný článek. Lasery a optika
23. MEGABLOG. *Hlavní typy laserů používaných v průmyslu* [online]. 2013 [cit. 2021-5-7]. Dostupné také z: <https://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>. Odborný článek. MEGABLOG
24. KONSTRUKCE. *Laserové svařování* [online]. 2006 [cit. 2021-5-18]. Dostupné také z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/lasero-vesvarovani-ekonomika-a-kvalita>. Odborný článek. KONSTRUKCE
25. KONSTRUKCE. *Laserové svařování* [online]. 2021 [cit. 2021-5-18]. Dostupné také z: <https://konstrukce.cz/svarovani-a-deleni-materialu/lasero-vesvarovani-kovu-797>. Odborný článek. KONSTRUKCE
26. *Laserové technologie v praxi* [online], 2010. Olomouc: Společná laboratoř optiky [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
27. *Co je to korozivzdorná ocel* [online], 2016. EUROLINOX [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/7648279-Co-je-to-korozivzdorna-ocel-fe-cr-10-5-c-1-2.html>

28. MACHÁČEK, Josef *Materiály a jejich charakteristiky* [online], 2016. České vysoké učení technické [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~machacek/prednaskyNerez/Nerez-2.pdf>. Studijní opory
29. ZÁDĚRA, Antonín, *Výroba legovaných ocelí: Vysokolegované korozivzdorné oceli* [online]. Brno [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/opory/2_10_2.html. Studijní opory
30. FASTENERS. *Druhy nerezové oceli a příklady jejího využití* [online], 2012 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://www.fasteners-cz.cz/druhy-nerezove-oceli-priklady-jejihouziti>. Odborný článek FASTENERS
31. KONSTRUKCE. *Svařování konstrukcí z korozivzdorných ocelí* [online]. 2006 [cit. 2021-5-7]. Dostupné také z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/svarovani-konstrukci-z-korozivzdornych-oceli-ve-shode-s-csn-en-1011-3/>. Odborný článek. KONSTRUKCE
32. LEONARDO TECHNOLOGY. *Bezpečnost laseru Třídy 1 až 4* [online]. 2012 [cit. 2021-5-4]. Dostupné také z: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:xVJbKgt87zUJ:www.lt.cz/e-learning/laser/bezpecnost-laseru-tridy-1-az-4+&cd=4&hl=cs&ct=clnk&gl=cz>. Odborný článek. LEONARDO TECHNOLOGY
33. BOZPPROFI.CZ. *Bezpečnost při používání laseru se zaměřením na zdravotnictví* [online]. 2012 [cit. 2021-5-4]. Dostupné také z: https://www.bozpprofi.cz/33/bezpecnost-pri-pouzivani-laseru-se-zamerenim-na-zdravotnictvi-uniqueidgOke4NvrWuOKaQDKuox_ZyDs6-r29kev86iZirc5-dg/?reltype=2. Odborný článek. BOZPPROFI.CZ
34. BOZPINFO.CZ. *Ochrana zdraví při práci s lasery* [online]. 2011 [cit. 2021-5-4]. Dostupné také z: <https://www.bozpinfo.cz/ochrana-zdravi-pri-praci-s-lasery?page=0%2C1>. Odborný článek. BOZPINFO.CZ
35. ANZDOC.PUB *Laserové a plazmové řezání* [online]. 2006 [cit. 2021-5-4]. Dostupné také z: <https://adoc.pub/laserove-a-plazmove-ezani-84-83.html>. Odborný článek. ANZDOC.PUB
36. M&M SPEKTRUM. *Nekonvenční metody obrábění* [online]. 2008 [cit. 2021-5-4]. Dostupné také z <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-8-dil>. Odborný článek. M&M SPEKTRUM.
37. LASCAM. *Rozdělení laserů* [online]. 2015 [cit.2021-5-1]. Dostupné také z <https://www.lascam.cz/rozdeleni-laseru/>. Odborný článek. LASCAM
38. KONSTRUKCE. *Vizuální kontroly svarů* [online]. 2013 [cit. 2021-5-8]. Dostupné také z <http://old.konstrukce.cz/clanek/vizualni-kontrola-svaru-pozadavky-vyrobkovych-norem-vady-svaru-z-praxe-certifikace-personalu-ndt/>. Odborný článek. KONSTRUKCE.
39. ČESKÁ SVÁŘEČSKÁ SPOLEČNOST ANB. *Typy vad, příčiny jejich vzniku a hodnocení* [online]. 2012 [cit. 2021-5-9]. Dostupné také z <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>. Odborný článek. ČESKÁ SVÁŘEČSKÁ SPOLEČNOST ANB.
40. KONSTRUKCE. *Vady při svařování a tepelném dělení* [online]. 2019 [cit. 2021-5-9]. Dostupné také z <https://konstrukce.cz/svarovani-a-deleni-materialu/vady-pri-svarovani-a-teplnem-deleni-265>. Odborný článek. KONSTRUKCE.
41. ELEKTRODY.CZ. *Vady ve svarech* [online]. 2012 [cit. 2021-5-9]. Dostupné také z <https://www.elektrody.cz/vady-ve-svarech>. Odborný článek. ELEKTRODY.CZ.

