

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie



Bakalářská práce

**Návrh komory pro zajištění ochranné atmosféry při navařování titanu
laserem**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Petrásek** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **503338**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh komory pro zajištění ochranné atmosféry při navařování titanu laserem

Název bakalářské práce anglicky:

Design of a chamber for providing a protective atmosphere during laser cladding of titanium

Pokyny pro vypracování:

Technologie navařování laserem.
Problematika navařování titanu laserem.
Ochranná atmosféra a její účinky při navařování.
Definice vlastností a parametrů ochranné komory.
Návrh komory pro zajištění kvalitní ochranné atmosféry.
Zpracování rámcových výrobních postupů obráběných dílců.

Seznam doporučené literatury:

BUCHFINK, Gabriela. The laser as a tool: a light beam conquers industrial production. Würzburg: Vogel Buchverlag, 2007. ISBN 978-3-8343-3072-7.
Advances in Laser Materials Processing. Woodhead Publishing (2017), ISBN 978-0-08-101252-9.
Vědecké publikace v oblasti navařování titanu laserem.
Platné normy bezpečnosti laserových zařízení a práce s nimi.
Katalogy výrobců fezných nástrojů.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Pavel Zeman, Ph.D. ústav výrobních strojů a zařízení FS

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

Ing. Martin Novák ústav výrobních strojů a zařízení FS

Datum zadání bakalářské práce: **03.04.2023** Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

doc. Ing. Pavel Zeman, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

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

V Praze dne 30.7.2023

.....

Poděkování

Rád bych chtěl touto formou sdělení poděkovat svému vedoucímu práce doc. Ing. Pavlu Zemanovi Ph.D a konzultantovi Ing. Martinovi Novákovi za jejich přínosné, cenné rady, poznatky a především za jejich trpělivost při vedení mé bakalářské práce.

Anotace

Autor:	Martin Petrásek
Název BP:	Návrh komory pro zajištění ochranné atmosféry při navařování titanu laserem
Rozsah práce:	50 str., 23 obr., 2 tab.
Školní rok vyhotovení:	2022/2023
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Zadávací ústav:	Ú12134 – Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie
Vedoucí BP:	doc. Ing. Pavel Zeman, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Martin Novák
Zadavatel:	ČVUT – FS
Využití:	Efektivní navařování titanového drátu v ochranné atmosféře.
Klíčová slova:	navářování, laser, titan, aditivní technologie, ochranná komora
Anotace:	Cílem této práce je zmapování problematiky navařování, zejména pak navařování pomocí laseru. Práce obsahuje popis metod navařování za pomoci laseru. Jsou vypracovány dva návrhy ochranné komory, které jsou následně porovnány a zvolený návrh je detailněji zpracován.

Annotation

Author:	Martin Petrášek
Title of thesis:	Design of a chamber for providing a protective atmosphere during laser cladding of titanium
Extent:	50 p., 23 fig., 2 tab.
Academic year:	2022/2023
University:	CTU – Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12134
Supervisor:	doc. Ing. Pavel Zeman, Ph.D.
Consultant:	Ing. Martin Novák
Submitter:	CTU – Faculty of Mechanical Engineering
Application:	Efficient shielded welding of titanium wire
Key words:	cladding, laser, titanium additive technology, protective chamber
Annotation:	The aim of this thesis is to map the issue of welding, especially laser cladding. The thesis contains a description of methods of laser cladding. Two designs of the protection chamber are prepared, which are then compared and the selected design is processed in more detail.



Obsah

1. Úvod	8
2. Cíl práce	9
3. Teoretická část	10
3.1. Navařování kovů laserem	10
3.2. Problematika navařování titanu	12
3.3. Ochranná atmosféra	13
3.4. Laserové zdroje	16
3.5. Navařovací hlavy	21
3.5.1. Hlavy pro navařování z drátu	22
3.6. Navařovací buňka	25
3.6.1. Bezpečnost práce s lasery	26
3.6.2. Třídy bezpečnosti laserů	27
3.6.3. Ochranné prostředky a bezpečnostní opatření pro práci s laserem ..	28
3.7. Kinematika svařovacích robotů	32
3.8. Shrnutí teoretické části	33
4. Praktická část	34
4.1. Návrhy řešení	34
4.1.1. Návrh číslo 1	34
4.1.2. Návrh číslo 2	36
4.2. Výrobní postup obráběného dílce	42
5. Závěr	43
Citovaná literatura	44
Seznam obrázků	48
Seznam tabulek	49
Seznam příloh	50
Výkresová dokumentace	50



1. Úvod

Během posledního desetiletí byl zaznamenán ohromný nárůst používání i vývoje v oblasti aditivních technologií. To vedlo ke vzniku mnoha technologií výroby, které vytvářejí výrobky pomocí vrstvení materiálu. Pokud se vyrábí součásti tímto druhem výroby, tak je možné dosáhnout úspory, času, materiálu a někdy i peněz, ale to je velmi individuální, protože tyto technologie jsou drahé na pořízení. Součásti vyrobené aditivními technologiemi v některých případech vykazují lepší mechanické vlastnosti než součásti vyrobené konvenčními metodami. [1]

Tyto metody zatím nacházejí největší uplatnění v leteckém průmyslu. Výsledkem je mnohem lehčí a pevnější součást, než by bylo možné vyrobit pomocí konvenčních metod výroby, i když po straně kvality povrchu není možno zatím dosáhnout také kvality jako u konvenčních metod výroby. [1]

Poslední dobou byl letecký průmysl zaměřen na využívání titanových slitin, protože dokážou být velmi pevné, ale zároveň lehké. Výroba titanové slitiny je velice náročný a nákladný proces, a proto zde se dostávají ke slovu aditivní technologie, které jsou schopné využít počáteční materiál s minimálním odpadem.

Z důvodu vlastností titanové slitiny se nabízí jako nejlepší druh aditivní výroby navařování pomocí laserového zdroje, což je kladení jednotlivých vrstev na sebe a jejich následovné prohřívání a chladnutí. Tento problém je studován ve dvou odlišných variantách technologie navařování. První varianta navařování drátu se používá kladením drátu do jednotlivých vrstev. Druhá varianta navařování prášku pracuje na podobném principu jen za využití jednotlivých vrstev prášku nanášeného kovu. Zatím je lépe zpracovaná technologie za využití prášku, který sice nedosahuje vyšší kvality kladené vrstvy, nižší kontaminace a rychlejší depozice oproti drátu. Oproti tomu dosahuje vyšších geometrických přesností než drát. Tyto druhy aditivní výroby mají své nedostatky. Hlavním nedostatkem je, že mikrostruktura a mechanické vlastnosti jsou velmi lehce tepelně ovlivnitelné, což je problém, ale laser ohřívá pouze danou vrstvu lokálně, a tím nedochází k velkým teplotním změnám. [2]

Velkým problémem metody laserového navařování titanové slitiny je, že vyžaduje využití ochranné atmosféry. Výzvou aditivní výroby z titanu je právě zajištění ochranné atmosféry v místě, kde titan dosahuje teploty, při které je velmi reaktivní s kyslíkem. To je způsobeno vysokou reaktivností titanové slitiny s kyslíkem, jelikož po kontaktu roztavené titanové slitiny s kyslíkem dojde k znehodnocení celého návaru. Kvůli tomu je potřeba v oblasti návaru držet ochrannou atmosféru velmi inertního plynu. Dále je



potřeba, aby tato ochranná atmosféra byla vysoce jakostní ochranný plyn, a tudíž se blížila skoro ke 100 %, což je problém, protože tyto plyny disponují mnohem menší hustotou než kyslík. V neposlední řadě je třeba také zohlednit finanční stránku, jelikož tyto plyny jsou velice drahé, proto je snahou využívat je co nejefektivnějším způsobem.

2. Cíl práce

Cílem bakalářské práce je návrh ochranné komory pro robotické navařování titanového drátu za pomoci laserového zdroje (řešerše technologie laserového navařování, definování podmínek a následný návrh). Součástí řešení je i zpracování rámcových výrobních postupů pro obrábění díly.

V teoretické části bude zmapována technologie navařování laserem. Budou zde uvedeny principy a metody technologie. Nedílnou součástí bude kapitola, která se zabývá ochrannou atmosférou a jejím vlivem na výsledné návary. Také tu bude laserová bezpečnost, kterou je potřeba při této práci dodržet.

V praktické části budou navrženy návrhy několika konceptů ochranných komor na základě požadavků, které definovala teoretická část. Po vytvoření jednotlivých konceptů ochranných komor na základě jejich parametrů bude vybrán jeden koncept, který pak bude dále více rozpracován. Pro vybraný koncept bude vytvořena výkresová dokumentace (sestavný výkres, výrobní výkres, kusovník) a rámcový výrobní postup pro obráběné dílce.

Ochrannou komoru navrhuji z důvodu potřeby udržet vysoce kvalitní ochrannou atmosféru v místě návaru i po dobu jeho chladnutí. Jedna z hlavních motivací, proč se návrhu ochranné komory věnuji, je ekonomika a kvalita navařování. Pokud je možné vytvořit prostor odpovídající velikosti součásti, na které pracuji, tak ušetřím mnoho ochranného plynu, který by musel být použit, a tím by bylo ušetřeno mnoho finančních prostředků. Další velkou výhodou je, že se inertní atmosféra snáze podaří udržet v místě návaru i během chladnutí.

3. Teoretická část

V teoretické části práce byla zpracována rešerše možností robotického navařování, dále problematiky, které přináší navařování titanového drátu pomocí laseru. Tato kapitola odhaluje informace o laserových zdrojích. V následující kapitole jsou představeny problémy, které přináší navařování titanového drátu. Dále jsou představeny plyny tvořící vhodnou ochrannou atmosféru, navařovací buňky a v neposlední řadě kinematika určená pro tento druh aditivní výroby. V závěru teoretické části je shrnutí, kde jsou všechny důležité poznatky, které jsou využity při tvorbě praktické části.

3.1. Navařování kovů laserem

Navařování kovů pomocí laserového zdroje je jedním z druhů aditivní výroby, která na rozdíl od třískového obrábění materiál na součást přidává. Přídavný materiál, který je využíván při laserovém navařování může být ve dvou variantách, a to jako prášek nebo v podobě drátu. Navařování může být využito jak pro výrobu nové součásti, tak na opravu již existující součásti nebo pomocí navařování může být na součást nanášena ochranná vrstva materiálu. [3]

Princip technologie navařování je přívod materiálu do místa návaru, kde je tepelným zdrojem nataven a poté je schopen vytvořit vrstvu na požadovaném povrchu. Při laserovém navařování slouží laser jako tepelný zdroj. Vrstva navařeného materiálu je tvořena tím, že do roztavené horní vrstvy je nanášen přidávaný materiál (již výše zmíněný drát nebo prášek).

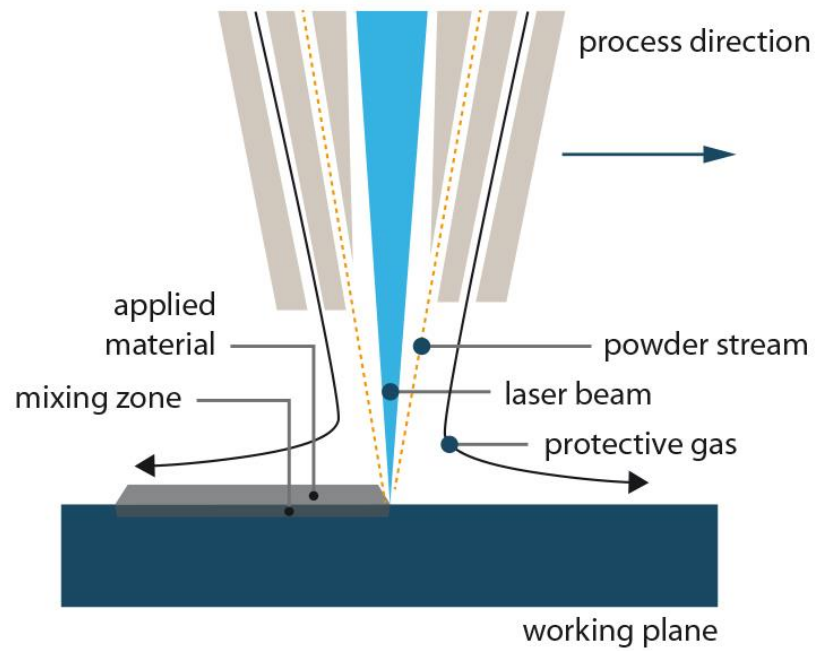
Technologie, které se používají pro navařování kovů laserem jsou LMD-w¹ a LMD-p². U těchto technologií je přídavný materiál přímo přidáván do místa tavení.

