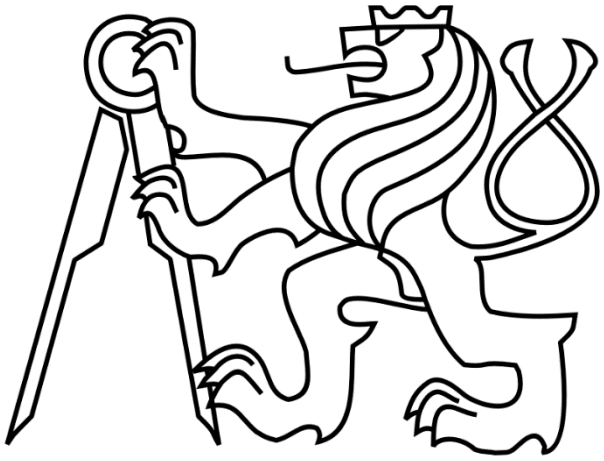
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Bakalářská práce

Úprava laserového zařízení pro možnost navařování

2017 **Ladislav Seidl**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Seidl** Jméno: **Ladislav** Osobní číslo: **437303**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**

Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**

Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Úprava laserového zařízení pro možnost navařování

Název bakalářské práce anglicky:

The laser device adjustment for the possibility of cladding

Pokyny pro vypracování:

Popis tématu: Úprava laserového zařízení pro možnost navařování ve třech osách, s možností navařování vrstev i 3D objektů.; Osnova práce: - Rešerše laserových technologií vhodných pro zařízení LUMONICS JK701H.; - Návrh úpravy vedení a uložení laserové hlavy.
Návrh polohování čočky; - Výběr vhodné varianty a její zpracování; - Tvorba výkresové dokumentace, výroba, montáž a zkouška funkčnosti; - Rozsah grafické části: Výkresová dokumentace a grafické znázornění; Rozsah textové části: Rešerše vybraných laserových technologií, Popis stávajícího řešení, zvážení možností vylepšení, popis nového řešení

Seznam doporučené literatury:

[1] KUZNETSOV. A., JEROMEN. A., LEVY. G., FUJISHIMA. M., GOVEKAR. E.: Annular Laser Beam Cladding Process Feasibility Study, Volume 83, 2016, Pages 647-656, Physics Procedia, Ljubljana, doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.067
[2] KOIKEA, R., ASHIDAA, R., YAMAZAKIA, K., KAKINUMAA, Y., AOYAMAA T., ODAB, Y., KURIYAB, T., FUJISHIMAB M.: Graphical evaluation method for void distribution in direct energy, 16th Machining Innovations Conference for Aerospace Industry - MIC 2016, Japan https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.11.014

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jan Brajer, ústav výrobních strojů a zařízení FS

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

Ing. Ivan Diviš, ústav výrobních strojů a zařízení FS

Datum zadání bakalářské práce: **10.04.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **29.05.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2017**

Podpis vedoucí(ho) práce	Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	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.

25.04.2017
Datum převzetí zadání

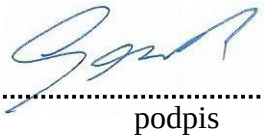
Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v přiloženém 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 do 29. 5. 2017



.....

podpis

Poděkování

Úvodem bych chtěl poděkovat vedoucímu práce, panu Ing. Janu Brajerovi a konzultanovi, panu Ing. Ivanu Divišovi, za jejich cenné rady při tvorbě této práce a že si na mě vždy udělali čas.

Chtěl bych poděkovat také svým rodičům, kteří mi umožnili studovat na vysoké škole a poskytli mi příjemné rodinné zázemí.

Veliké díky patří i mé partnerce za podporu nejen v době psaní této práce.