42. KONSTRUKCE. *Korozní napadení korozivzdorných ocelí v důsledku svařování* [online]. 2019 [cit. 2021-5-11]. Dostupné také z <https://konstrukce.cz/povrchova-ochrana/korozni-napadeni-korozivzdornych-oceli-v-dusledku-svarovani-103>. Odborný článek. KONSTRUKCE.
43. DOCPLAYER. *Svařitelnost korozivzdorných ocelí* [online]. 2019 [cit. 2021-5-12]. Dostupné také z <https://docplayer.cz/106030786-Svaritelnost-korozivzdornych-oceli.html>. Odborný článek. DOCPLAYER.
44. TERAPOL. *Hlavní skupiny nerezových ocelí* [online]. 2012 [cit. 2021-5-14]. Dostupné také z <http://www.terapol.cz/clanek/no-vap-hlavni-skupiny>. Odborný článek TERAPOL.
45. GUMEX. *3D řezání vodním paprskem* [online]. 2015 [cit. 2021-5-18]. Dostupné také z <https://www.gumex.cz/sluzby/profily-a-vyroba-tesneni-75/3d-rezani-vodnim-paprskem-72>. Odborný článek GUMEX.
46. VODNÍ PAPERSEK. *Princip řezání vodním paprskem* [online]. 2017 [cit. 2021-5-18]. Dostupné také z <http://www.rezani-cnc.cz/princip-rezani-vodnim-paprskem.html>. Odborný článek VODNÍ PAPERSEK.
47. Laserové svařování, 2020. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Laserov%C3%A9_sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Popis	Jednotka
TOO	Teplotně ovlivněná oblast	[-]
CW	Kontinuální	[-]
Qs	Impulsní	[-]
PW	Pulsní	[-]
N _{iekv}	Niklový ekvivalent	[%]
C _{rekv}	Chromový ekvivalent	[%]
Ra	Střední aritmetická odchylka profilu	[μm]
Rz	Hloubka drsnosti	[μm]
Rsm	Střední šířka rýh	[μm]
R _m	Mez pevnosti	[MPa]
R _{p0,2}	Mez pružnosti	[MPa]
γ	Gamma	[-]
λ _c	Filtr vlnové délky	[mm]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Laserové svařování [23].....	9
Obr. 2 Schéma laseru [20].....	10
Obr. 3 Schéma fyzikální podstaty laseru [20].....	10
Obr. 4 Schéma vzniku stimulované emise [20].....	11
Obr. 5 Schéma CO ₂ Slab laseru [23].....	13
Obr. 6 Schéma pevnolátkového laseru [23]	14
Obr. 7 Schéma diodového laseru [23].....	14
Obr. 8 Schéma vláknového laseru [23]	15
Obr. 9 Kondukční svařování [47].....	17
Obr. 10 Metoda Key hole [47]	17
Obr. 11 Typy svarů provedených laserem [12].....	20
Obr. 12 Vady svarových spojů [39]	21
Obr. 13 Neprůvar svaru [38]	21
Obr. 14 Bezpečnostní tabulky pro práci s lasery [32]	22
Obr. 15 Laserové zařízení třídy IV. [32].....	23
Obr. 16 Princip oxidační vrstvy oxidu chromitého [42]	24
Obr. 17 Druhy korozivzdorných ocelí [43].....	24
Obr. 18 Příčkový zátěžový rošt.....	26
Obr. 19 Schaefflerův diagram [29]	27
Obr. 20 Schéma střížné plochy	28
Obr. 21 Střížná linka	28
Obr. 22 Laserové pracoviště v ACO Industries	29
Obr. 23 Svařovací přípravek v ACO Industries	29
Obr. 24 Pásová pila	30
Obr. 25 Laserové pracoviště.....	30
Obr. 26 Schéma vodního paprsku [45].....	31
Obr. 27 Schéma řezání plazmou [35].....	31
Obr. 28 Drsnoměr Taylor Hobson.....	32
Obr. 30 Střížná plocha polotovaru	33
Obr. 29 Měření drsnosti povrchu metody stříhání	33
Obr. 31 Měření drsnosti povrchu metody laserového řezání	34
Obr. 32 Svarová plocha po dělení laserovým paprskem	34
Obr. 33 Měření drsnosti povrchu metody vodního paprsku.....	35
Obr. 34 Svarová plocha po dělení vodním paprskem	35
Obr. 35 Měření drsnosti pásovou pilou.....	36
Obr. 36 Svarová plocha po dělení pásovou pilou.....	36
Obr. 37 Stereoskop Schut.....	37
Obr. 38 Měření rovinnosti – stříh.....	38
Obr. 39 Měření rovinnosti – laser	38
Obr. 40 Měření rovinnosti – pásová pila.....	39
Obr. 41 Měření rovinnosti – vodní paprsek	39
Obr. 42 Makroskopie metody – stříh	40
Obr. 43 Makroskopie metody – laser	41
Obr. 44 Makroskopie metody – pásová pila	41
Obr. 45 Makroskopie metody – vodní paprsek	41

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Porovnání jednotlivých druhů laserů [22],[23]	15
Tab. 2 Porovnání metoda svařování [10],[12].....	19
Tab. 3 Chemické složení Austenitické korozivzdorné oceli [44].	25
Tab. 4 Chemické složení Martenzitické korozivzdorné oceli [44].	25
Tab. 5 Chemické složení Feritické korozivzdorné oceli [44].	25
Tab. 6 Přesné chemické složení oceli 17 240.....	27
Tab. 7 Mechanické vlastnosti oceli 17240.	27
Tab. 8 Hodnoty drsnosti metody stříhání.	33
Tab. 9 Hodnoty drsnosti metody dělení laserem.	34
Tab. 10 Hodnoty drsnosti metody dělení vodním paprskem.	35
Tab. 11 Hodnoty drsnosti metody dělení pásovou pilou.....	36
Tab. 12 Hodnoty rovinnosti.	37

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 Využití laserové technologie [36]	16
--	----

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Inspekční certifikát 3.1 AD-2000 EN 10204