LMD-p (přídavný materiál prášek)

Při technologii LMD (Obr. 1) je přídavný materiál v podobě prášku pomocí trysky přidáván pouze do oblasti návaru. Tato technologie navařování je více rozšířená než navařování za pomoci drátu. [4] [5]

¹ LMD-w: Laser Metal Deposition -wire

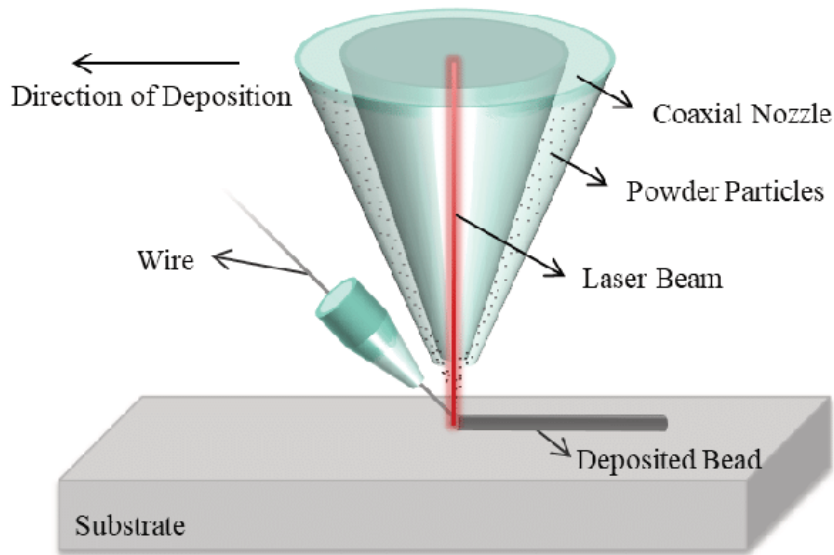
² LMD-p: Laser Metal Deposition - powder



Obr. 1 Princip technologie LMD s práškem jako přídavným materiálem [4]

LMD-w (přídavný drát)

Princip technologie (Obr. 2) je obdobný jako pro využití práškového přídavného materiálu. [5]



Obr. 2 Princip technologie LMD s drátem jako přídavným materiálem [6]

Cílem navařování je vytvoření kvalitní vrstvy navařeného materiálu bez vad a s co nejmenším tepelným ovlivněním základního materiálu. Například pokud je navařován jiný kov, než je původní materiál, je důležité dávat pozor na jejich promísení, ale tento problém odpadá, pokud je navařován stejný materiál. [7]

3.2. Problematika navařování titanu

Hlavním problémem při navařování titanu je, že titan má vysokou afinitu ke kyslíku, a to vede k jeho oxidaci a je tedy potřeba zajistit při navařování ochrannou atmosféru. Tato ochranná atmosféra musí být zajištěna nejen po dobu vlastního návaru, ale i po dobu chladnutí. Nejlépe se osvědčila ochranná atmosféra z argonu, protože je to jednoatomový plyn, který je inertní a nevytváří s žádným prvkem sloučeniny. [8] Navařování probíhá v pracovních buňkách, které jsou vyplněné tímto inertním plynem. Toto řešení je velmi nákladné, a proto je důležité nalézt variantu lokální ochrany, která je nezávislá na velikosti součásti. Ta je vytvářena pomocí procesu navařování nebo je opravováno její poškození, a to je i náplní této práce. Byli provedeny pokusy s přiváděním argonu přímo do prostoru návaru, ale toto řešení se moc neosvědčilo, protože je potřeba zajistit vysoce jakostní ochrannou atmosféru i po dobu chladnutí, aby nedošlo k znehodnocení návaru a jeho oxidaci. [8] [9]



Další důležitou částí je volba vhodné technologie navařování. Tomuto problému je blíže věnována kapitola 3.1 [8] [9]

Mezi další kritéria, které je nutné zvážit, je navařitelnost titanu podle jeho tloušťky. To je rozděleno do čtyř skupin a to: do 2 mm, do 8 mm, do 15 mm a nad 15 mm. Tohle rozdělení je vhodné pro úpravu navařených ploch a pro volbu vhodných navařovacích parametrů. [8] [9]

Při přívodu ochranné plynu je třeba zajistit rovnoměrný průtok, aby nevznikali turbulence a nedošlo k znehodnocení návaru již při procesu. Po celou dobu procesu je potřeba v prostoru návaru udržovat přetlak dle daného ochranné plynu. Pokud tento přetlak klesne dojde k znehodnocení návaru. [8] [9]

3.3. Ochranná atmosféra

Ochranná atmosféra je velice důležitá pro proces laserového navařování. Hlavním úkolem ochranné atmosféry je chránit místo návaru před vzdušným kyslíkem, který způsobuje oxidaci, ale také omezit vznik plazmy a zajistit stabilní chování taveniny. [10]

Tabulka 1 Fyzikální vlastnosti plynů [11]

	Hustota plyn $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	Tepelná vodivost $[\text{W}/\text{m}^*\text{K}]$	Ionizační energie $[\text{eV}]$	Bod varu $[\text{°C}]$	Specifický objem $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	Specifická hmotnost (vzduch=1)
Argon	1,66	$17,72 \times 10^{-3}$	15,8	-189,4	0,604	1,378
Helium	0,16	0,1513	24,6	-268,9	6,031	0,138
Vodík	0,08	0,1815	13,5	-252,8	11,968	0,0696

Tabulka 2 Vhodnost jednotlivých plynů pro laserové navařování materiálů [12]

Materiál	Argon	Helium	Dusík	Směs argonu a vodíku	Směs argonu a CO ₂	Směs argonu, CO ₂ a O ₂
Titan	x	x	–	–	–	–
Hliník	x	x	x	–	–	–
Austenitická ocel, nikl	x	x	x	x	–	–
Feritická ocel	x	x	x	–	–	–
Nelegovaná a nízkolegovaná ocel	–	–	–	–	x	x

Argon

Je bezbarvý, nehořlavý, netoxický vzácný plyn bez zápachu. Má větší hustotu než vzduch viz. Tabulka 1. Disponuje malou tepelnou vodivostí s relativně malým ionizačním potenciálem. Výroba argonu se provádí destilací kapalného vzduchu po odstranění dusíku a kyslíku. Jedná se o jeden z nejpoužívanějších ochranných plynů. Čistota plynu se označuje pomocí tzv. devítkového kódu, kdy první číslo určuje počet devítek ve stupni čistoty a druhé číslo za desetinou tečkou poslední hodnotu čísla. Například argon 4.6 označuje, že je použit argon s čistotou 99.996 %.[11] [13] [14]

Dalšími plyny, které jsou používány jako ochranná atmosféra například pro navařování austenitické oceli nebo niklu jsou:

Vodík

Je molekulární plyn, který disponuje mnohem menší hustotou než vzduch viz. Tabulka 1. Podobně jako argon má malý ionizační potenciál. Čistý vodík se nepoužívá jako ochranný plyn, ale najde uplatnění v kombinaci s argonem, přičemž zlepšuje některé jeho vlastnosti. Například zvýší tepelnou vodivost, a tím se zvýší teplota a tekutost taveniny, čímž se může zrychlit celý proces navařování. [13] [14] [15]



Helium

Je velmi lehký, bezbarvý inertní plyn. Hélium přináší oproti vzduchu nižší hustotu viz. Tabulka 1, a proto musí být zajištěn vyšší průtok plynu. V porovnání s argonem má hélium mnohem vyšší tepelnou vodivost. Díky tomu hélium poskytne širší profil návaru, ale za to má zase horší stabilitu při delších návarech. Pokud je využita ochranná atmosféra hélia, tak je v oblasti návaru vyšší teplota, než když je použita ochranná atmosféra argonu, a proto je možno navařovat vyšší rychlostí. Opět jako u argonu je využita vysoká čistota hélia, a to minimálně 99.996 %. Hlavním záporem při použití hélia je jeho cena, která je tak 7krát vyšší než u argonu. [11]

Oxid uhličitý

Je to nehořlavý, bezbarvý plyn, který je těžší než vzduch. Při koncentraci 15 % a víc procent oxidu uhličitého ve vzduchu dojde k udušení člověka. Má vysokou tepelnou vodivost, a tím i lepší přenos tepla do místa návaru. Kvalita plynu je vyjádřena počtem devítek ve stupni čistoty. Například oxid uhličitý 2.5 nebo jakékoliv jiné číslo následující pro označení plynu, vyjadřuje toto číslo čistoty, přičemž první číslo představuje počet devítek ve stupni čistoty a číslo za tečkou hodnotu posledního místa. Například oxid uhličitý 4.0 tak znamená stupeň čistoty 99,99 %. [14]

Směs argonu a vodíku

Z těchto dvou plynů může být vytvořena směs, která získá vyšší tepelnou vodivost, díky které se může snížit poréznost v návaru. Další výhodou je možnost navařování až o 30 % rychleji než v čistém argonu. Při vyšší koncentraci vodíku je možné navařovat i větší vrstvy materiálu než v čistém argonu.

Tato směs má, ale i své nevýhody a to, že není vhodná pro všechny materiály. U některých materiálů může způsobovat praskání či tvorbu pórů. [13] [16]

Směs argonu a oxidu uhličitého

Tato směs je vhodná pro vysokovýkonné metody navařování. Pro tyto plyny je charakteristická vysoká rychlost navařování. Lze využít jak pro mechanizované, tak i ruční navařování. [14]

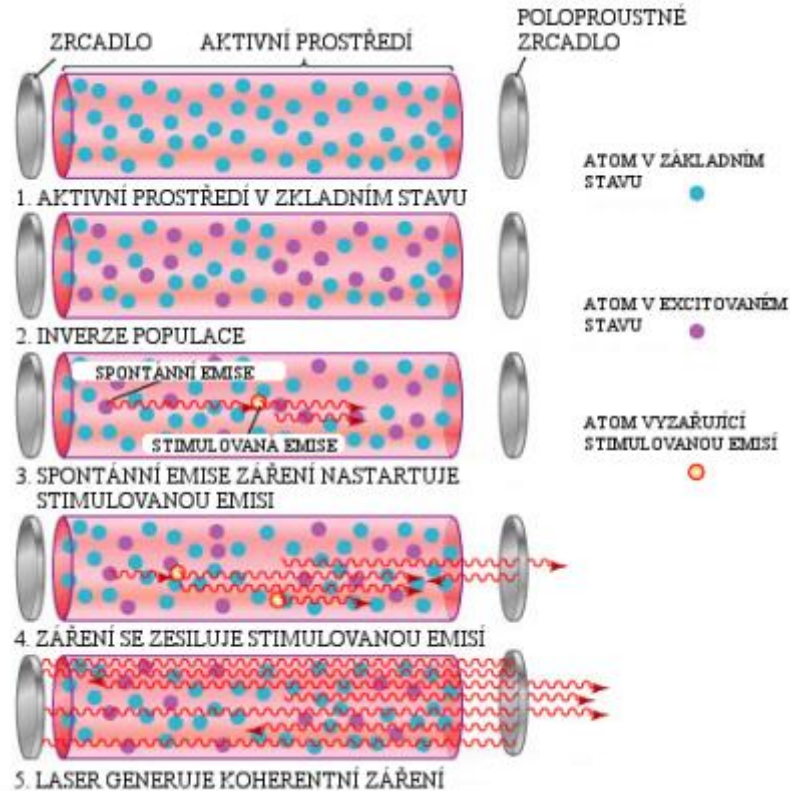
Směs argonu, oxidu uhličitého a kyslíku

Poskytují hladké a čisté návary. Vysoký obsah kyslíku způsobuje dobré odplynění. Tuto směs je vhodné použít jak pro robotické, tak i ruční navařování. [14]

O to víc je pro proces laserového navařování titanu důležitá ochranná atmosféra, protože titan velmi silně reaguje s kyslíkem a výsledkem této reakce je oxidace. Podle druhu materiálu se zvolí vhodný ochranný plyn viz. Tabulka 2 v našem případě je pro navařování titanu využitý argon.