Anotace

Autor:	Ladislav Seidl
Název BP:	Úprava laserového zařízení pro možnost navařování
Rozsah práce:	54 str., 34 obr.
Školní rok vyhotovení:	2017
Škola:	ČVUT – Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 – Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí BP:	Ing. Jan Brajer
Konzultant:	Ing. Ivan Diviš
Zadavatel:	ČVUT – FS, Ú12135
Využití:	Zvýšení přesnosti a opakovatelnosti procesu laserového navařování drátu.
Klíčová slova:	laser, laserová hlava, polohování čočky, fokusace laseru, laserové navařování, aditivní výroba
Anotace:	Bakalářská práce se zabývá rešerší technologií vhodných pro zařízení Lumonics JK701H. Následně jsou navrženy úpravy stávající konstrukce laserové navařovací hlavy. Je vybrána vhodná varianta úpravy a ta je zpracována do finálního řešení.

Annotation

Author:	Ladislav Seidl
Title of bachelor dissertation:	The laser device adjustment for the possibility of cladding
Extent:	54 p., 34 fig.
Academic year:	2017
University:	CTU – Faculty of mechanical engineering
Department:	Ú12135 – Department of productions machines and equipment
Supervisor:	Ing. Jan Brajer
Consultant:	Ing. Ivan Diviš
Submitter of the theme:	CTU – Faculty of mechanical engineering
Application:	Increase in accuracy and repeatability of the laser wire cladding process
Keywords:	laser, laser head, lens positioning, laser focusing, laser cladding, additive manufacturing
Annotation:	This bachelor‘s thesis deals with analysis of laser technologies suitable for device Lumonics JK701H. It contains design changes of the laser cladding head. Appropriate design is chosen and made into a complete form. Requisite drawing documentation is created.

Obsah

1 Úvod 11
2 Rešerše laserových technologií vhodných pro zařízení Lumonics JK701H 12
2.1 Řezání laserem 12
2.1.1 Princip technologie laserového řezání 13
2.2 Laserové svařování 15
2.2.1 Princip laserového svařování 16
2.3 Laserové kalení 17
2.4 Laserové navařování 18
2.4.1 Navařování funkčních ploch 18
2.4.2 Opravy laserovým navařováním 21
2.4.3 Výroba celých součásti 21
3 Revize původní laserové hlavy 24
3.1 Konstrukce původní laserové hlavy 24
3.2 Princip laserového navařování na zařízení JK701H 25
3.3 Nedostatky původní laserové hlavy 26
4 Předběžné návrhy úprav laserové hlavy 27
4.1 Předběžný návrh způsobu polohování čočky 27
4.2 Návrh implementace polohovadla do laserové hlavy 28
4.3 Návrh změny uložení a vedení 30
5 Zpracování finálního návrhu úpravy laserové hlavy 31
5.1 Konečný návrh polohovadla 31
5.1.1 Stanovení důležitých rozměrů 31
5.1.2 Stanovení důležitých prvků polohovadla 32
5.1.3 Návrh mikrometrických hlavic 34
5.1.4 Uložení čočky 35
5.1.5 Návrhový výpočet pružin 36
5.1.6 Stanovení polohy připojovacích šroubů 40
5.2 Vedení v nové laserové hlavě 41
5.3 Způsob uchycení ochranných skel 44
5.4 Návrh úpravy kladecí hlavy 46
5.5 Finální návrh upravené laserové navařovací hlavy 47
6 Závěr 49
7 Seznamy 50
7.1 Seznam obrázků 50

7.2 Seznam příloh 51
7.2.1 Seznam použitého softwaru 51
7.2.2 Seznam výkresů 51

Seznam použitých veličin a jednotek

Označení veličiny	Jednotka	Název veličiny
d	$[mm]$	průměr drátu
D	$[mm]$	průměr
D_e	$[mm]$	vnější průměr pružiny
d_k	$[mm]$	průměr hlavy šroubu
F_k	$[N]$	síla od pružiny
F_n	$[N]$	normálová síla
F_p	$[N]$	síla od pružiny
F_t	$[N]$	třecí síla
G	$[N]$	tíhová síla
H	$[mm]$	výška
k	$[mm]$	výška hlavy šroubu
l_0	$[mm]$	volná délka pružiny
l_n	$[mm]$	délka pružiny při maximálním stlačení
m	$[g]$	hmotnost
n	$[-]$	počet činných závitů
R	$[N \cdot mm^{-1}]$	tuhost pružiny
t	$[mm]$	tloušťka stěny
x	$[mm]$	stlačení pružiny
μ	$[-]$	součinitel smykového tření

1 Úvod

Moderní strojírenství vyžaduje výrobu tvarově složitých součástí, či součástí ze speciálních materiálů, které bývají většinou špatně obrobitelné nebo drahé. Pro výrobu součástí z takových materiálů je vhodný způsob aditivní výroby.