3.4. Laserové zdroje

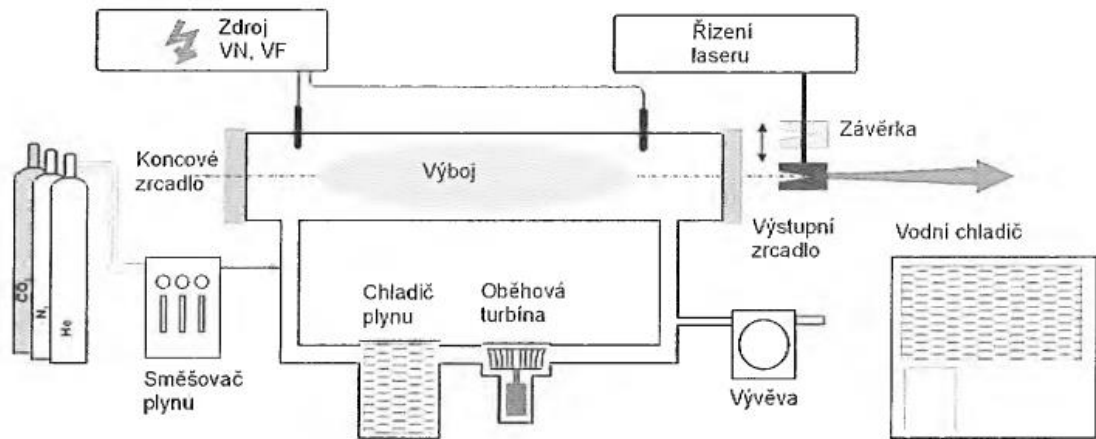
Slovo laser vzniklo jako akronym z anglického pojmenování Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což v překladu znamená zesilování světla stimulovanou emisí záření. Ve své podstatě je laser optický zesilovač, který generuje elektromagnetické záření (světlo) pomocí procesu stimulované emise fotonů. Princip laseru vychází ze zákonů kvantové fyziky a termodynamiky. Tělo laseru se skládá z rezonátoru, zdroje energie a aktivního prostředí. Zdrojem energie může být výbojka, která vytváří energii, jenž se dostává do aktivního prostředí. V tomto prostředí se elektrony díky přidané energii přesunou do vyšší energetické hladiny a vznikne inverze populace, což znamená, že většina elektronů v aktivním prostředí je vybuzena do vyšších energetických stavů. Prostor má snahu být ve stavu s co nejnižší energií. Proto elektrony opouštějí vyšší energetickou hladinu a uvolní tak nahromaděnou energii ve formě fotonů. Uvolněné fotony vyvolávají lavinový efekt, kdy naráží do elektronů ve vyšších hladinách, které pak emitují další fotony. Fotony následně putují rezonátorem viz. Obr. 3 a odráží se od zrcadel, kde počet fotonů rapidně narůstá, jsou usměrněny do jednoho paprsku s velmi vysokou hustotou energie. Laserový paprsek je monochromatický (jednobarevný), koherentní (fotony jsou ve fázi) a má velmi nízkou rozbíhavost svazku, a tak může být zaostřen do velmi malého bodu a působit na větší vzdálenost. Efektivita laserového paprsku je poměrně nízká, v nejlepším případě dosahuje desítky procent. Zbylá energie se proměňuje v teplo a je tedy nutné aktivní prostředí laseru chladit, aby se prodloužila životnost laseru. Chlazení probíhá pomocí vzduchu u méně výkonných laserů, při vyšších výkonech se na chlazení používá deionizovaná voda. [17][18]



Obr. 3 Otevřený rezonátor [19]

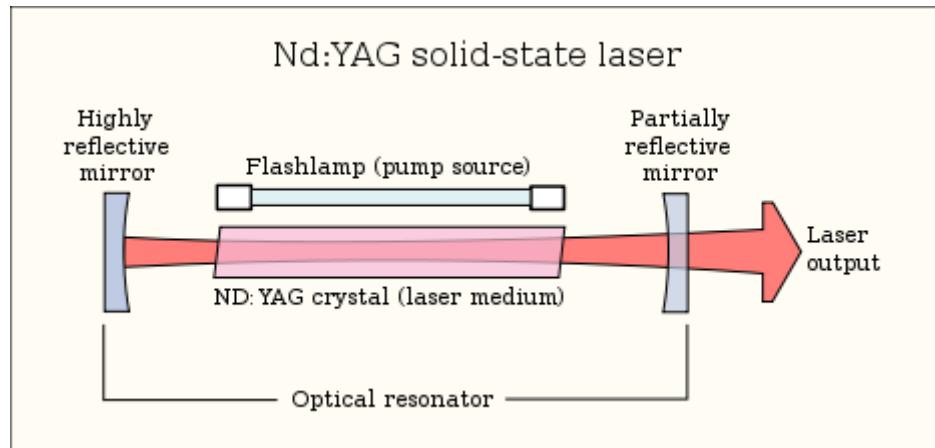
Laserové zdroje od svého začátku používání v průmyslu prošli nějakým vývojem.

Prvním druhem laserového zdroje využívaného v průmyslu byl CO_2 laser viz. Obr. 4, ve kterém byl plyn buzený doutnavým elektrickým výbojem. Tyto lasery byli používány od poloviny 60 let minulého století s výkonem desítek wattů. Aktivní prostředí u těchto laserů bylo tvořeno molekulami CO_2 . U tohoto typu laseru se dá dosáhnout většího výkonu přidáním dusíku a hélia, čímž se vylepší plynná směs. Dále změnou musela projít celá konfigurace zařízení a to, že už nestačila konfigurace tzv. odtaveného systému, kdy se jednalo o uzavřenou výbojovou trubici s čely tvořenými zrcadly. Musel být do konfigurace vřazen k výbojovým trubicím ještě cirkulační okruh s oběhovou turbínou a chladičem, což zajistilo, že byl elektrický výboj dostatečně chlazen. Účinnost takového laserového zdroje dosahovala cca 7 %. [20] [21]



Obr. 4 CO₂ laser [20]

Druhým druhem laserového zdroje je Nd-YAG laser. Jedná se o pevnolátkový laser, jehož aktivní prostředí je zpravidla tvořeno válcovou tyčkou Yttrium-hlinitého granátu. V této podobě moc do průmyslu neprorazil, protože vysokotlaké výbojky vykazují krátkou životnost, protože vlivem širokospektrálního čerpacího záření je tyčka silně tepelně namáhána, což se negativně podepisuje na zhoršující se kvalitě výstupního laserového svazku, poklesu výkonu a na snížení životnosti tyčky Nd-YAG. V tomto případě účinnost zařízení dosahovala cca 3 %, proto byli v další generaci nahrazeny čerpající výbojky řadami výkonových laserových diod. Takto vytvořený zdroj měl výhodu v tom, že budící záření bylo již úzkopásmové a přesně naladěné na absorpční pás v Nd-YAG krystalu. Po této změně se zvýšila účinnost zařízení na cca 30 % a došlo také na zlepšení stability výstupního modu a výkonu. Poslední generací tohoto typu jsou tzv. diskové lasery, kdy je tečka nahrazena tenkým diskem z Nd-YAG materiálu s natmeleným koncovým zrcadlem na robustním chladiči. Pro zvýšení výkonu takového zařízení se sériově řadí více disků do jednoho laseru. Díky tomu se tomuto typu podařilo překonat všechny nevýhody základního modelu. [20] [9]

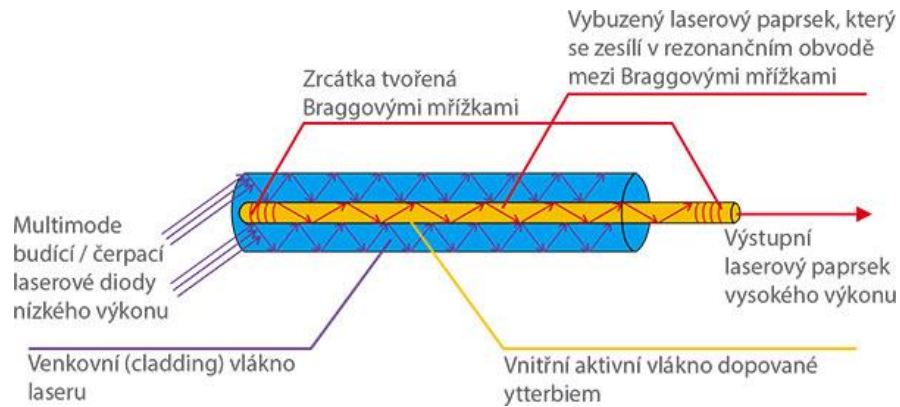


Obr. 5. Nd-YAG laser schéma [20]

Třetím druhem laserového zdroje je vláknový paprsek viz. Obr. 6. Tento druh laserového zdroje potlačuje nevýhody konfigurace pevnolátkového laseru. Snaží se vytvořit z aktivního prostředí optické vlákno, kterým se bude souběžně šířit budící záření laserovým paprskem viz. Obr. 6. Budící zařízení tohoto zdroje pochází z LED zdrojů navázaných na vlákna, nikoliv na laserové diody viz. Obr. 6. Tato vlákna jsou vícevrstvá. Jádrem tvoří aktivní prostředí a druhou vrstvou je vedeno budící záření. Tento paprsek má velkou intenzitu. [20]

Hlavní výhodou vláknového laseru je mechanická jednoduchost, neboť vlákno nepotřebuje žádné seřizovací prvky rezonátoru nebo složité chladicí okruhy a v neposlední řadě budící LED mají velkou životnost. Všechny tyto výhody jsou vykoupeny všemi technickými těžkostmi popisovanými o pár řádků výše, ale přesto klady mnohokrát vyváží všechny zápory a problémy. [20]

Pro vláknový laserový zdroj je používána jako aktivní látka Ytterbiu. Laserový zdroj generuje vlnovou délku, která je velmi blízká infračervené oblasti (1,07 μm) a účinností dosahuje přes 30 %. Díky všem výše zmíněným vlastnostem dalece předčí CO_2 laserové zdroje. Tyto zdroje jsou velmi vhodné pro svařování/nařování různých kovů. [20]

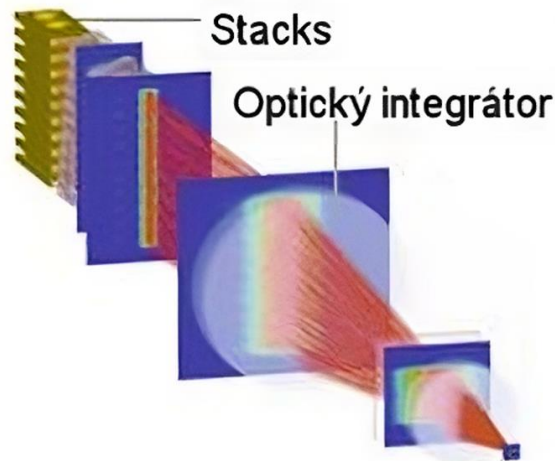


Obr. 6 Vláknový paprsek [20]

Čtvrtý druhem laserového zdroje je polovodičový laser. Je to speciální typ pevnolátkového laseru buzeného průchodem elektrického proudu. Jednoduše řečeno se jedná o velmi speciální typ svítivé LED diody, která je navíc opatřena optickým rezonátorem. S tímto druhem zdroje se již experimentálně začalo pracovat polovinou 60. let minulého století. K zásadní změně v této technologii došlo až po pokroku v oblasti s polovodiči, které konečně umožnili vytvářet polovodičové lasery s trvalým výkonem několik desítek wattů, protože do té doby byl zásadním problémem této technologie malé provozní napětí pouze v desítkách ampér, což nebylo dostačující. Účinnost tohoto zdroje je v rozmezí 30 až 40 %. U tohoto typu laserového zdroje lze dosáhnout výkonu v řádu kilowatů sloučením jednotlivých polovodičových zdrojů do jednoho tzv. stacku viz Obr. 6. Poté takovýto laser obsahuje ve své hlavici několik těchto tzv. stacků, které jsou poté opticky sloučeny do jednoho výstupního paprsku. [20] [22]

Hlavní výhodou polovodičového laseru je jejich kompaktnost. Všechny předchozí uvedené druhy jsou v jejich reálné podobě velké. K jejich technické aplikaci je nutné dopravit sadu zrcadel nebo optických vláken, ale to neplatí pro polovodičový laser, protože ten je mnohem kompaktnější a je možné ho připevnit na rameno robotu. Jako každý laser potřebuje proudový budící zdroj, ale ten by mohl být v tomto případě v oddělené skříni.

Hlavní nevýhodou je potřeba složitého optického systému, a tím pádem jeho pořízení je mnohem dražší. [20]



Obr. 7 Polovodičové zdroje [20]

V dnešní době je největší uplatnění a využití v průmyslových aplikacích ve vláknových a diodových (polovodičových) laserových zdrojích. Pro proces navařování, aby byl efektivní je potřeba volit laserové zdroje s větším výkonem, minimálně od 2 kW s hustotou výkonu okolo 100 W/mm² a délkou interakce v řádech sekund. Sice se používají laserové zdroje slabší s výkonem v desítkách wattů, ale ty jsou spíše vhodné pro ruční navařování a pro strojní navařování jsou vhodnější silnější laserové zdroje. [20] [23]

Výrobou a vývojem laserových zdrojů se zabývají firmy například Trumpf, U.S. Laser nebo Coherent, které nabízejí lasery vhodné přímo pro navařování a také se dají přímo zakoupit už integrované v různých zařízeních.

3.5. Navařovací hlavy

Pro navařování z prášku existují koaxiální navařovací hlavy. Tento druh navařovacích hlav je velmi rozšířený pro jejich jednoduchou konstrukci a výhodnou pořizovací cenu. Dávají možnost navařování ve všech směrech. Například zařízení pro navařování s bočním přívodem z prášku se skládá z navařovací hlavy a boční práškové trysky.

Výrobce koaxiálních hlav pro navařování z prášku je i firma Precitec. Ta nabízí model tohoto zařízení, a to YC52 viz Obr. 8. Hlavy jsou vhodné pro všechny pevnolátkové lasery s vysokou kvalitou laserového svazku. Dají se také navařovat jak v horizontálním, tak i ve vertikálním směru. [6]



Obr. 8 Precitec YC52 [6]

Dalším výrobcem koaxiálních hlav je firma Kuka. Nabízí například kompaktní hlavu Kuka značky MWO-I (Obr. 9) [37]



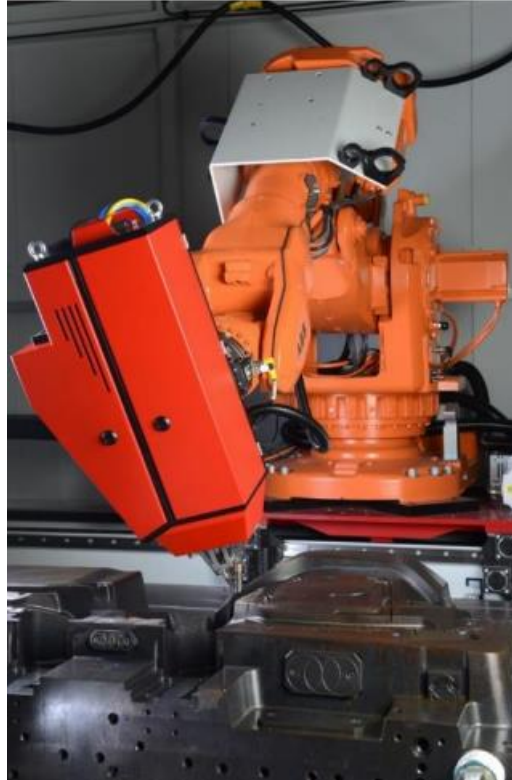
Obr. 9 Kuka MWO-I [25]

3.5.1. Hlavy pro navařování z drátu

Pro navařování z drátu existují koaxiální hlavy nebo hlavy s bočním přívodem drátu. Skládají se z laserové optiky a podávacího mechanismu.

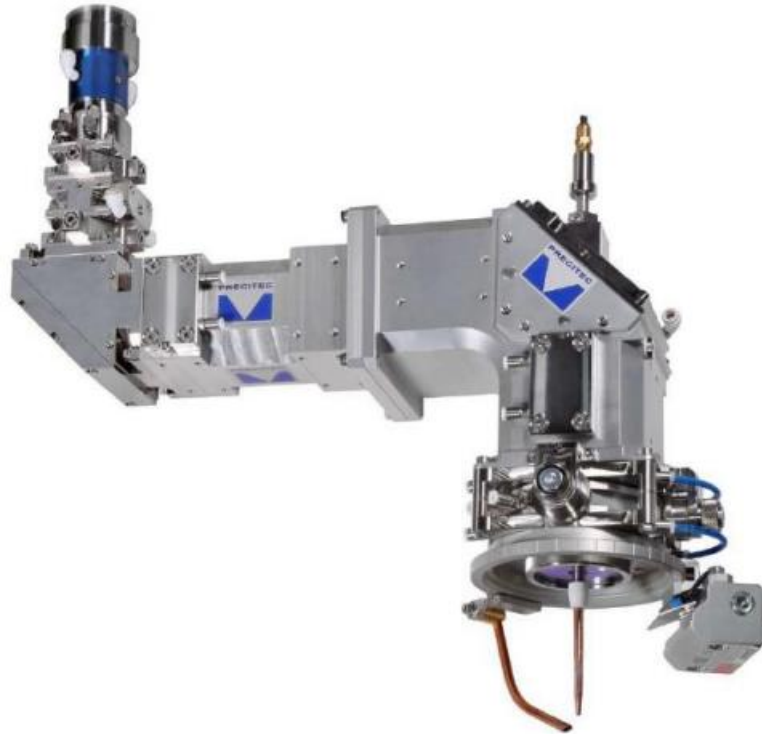
Například Institut Fraunhofer IPT nabízí navařovací hlavu s bočním přívodem drátu a podavačem v rámci jedné konstrukce. Jedná se o hlavu LMD-W-20-L, která je vhodná k integraci do stávajících výrobních linek a zařízení. Na Obr. 10 je nesena na rameni robota. Drát je do procesu

přiváděn pod úhlem 20° od osy hlavy, čímž je zajištěna stabilita procesu a vysoká účinnost tavení drátu. Použitý podavač dovoluje přívod drátu o průměru až 1,2 mm. Velikost spotu laserového paprsku je 2,1 mm. Celková hmotnost hlavy je přibližně 38 kg. [2]



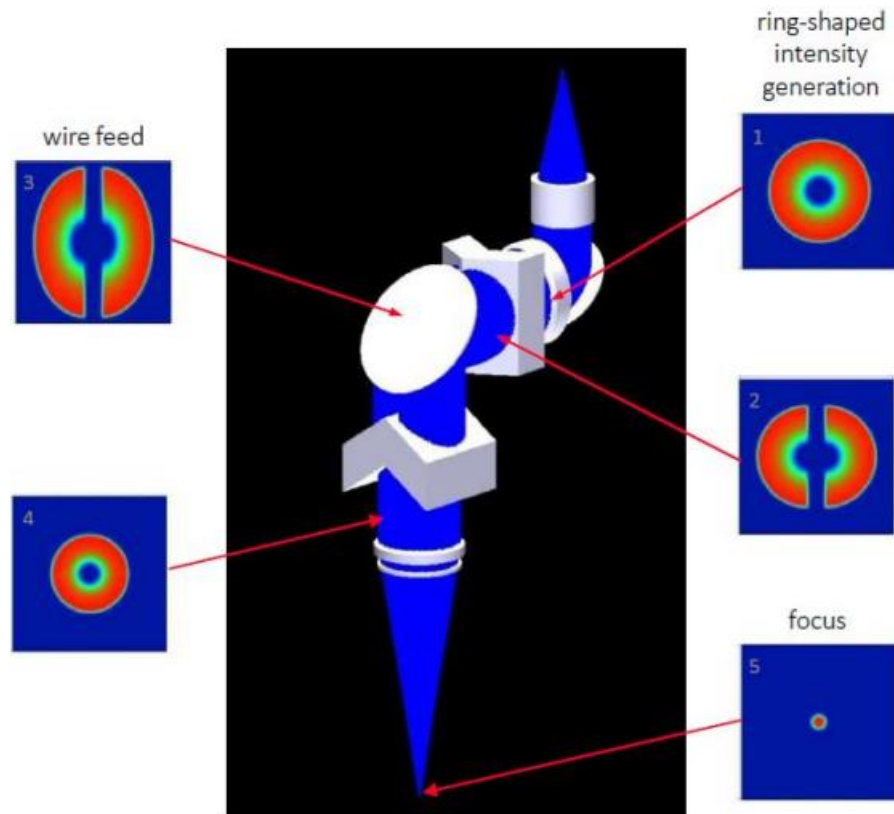
Obr. 10 Navařovací hlava LMD-W-20-L [2]

Společnost Precitec nabízí další možnost, a to koaxiální hlavu CoaxPrinter viz. Obr. 11. Hlavu je možné používat s běžnými typy laserů s maximálním výkonem 6kW. Její hmotnost je 12 kg a je určena pro navařování z drátu od průměru 1,0 mm do 1,6 mm. Hlavu je velmi jednoduché integrovat do již stávajících výrobních strojů nebo robotů. Rychlost navařování může být vyšší jak 5 m/min. [26]



Obr. 11 Koaxiální navařovací hlava CoaxPrinter [26]

Na Obr. 12 je ukázán princip rozdělení paprsku v navařovací hlavě CoaxPrinter od společnosti Precitec. Vstupující paprsek disponuje profilem prstence (1). V místě (2) je prstenec rozdělen na dvě části a v místě (3) je do středu prstence přiveden drát. Následně dojde v místě (4) k opětovnému uzavření profilu a po výstupu z hlavy je prstencový paprsek fokusován do spotu (5). [26]



Obr. 12 Rozdělení paprsku v navařovací hlavě CoaxPrinter [26]

Pro navařování z drátu je lepší varianta navařovací hlavy z důvodu jednodušší konstrukce, kde se nemusí řešit odsávání zbytkového práškového materiálu. Dále odpadne bezpečnost manipulace, práce s kovovým práškem, a i s tím spojená zdravotní rizika.

3.6. Navařovací buňka

Navařovací buňka je speciálně uzpůsobený prostor pro práci laserového zdroje a po většinou i průmyslového robota tak, aby neohrožoval okolí svého pracoviště. Bohužel většina navařovacích buněk se staví přesně dle požadavků zákazníka.

Nabídka buněk pro laserové navařování

Například firma TRUMF nabízí svůj koncept řešení TruLaser Cell 7040 viz. Obr. 13, kdy se jedná o více funkční zařízení, které kromě navařování zvládá 2D a 3D laserové řezání, ale také laserové svařování.



Obr. 13 Navařování buňka TRUMP TruLaser Cell 7040 [27]

3.6.1. Bezpečnost práce s lasery

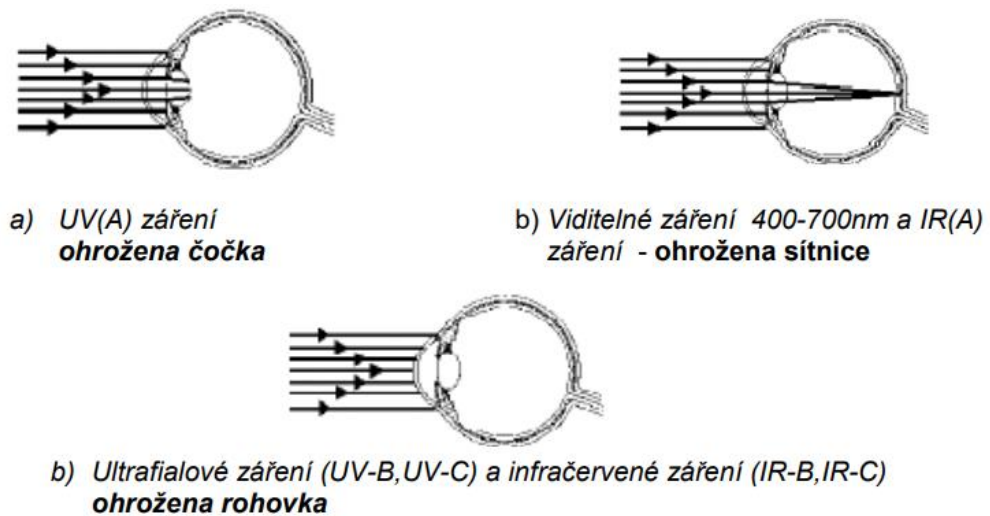
Zdroje laserového záření jsou nebezpečné pro živé tkáně, ale i pro životní prostředí. Jejich účinky se rozdělují na tepelné, netepelné a vedlejší.

Tepelné účinky způsobené absorpcí energie záření a její přeměnou na teplo mohou způsobit podráždění nebo devastaci tkání.

Mezi netepelné účinky je řazen akustický tlak velmi krátkých pulsů nebo vysoce intenzivní elektrické pole či fotochemické účinky.

Vedlejší účinky představují také vážné nebezpečí, které může vést k poškození zdraví nebo destrukci okolního prostředí. Patří sem možný úraz elektrickým proudem z vysokonapěťového výboje, požár, který může vzniknout při zpracovávání některých materiálů či výbuch při špatné manipulaci s plynovými nádobami a apod.