Cílem technologie aditivní výroby (anglicky „Additive manufacturing“, zkratka AM) je snížení spotřeby materiálu na výrobu tím způsobem, že se součást tvoří přidáváním materiálu namísto jeho odebírání (jako je tomu u třískového obrábění). Technologiemi aditivní výroby je také možné vyrábět tvarově velmi složité součásti, které nejsou jinými technologiemi vyrobitelné. Pro použití technologie v průmyslu je však nutno stanovit důležité parametry a zajistit přesnost a opakovatelnost procesu. (1) (2)

Se současným konstrukčním řešením laserové hlavy zařízení Lumonics JK701 není možné zajistit požadovanou přesnost a opakovatelnost, neboť je třeba zařízení stále přenastavovat vlivem nedostatků laserové hlavy. Uložení a vedení laserové hlavy nemá dostatečnou tuhost, obsahuje vůle a neumožňuje polohovat čočku k zajištění průchodu paprsku laseru přesně jejím středem k zajištění správné fokusace. Aby se dalo zařízení Lumonics JK701H použít pro důkladné provozování technologie laserového navařování, bylo rozhodnuto, že dojde k návrhům a posléze výrobě nové laserové navařovací hlavy, ve které budou odstraněny všechny stávající nedostatky.

Na začátku práce je provedena rešerše laserových technologií vhodných pro zařízení Lumonics JK701H. Tyto technologie jsou vypsány a vysvětlen jejich princip. Následně práce analyzuje problémy původní laserové navařovací hlavy zařízení JK701H a jsou navrženy její změny k odstranění jejích nedostatků. Tyto změny se týkají návrhu jiného uložení a vedení v laserové hlavě pro dosažení vyšší tuhosti uložení. Dále je navržen způsob polohování čočky pro zajištění lepší fokusace laserového paprsku. Vhodné a schválené návrhy jsou následně vymodelovány v programu Siemens NX10, zpracovány do finální podoby a je k ním vytvořena potřebná výkresová dokumentace.

2 Rešerše laserových technologií vhodných pro zařízení Lumonics JK701H

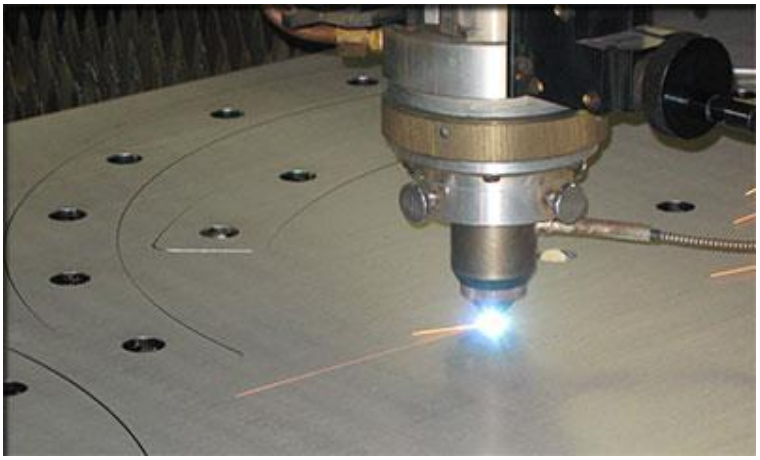
Zařízení Lumonics JK701H je pevnolátkový Nd:YAG laser nainstalovaný do tříosého stroje s přídavnou čtvrtou osou od firmy Sitec. Aktivním prostředím laseru je neodymem dopovaný yttrito-hlinitý granát. Laser pracuje v pulzním režimu o maximálním výstupním výkonu 550 W při vlnové délce záření 1064 nm. Rozložení os na stroji je následující: osa *z* nese hlavu laseru společně s rezonátorem a optickou soustavou, osy *x* a *y* konají hlavní pracovní pohyby – posuvné pohyby křížového stolu, přídavná osa c je ve formě otočného vřetene, které lze připojit na křížový stůl. Toto zařízení se svou konstrukcí a svými parametry hodí zejména pro technologie řezání, svařování, kalení a navařování. Tyto technologie byly ve Výzkumném centru pro strojírenskou výrobní techniku a technologii (dále jen VCSVTT) na laseru JK701H experimentálně zkoumány a jejich vhodnost pro toto zařízení byla ověřena.