Při práci s laserem je nezbytné chránit nejen kůži a zrak před zářením, ale v některých případech také sluch či dýchací ústrojí. Tyto pomůcky se zaměřují primárně na ochranu před přímým zasažením samotným svazkem. Při používání některých typů laserů je nezbytná ochrana před difuzně rozptýleným zářením, které je rovněž nebezpečné a může poškodit zdraví. Největší pozornost je kladena na ochranu zraku. Jednotlivé anatomické části oka jsou citlivé na různé vlnové délky vstupujícího záření Obr. 14. Sklivec je transparentní část, ale může být poškozen tlakovými účinky. [17]



Obr. 14 Ohrožení zraku laserovým zářením [17]

3.6.2. Třídy bezpečnosti laserů

Podle výkonu, vlnové délky a účinků na lidský organismus se lasery na základě mezinárodních a národních norem zařazují do několika tříd bezpečnosti. V České republice toto upravuje Nařízení vlády č. 480/2000 Sb., část 139 ze dne 22. 11. 2000 a Zákon o ochraně veřejného zdraví a o změně některých souvisejících zákonů č. 258/2000 ze dne 14. 7. 2000.



Třída 1

Lasery všech vlnových délek o výkonu menším než $0,4 \mu\text{W}$ nebo všechny laserové systémy s libovolným výkonem, které mají zcela zakrytou dráhu svazku a pracovní plochu, všechna víka, kryty a dveře jsou zabezpečena proti neoprávněnému otevření během činnosti laseru. K práci s laserem této kategorie není třeba žádných dalších ochranných pomůcek.

Třída 2M

Kontinuální lasery emitující záření ve viditelné oblasti s výkonem menším než 1 mW , před kterými je oko schopno se dostatečně chránit vrozenými reflexy, poškození však může způsobit přímý pohled po delší dobu, stejně jako do konvenčních světelných zdrojů. Oko fokusuje dopadající laserový svazek na plochu $3 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2$, což pro kontinuální výkon 1 mW představuje hustotu energie $333 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$. To je přibližně $30\times$ více než při přímém pohledu do poledního letního slunce. Do této třídy patří i laserové ukazovátko.

Třída 3R

Kontinuální lasery s výkonem menším než 5 mW , jejichž plošná hustota výkonu po fokusaci není větší než $2,5 \cdot 10^3 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$. Oko není poškozeno, pokud okamžitě zareaguje a svazku se intuitivně vyhne. Nelze však používat pro pozorování svazku spojnou optiku. Tyto lasery musí být označeny nálepkou CAUTION nebo DANGER.

Třída 3B

Kontinuální lasery s výkonem $5\text{--}500 \text{ mW}$ nebo pulsní lasery s plošnou hustotou energie do $10 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$, které poškozují tkáň při přímém vystavení, difúzní odraz není nebezpečný.

Třída 4

Všechny lasery s výkonem od 500 mW nebo energií nad $10 \text{ J}\cdot\text{cm}^{-2}$, jejichž difúzní odraz poškodí živou tkáň. Pro práci s touto třídou laserů je bezpodmínečně nutné používat ochranné pracovní pomůcky a dodržovat předepsaný provozní řád. [17]

3.6.3. Ochranné prostředky a bezpečnostní opatření pro práci s laserem

Základní ochranné prostředky jsou obvykle dodávány již se samotným laserem. Pokud se tak nestane, je provozovatel povinen jimi pracoviště vybavit. V současné době je na trhu řada firem



specializovaných na výrobu a distribuci ochranných prostředků pro práci s laserem.

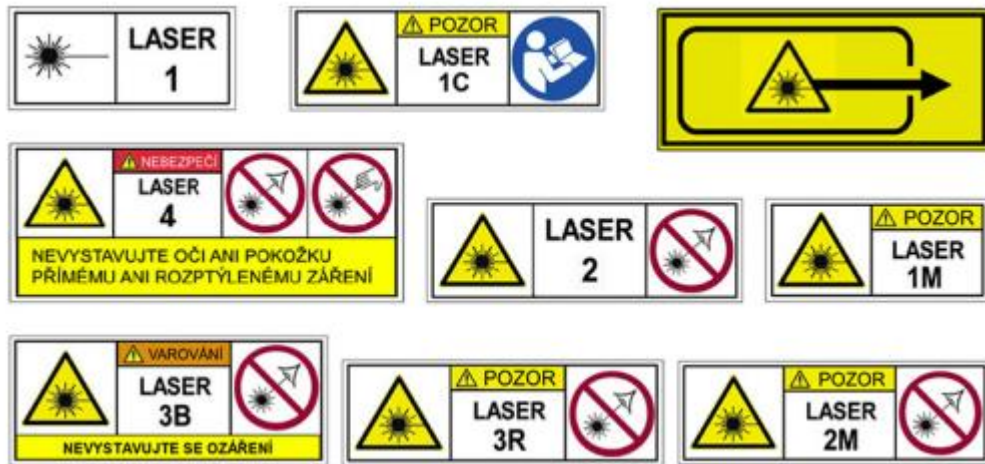
Mezi základní ochranné prostředky patří brýle se speciálními filtry, které nepropustí záření vlnové délky používaného laseru. Lasery různých vlnových délek tedy vyžadují různé druhy ochranných brýlí. Například při práci s CO₂ laserem jsou dostatečné brýle s obyčejnými skly doplněné bočním stíněním, neboť záření tohoto laseru o vlnové délce 10 600 nm sklem neprochází.

Kůži chrání rukavice a pracovní oděvy ze speciálních materiálů, odrážejících záření dané vlnové délky. Při chodu průmyslových vysoko výkonových systémů je nezbytné chránit i sluch, neboť hluk, který produkuje současně mnoho zdrojů (elektrický zdroj, chlazení, odsávání, kompresory, případně i samotná interakce záření s materiálem aj.), může vést k jeho nevratnému poškození. Používání ochranných sluchadel nebo jiných prostředků ochrany sluchu je proto v takových případech nezbytné.

Laserové pracoviště musí být u vstupu vždy označeno výstražnými tabulkami viz. Obr. 14, které jednak informují o nebezpečí laserového záření, ale také vyzývají k použití ochranných brýlí nebo ochrany kůže a upozorňují i na možnou přítomnost tlakových lahví s plyny.

O chodu laseru informuje nad vchodem rozsvícené žluté světlo s nápisem: **NEVSTUPOVAT LASEROVÉ ZÁŘENÍ!** Současně může chod laseru signalizovat oranžová nebo červená kontrolka na laserové hlavici, kterou lze doplnit akustickým signálem, informujícím o otevření závěrky. V místnosti může být laserový systém ještě ohrazen ochrannými závěsy.

Dále jsou na laseru u každé apertury, ze které může vystupovat laserové záření, umístěny výstražné štítky. Jejich vzhled je dán mezinárodní normou. Tyto štítky vždy obsahují informaci o třídě bezpečnosti laseru a možném nebezpečí. Rovněž všechny spínače a připojení vnějších kabelů s životu nebezpečným napětím musí být označeny. [17][19]



Obr. 15 Bezpečnostní štítky pro třídy 1-4 [19]

Přehled bezpečnostních norem

Všechny zde uvedené normy by měla navařovací buňka splňovat, aby mohla být použita v průmyslu.

EN ISO 12100	Všeobecné principy konstrukce Posouzení rizik a snížení rizik	Část 1: Definuje základní terminologii a metodologii použitou pro dosažení bezpečnosti strojních zařízení. Část 2: Definuje technické zásady, které pomáhají dosáhnout bezpečnosti při návrhu strojního zařízení
EN ISO 13857	Bezpečné vzdálenosti, které brání průniku horních a spodních končetin do nebezpečné oblasti	Definuje hodnoty pro bezpečné vzdálenosti, které brání průniku horních a spodních končetin do nebezpečných oblastí. Tyto vzdálenosti platí pro případ, kdy odpovídající bezpečnosti je možno dosáhnout těmito vzdálenostmi
EN 349 (ISO 13854)	Minimální vzdálenosti k tomu, aby se zabránilo rozdrčení lidského těla	Cílem této normy je umožnit uživateli (například sestavitelům norem, konstruktérům strojních zařízení), aby se vyhnuli nebezpečí, která pro ně plynou z oblasti, kde může dojít k rozdrčení. Zde jsou specifikované minimální vzdálenosti k částem lidského těla. Norma platí v případě, že touto metodou je možno dosáhnout odpovídající bezpečnosti.

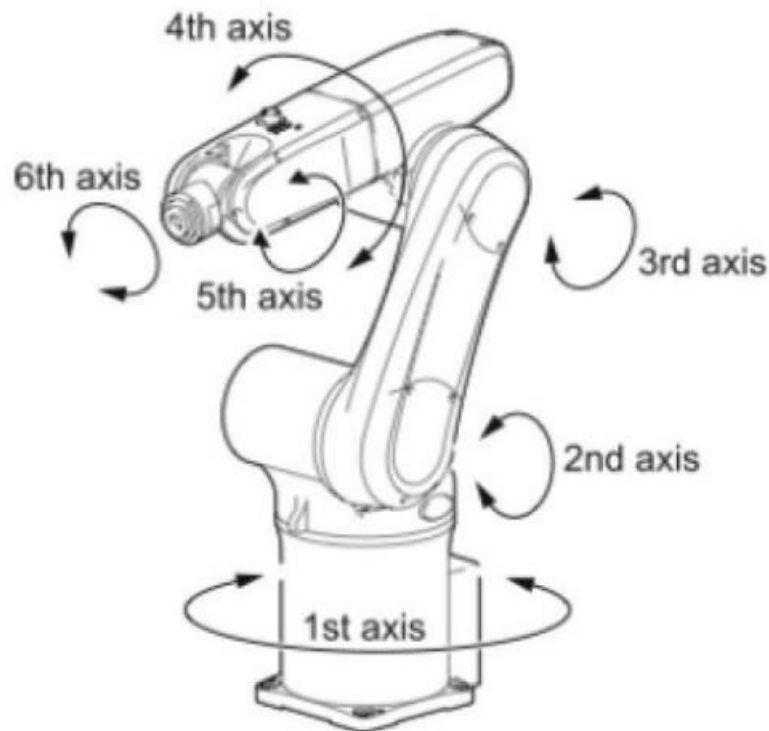


EN ISO 13850	Nouzové vypnutí a jeho zásady pro konstrukci	Zásadní pro konstrukční návrhy nouzového vypínacího zařízení u použitého stroje.
EN 953	Všeobecné požadavky na konstrukční návrh a konstrukci pevných a pohyblivých krytů	Všeobecné požadavky na návrh a konstrukci krytů určených především k ochraně osob před mechanickým nebezpečím
EN ISO 13849-1	Díly řídicích systémů související s bezpečností Část 1: Všeobecné principy návrhu	Tato norma stanovuje bezpečnostní požadavky a návody principů návrhu bezpečnostních dílů řídicího systému. Specifikuje pro tyto díly kategorie a popisuje charakteristiky jejich bezpečnostních funkcí. Patří sem programovatelné systémy pro všechny strojní zařízení.
EN ISO 13849-2	Díly řídicích systémů související s bezpečností	Postupy a podmínky, které je třeba dodržet při validaci prostřednictvím analýzy a testování: zabudovaných bezpečnostních funkcí a kategorie dosažené bezpečnostními díly řídicího systému, v souladu s normou EN ISO13849-1, pomocí návrhových principů stanovených projektantem
EN 62061	Funkční bezpečnost bezpečnostních elektronických a programovatelných elektronických řídicích systémů	Bezpečnostní požadavky a vůdčí principy pro návrh programovatelných dílů řídicího systému.
EN ISO 13855	Polohové umístění krytů vzhledem k rychlosti přibližování části lidského těla	Stanovení parametrů na základě hodnoty rychlosti přibližování ruky/paže a definuje metodologii pro stanovení minimálních vzdáleností od specifického snímacího nebo regulačního prvku ochrany, ke vstupu do nebezpečné zóny
EN 1088 a EN 1088/A1	Blokovací zařízení související s kryty. Principy konstrukčního návrhu a výběr	Návrh a výběr pro blokovací zařízení související s kryty. Dále uvádí požadavky určené specificky pro elektrická blokovací zařízení. Norma se týká těch krytů, které ovládají blokovací zařízení.

3.7. Kinematika svařovacích robotů

Pro naši aplikaci se laserový zdroj nachází na průmyslovém kloubovém robotu.

Tento robot disponuje šesti nezávislými osami, které umožňují velkou flexibilitu. Tento druh robotu je velmi hojně využíván v průmyslu pro různé aplikace. Robot s osami je zobrazen viz. Obr. 16, které jsou poté více rozvedeny. [28]



Obr. 16 Průmyslový robot [28]

Osa 1

První osa prochází základnou robota a dává robotovi schopnost se otáčet zleva doprava. Tyto pohyby umožňují robotovi rozšířit svojí pracovní oblast jak po stranách, tak před a za robotem. Díky této ose se robot dokáže otočit o 180° od středu.

Osa 2

Druhá osa umožňuje kyvný pohyb dopředu a dozadu. Tato osa je velmi důležitá, protože napájí pohyb celého ramene.

Osa 3

Třetí osa má schopnost zvýšit a snížit rameno, takže rozšiřuje svislý dosah robota. Některé kloubové modely umožňují sahat tzv. „za tělo“, a tím



rozšířit pracovní prostor robota. Pro některé aplikace může být tato schopnost nezbytná.

Osa 4

Čtvrtá osa ve spolupráci s pátou osou pomáhá při správném nastavení laseru a koncového senzoru. Tzv. zápětní válec má na starost otáčení horního ramene pohyblivými částmi v kruhovém pohybu mezi horizontálními a vertikálními orientacemi.

Osa 5

Pátá osa umožňuje sklápění „zápěť“ robota nahoru a dolů. Zodpovídá za pohyb v tahu a zatáčení, stoupání nebo ohyb osou nahoru a dolů, lze to připodobnit k otevírání a zavírání pátých dveří u automobilu.

Osa 6

Šestá osa je nejdůležitější ze všech os robota, protože je zodpovědná za kroucení, jelikož je kruhový pohyb kolem 360° neboli také ještě „volný pohyb“, a to buď po směru nebo proti směru hodinových ručiček. [28]

Po většinou roboti pracují v Kartézském pracovním prostoru a to proto, aby bylo ulehčeno jejich případné programování. Navařovací roboti jsou řízeni pomocí programů.

3.8. Shrnutí teoretické části

Teoretická část seznamuje a blíže popisuje metody laserového navařování. Dále se také zabývá zařízeními pro navařování a problematikou navařování z titanového drátu. Z rešerše vyplývá, že pro kvalitní navařování přídavného materiálu je potřeba asistence ochranné atmosféry. Tu zajišťuje vhodně zvolený druh plynu. Dále z rešerše vyplývá, že pro navařování je přídavný materiál využit ve formě prášku nebo drátu. Při navařování z prášku jsou výsledkem velice kvalitní návary se zanedbatelným promísením základního materiálu s přídavným. Při navařování práškového přídavného materiálu vzniká prašnost, protože není nikdy všechn přídavný materiál navařen. Za to, pokud se používá přídavný materiál v podobě drátu, tak se prašnost nezvyšuje, ale je problém v tom, že přebytečný materiál sám neodpadne.

Pro navařování vznikly speciální prostory s názvem navařovací buňky. Tyto buňky jsou speciálně uzavřené prostory, aby mohli izolovat



laserový proces navařování od okolí, protože laserové záření je pro člověka nebezpečné a během procesu vznikají nebezpečné spaliny. Tyto laserové buňky musejí splňovat normy ohledně laserové bezpečnosti. Existuje obecná bezpečnost pro práci s laserovými zdroji. Laserové zdroje jsou rozděleny do tříd a podle jednotlivých tříd je uzpůsobena i laserová bezpečnost.

4. Praktická část

Praktická část bakalářské práce je zaměřena na návrh ochranné komory pro laserové robotické navařování titanového drátu. Cílem práce je návrh komory, podle kterého by se dala zhotovit.

4.1. Návrhy řešení

Z provedené rešerše vyplývá, že pro navařování titanu je nezbytná kvalitní ochranná atmosféra pro kvalitní proces navařování titanového drátu. Pro zajištění kvalitní ochranné atmosféry v místě návaru jsem navrhl dva koncepty řešení uzavřeného prostoru, které zajišťují v bodě návaru kvalitní ochrannou atmosféru. Každý z konceptů má rozdílnou konstrukci, která má své výhody a nevýhody.

Vstupní rozměry, které se musí dodržet jsou: rozměr laserové hlavy 75x150 mm, maximální průměr stolu 500 mm a maximální výškou do 600 mm. Dále by měla být komora osazena senzory pro kontrolu procesu. Materiály, které budou použity na jednotlivé součásti komory musí mít tepelnou odolnost vůči teplotě, která vzniká při procesu. Všechny spoje musejí odolat přetlaku po natlakování komor.

4.1.1 Návrh číslo 1

Jako první koncept jsem navrhl pružný návlek z PVC fólie (musí splňovat normu DIN 53 438 T2. kvůli zátěži teplotou a v případě kontaktu s roztaveným kovem svoji nehořlavost). První koncept je pouze z pevných připojovacích členů, což mu umožňuje volnost pohybu. Na Obr. 17 jsou jednotlivé části návrhu popsány. Návrh se skládá z polohovatelného stolu a těsnění (řešeno pomocí o-kroužku viz Obr. 18). Těsnění utěsňuje spoj mezi spodním dílcem připojovací příruby a polohovacím stolem. Dalším dílcem Obr. 18 je duralové technické rozhraní, kterým je přiváděna ochranná atmosféra do uzavřeného prostoru, ale také se zde nacházejí otvory pro technické potrubí, která ochlazuje přípravek pro navařování, který se nachází namontovaný na stole. Přívod technického potrubí skrz technické rozhraní je řešen, tím že v technickém rozhraní se nacházejí rychlospojky do kterých se připojí technické potrubí. Jako další díl přichází pružná PVC fólie, která je ke spodní části kompletu přidělena horní



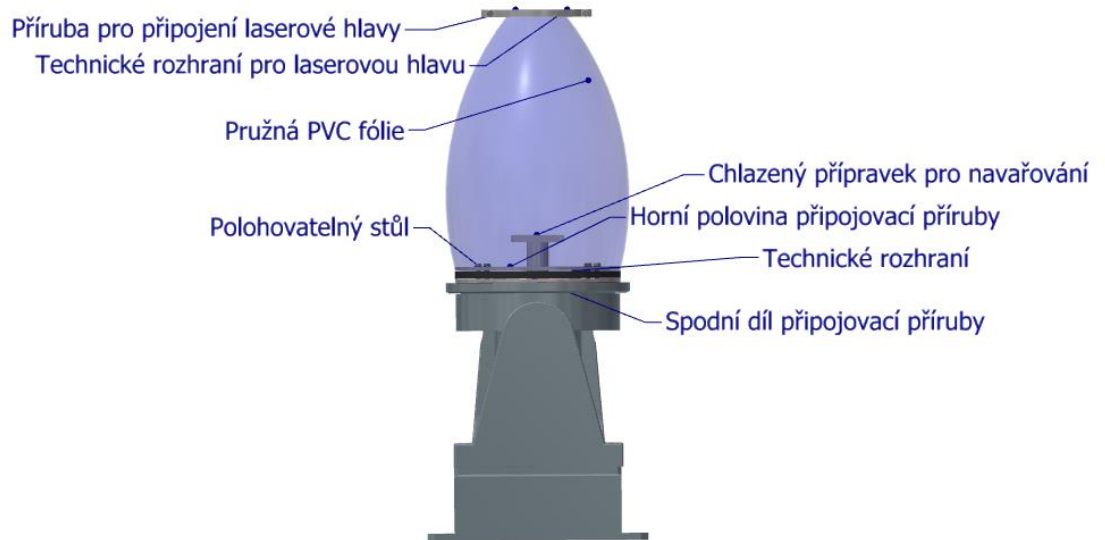
polovinou připojovací příruby viz Obr. 18, která pomocí šroubů se šestihrannou hlavou vše spojuje s polohovacím stolem svěrným spojem.

Pružná PVC fólie je natažena až k navařovací hlavě, ke které je připojena pomocí příruby a svěrného spoje. Příruba, která spojuje laserovou hlavu s pružnou PVC fólií obsahuje technické rozhraní, kterým jsou přiváděny technické plyny pomocí tlakových hadiček potřebné pro provoz laserové hlavy. Dále technické rozhraní obsahuje otvor pro odsávací hadici, která by odsávala spaliny, které vznikají při procesu navařování.

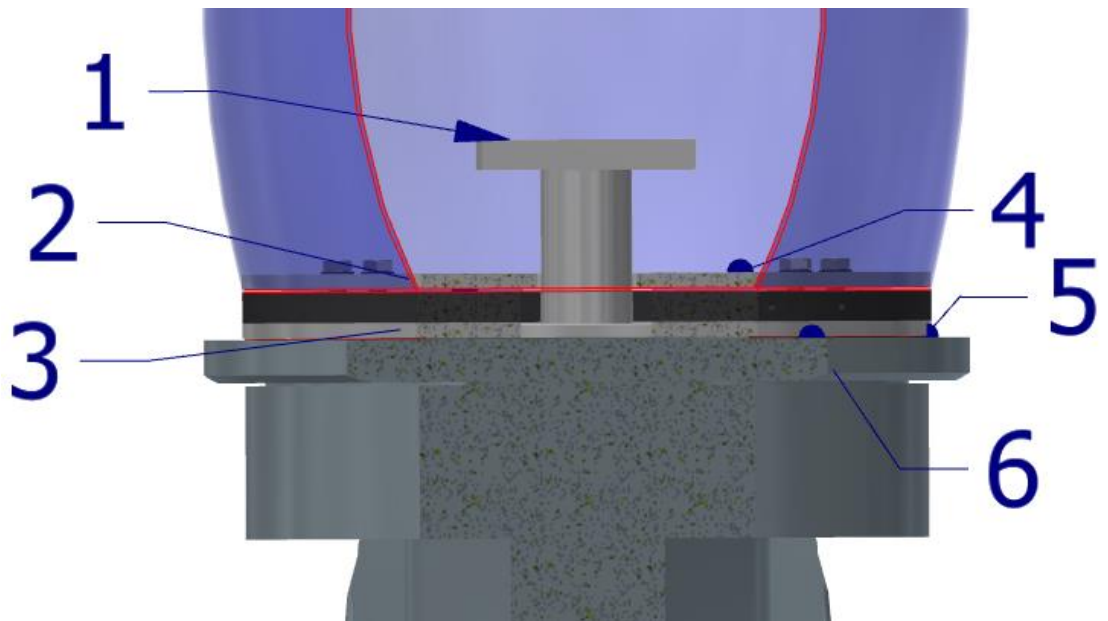
Montáž komory je provedena pomocí šroubového spoje. Díry pro spojovací šrouby procházejí všemi komponenty kromě přípravku na navařování viz. Obr. 18. V pracovním stole se nacházejí díry se závitem, do kterých přijdou šrouby a takto je celá komora spojena s pracovním stolem. Spojení komory a laserové hlavy je řešeno následovně. Na laserovou hlavu je navlíknuta pružná PVC fólie, která se upevní k hlavě pomocí příruby. Příruba se skládá ze dvou polovin, které jsou spojeny pomocí šroubového spoje, jež vytváří dostačující tlak ve spoji, aby PVC fólie držela na laserové hlavě.

Hlavní výhodou je jednoduchost zhotovení ochranné komory, protože jediné části, které musí být vyráběny jsou spojovací příruby. Další výhodou je, že lze zvětšit pracovní prostor dle potřeby.

Hlavní nevýhodou této komory je nemožnost osazení měřících senzorů jak na kvalitu námi vytvořené atmosféry, tak na vzniklý přetlak v komoře, který je zapotřebí. Další nevýhodou je složitost montáže komory kvůli velikosti PVC fólie, aby nedošlo k jeho poškození. Mezi další patří složitá výměna dílců. Existuje možnost vzniku turbulentního proudění ochranného plynu.



Obr. 17 Návrh číslo 1



Obr. 18 Řez sestavení; 1 – Chlazený přípravek pro navařování; 2 – Technické rozhraní; 3 – Spodní díl připojovací příruby; 4 – Horní poloviny připojovací příruby; 5 – Těsnění; 6 – Polohovatelný pracovní stůl;

4.1.2. Návrh číslo 2

Druhým návrhem je koncept inertního boxu. Jedná se o pevnou konstrukci, která pevně definuje pracovní prostor. Na Obr. 19 je zobrazen inertní box s popsány jednotlivými částmi, ze kterých se skládá. Je připevněn pomocí šroubového spoje (4xM14x35) na polohovatelný



pracovní stůl viz Obr. 21 a ten spoj je utěsněn pomocí kruhového těsnění o průměru 2 mm viz Obr. 20.

Vlastní box je svařenec z nerezového plechu EN ISO 9445 o tloušťce 1,5 mm, který je vyroben z nerezové oceli 1.4301 (Rm 500-700 MPa), která má vysokou odolnost proti korozi a zaručenou svařitelnost.

Ve svařenci je umístěné procesní sklo včetně těsnění pro vizuální kontrolu nad procesem navařování. Zároveň je nežádoucí přijít o vytvoření přetlaku viz Obr. 23. Jako procesní sklo bylo použito laboratorní sklo o tloušťce dle normy ČSN ISO 13130, které by mělo zvládnout vysoké teploty vytvářené procesem navařování pomocí laseru bez nějakého poškození. Nabízelo se také využít plexisklo PMMA, ale to by nemuselo vydržet procesní podmínky a mohlo by dojít k poškození, nemá tak vysokou teplotní odolnost, proto bylo zvoleno raději laboratorní sklo.

Ve spodní části svařence se nachází technické rozhraní, kterým prochází procesní tlaková hadička, kterou se přivádí argon v plynné podobě do prostoru boxu viz Obr. 22, který tvoří ochrannou atmosféru pro navařování. Dále technickým rozhraním procházejí procesní hadice, které jsou připojeny k našemu přípravku pro navařování uvnitř boxu.

Na zadní straně boxu jsou připevněny dva senzory. Jeden pro měření kyslíku v prostoru boxu a druhý snímá tlak uvnitř boxu pro dosažení dostatečného přetlaku pomocí přívodu argonu. Pro měření kyslíku a tlaku uvnitř boxu byl zvolen senzor DATALOGGER-AHLBORN ALMEMO 2590-2A-2, protože zvládne snímat ze dvou čidel naráz požadované hodnoty.

K boxu je připojeno pomocí šroubového spoje víko, které upevňuje pružný člen. Zvolený počet 8 šroubů M6x12 pro každou jednu stranu je dostatečný pro rozložení tlaku při natlakování boxu ochranným plynem na 5 MPa.

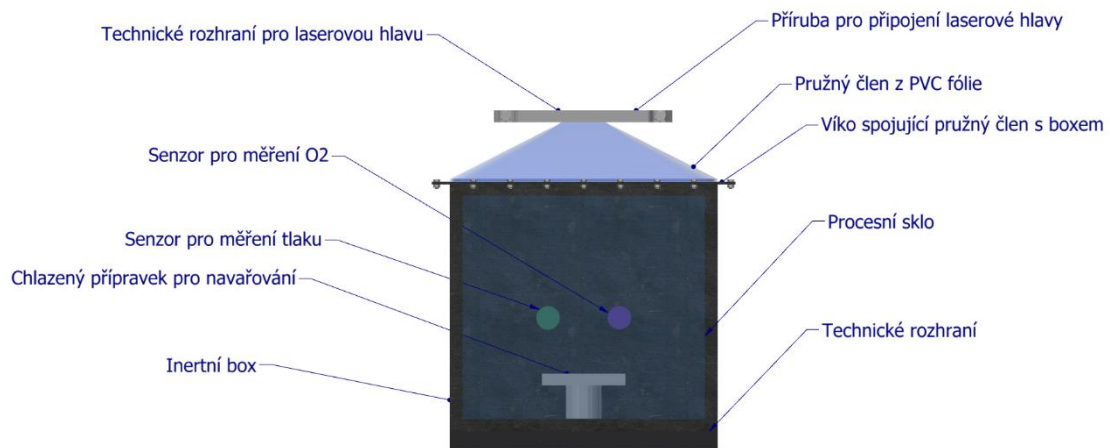
Poslední částí inertního boxu je příruba pro spojení laserové hlavy a pružného členu. Příruba se skládá ze dvou členů, které jsou k sobě spojeny pomocí šroubového spoje M10x130. Příruba obsahuje technické rozhraní pro přívod procesních plynů pomocí tlakových hadiček k laserové navařovací hlavě, ale také je zde počítáno s prostorem pro odsávací hadici pro spaliny, které by se mohli v inertním boxu během procesu hromadit a znehodnocovat navařování.

Montáž komory je provedena pomocí šroubového spoje. Díry pro spojovací šrouby procházejí všemi komponenty kromě přípravku na

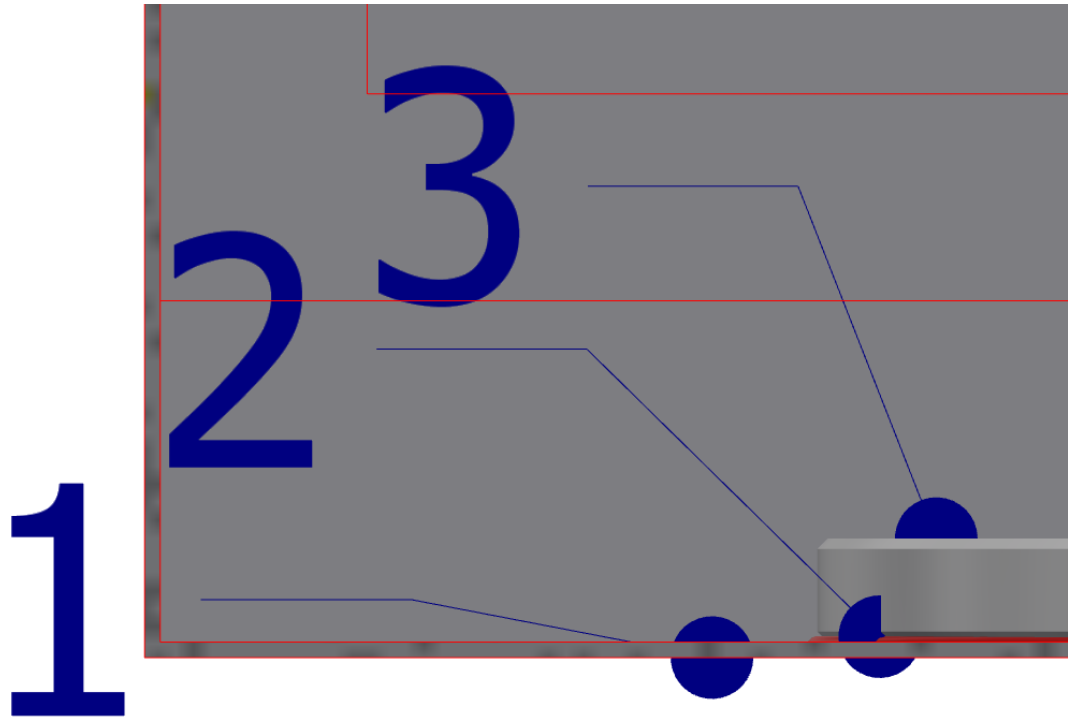
navařování viz. Obr. 21. V pracovním stole se nacházejí díry se závitem, do kterých přijdou šrouby a takto je celá komora spojena s pracovním stolem. Spojení komory a laserové hlavy je řešeno následovně. Na laserovou hlavu je navlíknuta pružná PVC fólie (musí splňovat normu DIN 53 438 T2. kvůli zátěži teplotou a v případě kontaktu s roztaveným kovem svoji nehořlavost), které se upevní k hlavě pomocí příruby. Příruba se skládá ze dvou polovin, které jsou spojeny pomocí šroubového spoje, jež vytváří dostačující tlak ve spoji, aby PVC fólie držela na laserové hlavě.

Hlavní výhodou je možnost lépe celý proces kontrolovat díky použití senzorů pro měření tlaku a kyslíku i pro lepší monitorování celého procesu navařování. Mezi další výhody patří jasně definovaný pracovní prostor. Stálost podmínek procesu je například rovnoměrný rozvod ochranného plynu v prostoru.

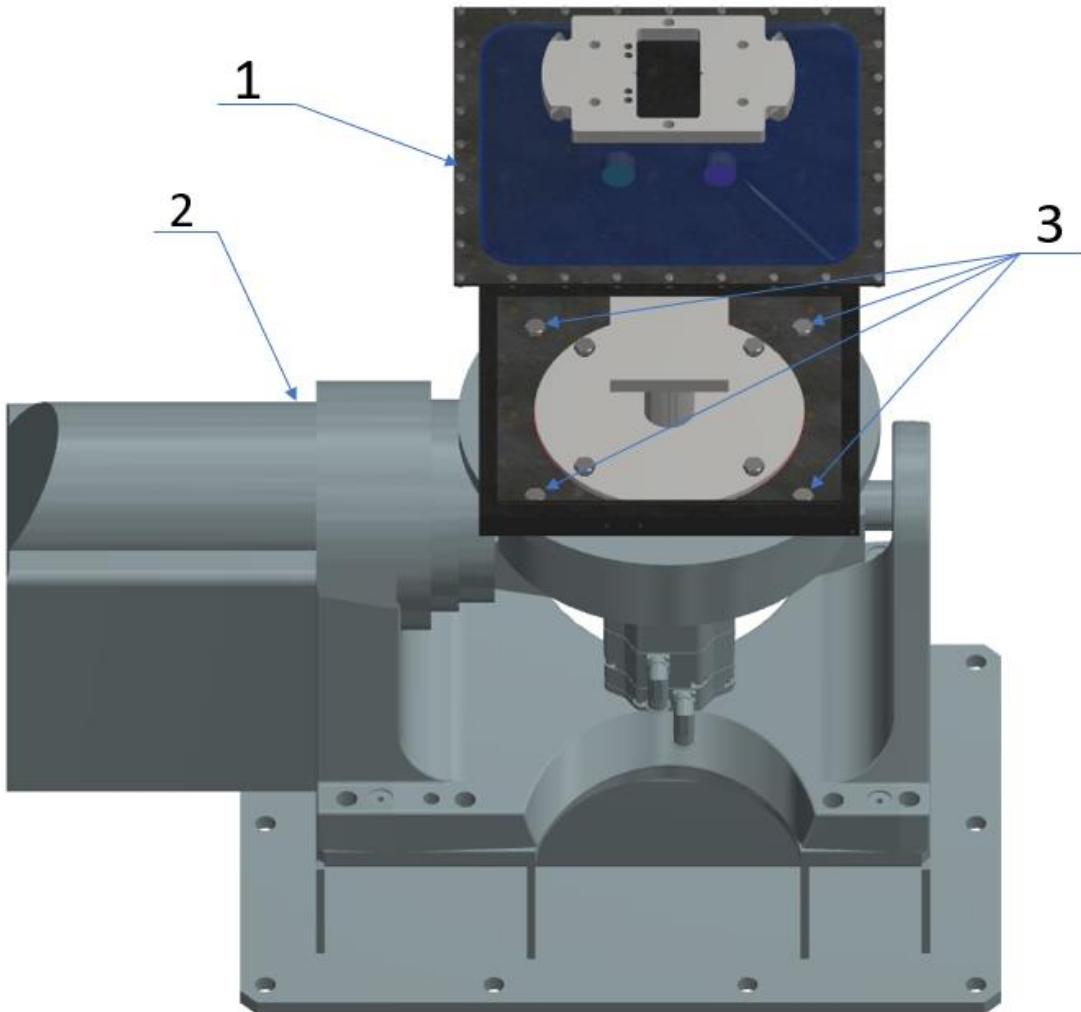
Hlavní nevýhodou je její poměrně složitá výroba. Mezi další nevýhody je omezený pracovní prostor, který je definován rozměry komory. Dále sem patří složitá výměna dílců.



Obr. 19 Návrh číslo 2 s jednotlivými komponenty



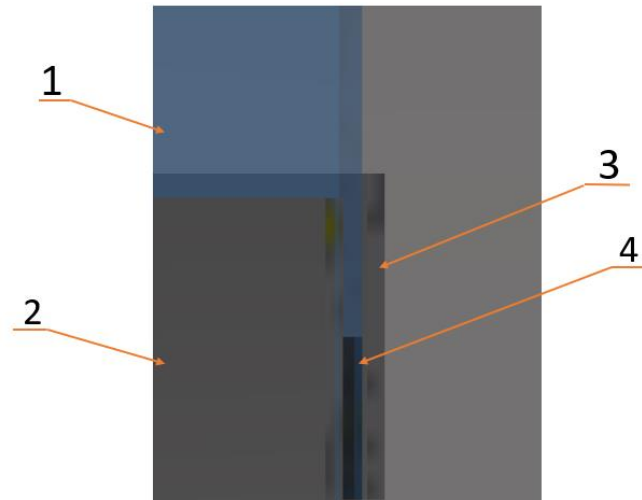
Obr. 20 Těsnění mezi pracovním stolem a boxem pomocí kruhového těsnění; 1 – Svařenec konstrukce; 2 – Těsnění; 3 – Chlazený přípravek;



Obr. 21 Spojení inertního boxu s pracovním stolem pomocí šroubového spoje; 1 – inertní box; 2 – polohovatelný pracovní stůl; 3 – 4x šroub DIN 333 M14x35;



Obr. 22 Detail přívodu argonu do inertního boxu; 1 – Přívod argonu; 2 – Otvory pro přívod argonu do prostoru navařování;



Obr. 23 Detail uložení procesního skla; 1 – procesní sklo; 2 – přední rám;
3 – zadní rám; 4 – těsnění;



4.2. Výrobní postup obráběného dílce

Výrobní postup jsem vypracoval pro přírubu, která spojuje pružný člen s navařovací hlavou, protože jsem musel pro tento díl vymyslet originální způsob upnutí pro jeho jednoduché obrobení.

Vycházím, že jako polotovar jsem měl k dispozici plech EN 485-4 (využívám materiál EN AW-2017A (42 4201)) o rozměrech 320x170x30 mm.

Jako první krok si upnu materiál do čelistí. Pomocí zahloubení frézy S6505.0 od firmy Dormet Pramet vytvořím pomocné díry. Obdobný způsob využiji i pro zhotovení děr pro technické rozhraní. Do děr pro technické rozhraní pomocí závitníku E471M10 od společnosti Dormet Pramet vytvořím závit M10 po celé délce. Do těchto závitů poté jsou našroubovány rychlospojky pro tlakové hadice.

V dalším kroku využiji pomocných děr pomocí nichž si polotovar upnu k pracovnímu stolu. Po upnutí polotovaru obrábím konturu součásti za pomoci frézy určené pro hrubování S61020.0 od společnosti Dormet Pramet s odsazením 2 mm pro dokončení. Poté dojde k výměně nástroje za dokončovací frézu a obrobím konturu načisto.

V posledním kroku dojde k pře upnutí dílce do vertikální pozice. Za pomoci vrtáku A02211.0 od společnosti Dormet Pramet na požadovaný rozměr o průměru 11H13.

V posledním kroku provedu kontrolu za pomoci ručních měřidel. Za pomoci posuvných měřidel provedu rozměrovou kontrolu, kontrolu závitů za pomoci kalibru a drsnost povrchu za pomoci drsnoměru. Rozměrová kontrola se může provádět po každém kroku.

Podrobně rozpracovaný výrobní postup přidávám přílohou.



5. Závěr

Titanem jsem se zabýval kvůli jeho vynikajícím vlastnostem, mezi které patří lehkost a velmi dobrá pevnost. Je velmi hojně používán, a to zejména v leteckém průmyslu, kde se zatím musí vyrábět dílce převážně konvenčními metodami a ty mají veliké množství odpadu.

Moje bakalářská práce se zabývá návrhem ochranné komory pro navařování titanového drátu laserem /robotem. Cílem této práce bylo vytvoření návrhu ochranné komory pro kvalitní navařování. V teoretické části jsem objasnil pojem navařování, problematiku ohledně navařování titanu, jaké existují laserové zdroje a navařovací hlavy. Zabýval jsem se podrobně navařovací buňkou a v neposlední řadě jsem poukázal na kinematiku svařovacích robotů, který se využívají v aplikacích pro navařování.

V praktické části jsem se zabýval návrhem navařovacího boxu. Vyhotovil jsem modely návrhů ochranných komor, dále výkresovou dokumentaci a také výrobní postup pro obráběné dílce.

Titanové slitiny se neustále vyvíjí, čemuž značně napomáhají moderní postupy a technologie. Do budoucna lze počítat s tím, že bude dále hojně využíván a třeba se změní poměr mezi aditivními technologiemi a konvenčními na stranu aditivních. Moje práce by do budoucna mohla dopomoci k dosažení kvalitního návaru titanu za pomoci laseru. Dále by se mohla tato technologie více přiblížit k masovému používání, protože by se stala finančně méně nákladnou.



Citovaná literatura

- [1] ING. VTÍPIL, Jaroslav Ph.D. Aditivní technologie (nejen) v leteckém průmyslu. PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM [online]. 2018, 11.04.2018, 1 [cit. 2023-07-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/aditivni-technologie-nejen-v-leteckem-prumyslu>
- [2] Fraunhofer IPT: LMD-W-20-L [online]. [cit. 2020-01-25]. Dostupné z: <https://www.ipt.fraunhofer.de/en/Competencies/processtechnology/nonconventional-manufacturing-processes-and-technology-integration/weldinghead-lmd-w-20-l.html>
- [3] CUI, Jing, Wei ZHAI, Meng-Ke LU, Hang ZHANG, Ming PANG a Guang-Feng YANG. Experimental study of the microscopic characteristics of Ti-Based Laser Cladding Ti + 7YSZ composite thermal barrier coatings. Optik [online]. 2020, 208(208) [cit. 2023-02-28]. ISSN 00304026. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijleo.2019.164087
- [4] LMD grows stronger in additive manufacturing for industrial applications. TRUMPF [online]. 15.11.2015 [cit. 2023-07-25]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/bg_BG/newsroom/global-press-releases/pressobshchenie-detailna-stranica-globalno/release/lmd-grows-stronger-in-additive-manufacturing-for-industrial-applications
- [5] STEHMAR, Charlotte, Marius GIPPERICH, Markus KOGEL-HOLLACHER, Alfredo VELAZQUEZ ITURBIDE a Robert H. SCHMITT. Inline Optical Coherence Tomography for Multidirectional Process Monitoring in a Coaxial LMD-w Process. Applied Sciences [online]. 2022, 12(5) [cit. 2023-07-24]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app12052701
- [6] Precitec Group. Precitec Group: YC52, processing heads, joining technology, cladding head [online]. [cit. 2023-07-25]. Dostupné z: <https://www.precitec.de/en/products/joining-technology/processingheads/yc52/>
- [7] KUKA: Laserové navařování. KUKA [online]. [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/produkty,-slu%C5%BEby/procesn%C3%AD-technologie/laserov%C3%A9-nava%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD>



- [8] CUI, Jing, Wei ZHAI, Meng-Ke LU, Hang ZHANG, Ming PANG a Guang-Feng YANG. Experimental study of the microscopic characteristics of Ti-Based Laser Cladding Ti + 7YSZ composite thermal barrier coatings. *Optik* [online]. 2020, 208(208) [cit. 2023-02-28]. ISSN 00304026. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijleo.2019.164087
- [9] GAO, Qiushi, Hua YAN, Yang QIN, Peilei ZHANG, Jialong GUO, Zhengfei CHEN a Zhishui YU. Laser cladding Ti-Ni/TiN/TiW TiS/WS₂ self-lubricating wear resistant composite coating on Ti-6Al-4V alloy [online]. 2019, **113**, 182-191 [cit. 2023-02-28]. ISSN 00303992. Dostupné z: doi:10.1016/j.optlastec.2018.12.046
- [10] FENG, Yueqiao, Kai FENG, Chengwu YAO, Zhuguo LI a Junhao SUN. Microstructure and properties of in-situ synthesized (Ti₃Al TiB)/Ti composites by laser cladding [online]. 2018, 157, 258-272 [cit. 2023-02-28]. ISSN 02641275. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2018.07.045
- [11] Ochranné plyny pro obloukové svařování. *Technika a trh* [online]. 2009 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.technikaatrh.cz/aktuality/ochranne-plyny-pro-obloukovesvarovani>
- [12] KAŠPAR, Jan a Tomáš MUŽÍK. Laserové navařování, 3D tisk a volba technických plynů: Výroba a technologie. *PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM* [online]. 2021, 31.03.2021, 2021(4), 1 [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-नाव%20ovani-3D-tisk-a-volba-technicky-plynu>
- [13] Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-857-7181-0
- [14] Messer gases for life. Messer Technogas s.r.o [online]. [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.messer.cz/produkty>
- [15] Základní informace o vodíku. AIR PRODUCTS [online]. [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <http://www.airproducts.cz/Industries/Energy/Power/Power-Generation/hydrogenbasics.asp>



- [16] Linde Gas a.s. [online]. 2021 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.lindegas.cz/shop/cs/cz-ig/plyny-a>
- [17] KOŘÁN, Pavel. www.lao.cz. [Online] [Citace: 28. 03 2023.] <http://www.lao.cz/laoinfo-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
- [18] ENGST, Pavel a Milan HORÁK. Aplikace laserů. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1989. Populární přednášky o fyzice.
- [19] KOŘÁN, Pavel. www.lao.cz. [Online] [Citace: 28. 03 2023.] <http://www.lao.cz/laoinfo-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-128>
- [20] KOLEKTIV. TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ A ZAŘÍZENÍ: Učební texty pro mezinárodní/evropské svářečské inženýry a technology (I/EWE, I/EWT). Brno: Česká svářečská společnost ANB VUT v Brně, FSI, odbor svařování - ATB 2, 2016.
- [21] ION, John. Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 9780750660792.
- [22] Industrial Laser Solutions. Industrial Laser Solutions: Laser cladding with direct diode lasers [online]. Endeavor Business Media, LLC., 2009 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://www.industrial-lasers.com/surfacetreatment/article/16488924/laser-cladding-with-direct-diode-lasers>
- [23] Laserové svařování [online]. 17.05.2004 [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-svarovani>
- [24] Precitec Group. Precitec Group: YC52, processing heads, joining technology, cladding head [online]. [cit. 2023-07-25]. Dostupné z: <https://www.precitec.de/en/products/joining-technology/processingheads/yc52/>
- [25] KUKA AG.: Inndustrial intelligence 4.0__beyond automation [online]. [cit. 2023- 07-25]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/produkty,-slu%C5%BEby/v%C3%BDrobn%C3%AD-linky/standardn%C3%AD-produkty-proautomatizaci/laserov%C3%A9-optiky>



- [26] Precitec Group: CoaxPrinter [online]. [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: <https://www.precitec.de/en/products/joining-technology/processingheads/coaxprinter/>
- [27] TRUMPF [online]. [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/stroje-systemy/3d-laserove-rezaci-stroje/trulaser-cell-7040/
- [28] BŘEZINA, Jan, Hana ŠPAČKOVÁ, Robert FRISCHER, Jiří DAVID a Pavel ŠVEC. **STUDIJNÍ PŘÍRUČKA: ROBOTIKA A JEJICH STRUKTURA A KINEMATIKA, SPECIFIKACE NEBEZPEČÍ U PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ A MANIPULÁTORŮ**. Ostrava, 2020.



Seznam obrázků

Obr. 1 Princip technologie LMD s práškem jako přídavným materiálem [4].....	11
Obr. 2 Princip technologie LMD s drátem jako přídavným materiálem [6]	12
Obr. 3 Otevřený rezonátor [19].....	17
Obr. 4 CO ₂ laser [20]	18
Obr. 5. Nd-YAG laser schéma [20]	19
Obr. 6 Vláknový paprsek [20].....	20
Obr. 7 Polovodičové zdroje [20].....	21
Obr. 8 Precitec YC52 [6].....	22
Obr. 9 Kuka MWO-I [25]	22
Obr. 10 Navařovací hlava LMD-W-20-L [2]	23
Obr. 11 Koaxiální navařovací hlava CoaxPrinter [26]	24
Obr. 12 Rozdělení paprsku v navařovací hlavě CoaxPrinter [26].....	25
Obr. 13 Navařování buňka TRUMP TruLaser Cell 7040 [27]	26
Obr. 14 Ohrožení zraku laserovým zářením [17]	27
Obr. 15 Bezpečnostní štítky pro třídy 1-4 [19].....	30
Obr. 16 Průmyslový robot [28].....	32
Obr. 17 Návrh číslo 1	36
Obr. 18 Řez sestavení; 1 – Chlazený přípravek pro navařování; 2 – Technické rozhraní; 3 – Spodní díl připojovací příruby; 4 – Horní poloviny připojovací příruby; 5 – Těsnění; 6 – Polohovatelný pracovní stůl;.....	36
Obr. 19 Návrh číslo 2 s jednotlivými komponenty.....	38
Obr. 20 Těsnění mezi pracovním stolem a boxem pomocí kruhového těsnění; 1 – Svařenec konstrukce; 2 – Těsnění; 3 – Chlazený přípravek;.....	39
Obr. 21 Spojení inertního boxu s pracovním stolem pomocí šroubového spoje; 1 – inertní box; 2 – polohovatelný pracovní stůl; 3 – 4x šroub DIN 333 M14x35; .	40
Obr. 22 Detail přívodu argonu do inertního boxu; 1 – Přívod argonu; 2 – Otvory pro přívod argonu do prostoru navařování;	40
Obr. 23 Detail uložení procesního skla; 1 – procesní sklo; 2 – přední rám;	41



Seznam tabulek

Tabulka 1 Fyzikální vlastnosti plynů [19]	13
Tabulka 2 Vhodnost jednotlivých plynů pro laserové navařování materiálů [23].	14



Seznam příloh

Příloha 1 – Výrobní postup

- List strojů
- List nástrojů
- Výpočty-pro hrubování

Výkresová dokumentace

Výrobní výkresy:

BC-0001-01

BC-0001-02

BC-0001-07

Sestavné výkresy:

BC-0000-00

Kusovníky:

BC-0000-00K

BC-0001-01K