Obr. 1 Zařízení Lumonics JK701H

2.1 Řezání laserem

Laserové řezání je v dnešní době velmi rozšířená technologie dělení materiálu. Princip této technologie spočívá v tavení materiálu bez mechanického působení. Dosahuje se velmi kvalitního řezu a díky vysoké hustotě výkonu laserového paprsku i velkých řezných rychlostí. Vzhledem k malé stopě laserového paprsku je řezná spára

tenká a ztráta materiálu řezem je tedy velmi malá. Při malé stopě paprsku se dají řezat i složité a jemné tvary, proto laserové řezání velmi dobře konkuruje ostatním řezacím technologiím. Tato technologie je nejvhodnější pro plošné řezání, tedy řezání plechů, kdy hlavním limitujícím faktorem je tloušťka řezaného plechu (Obr. 2). Tento parametr je závislý především na výkonu laseru. Plechy z korozivzdorné oceli se dají efektivně řezat až do tloušťky 50 mm (3). Vzhledem k podstatě laserového řezání se dají řezat i velmi malé tloušťky či materiály, které jsou svou podstatou křehké, mechanicky odolné či lehce deformovatelné a jinými technologiemi je obtížné je řezat. (4) (5)

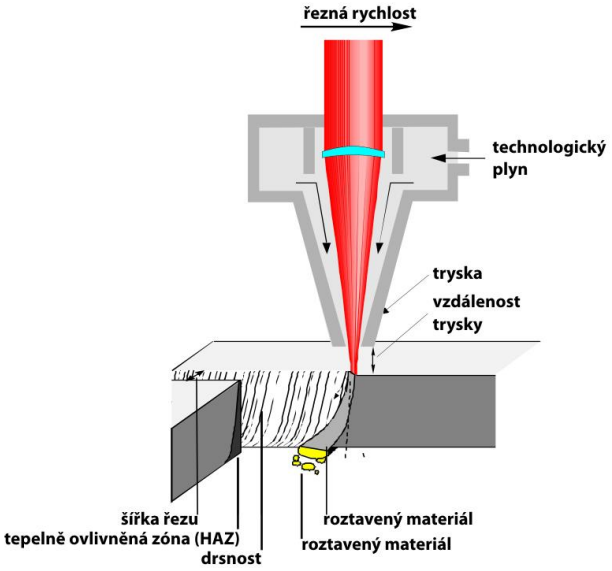


Obr. 2 Řezání laserem (6)

Nejpoužívanějšími lasery pro řezání jsou Nd:YAG a CO2 lasery. CO2 lasery mohou dosahovat velmi vysokých výkonů a vyzařují světlo o vlnové délce 10 600 nm. Vhodné jsou zejména pro řezání běžných, korozivzdorných, či legovaných ocelí velkých tlouštěk. Nd:YAG lasery vyzařují vlnovou délku 1064 nm a hodí se pro řezání kovových i nekovových materiálů menších tlouštěk. (4)

2.1.1 Princip technologie laserového řezání

Interakcí laserového paprsku s řezaným materiálem dochází k zahřátí, tavení a případnému odpařování materiálu. Při řezání se nejprve nataví materiál v místě působení paprsku a dojde k jeho odpaření či vyfouknutí. Následně projde paprsek skrz materiálem a pohybuje se podél tvaru řezu. Tím dochází k tavení materiálu, který je z místa řezu buď vyfukován asistenčním plynem, či dochází k jeho odpaření (Obr. 3). Nejčastěji jsou jako asistenční plyny používány vzduch, argon, kyslík a dusík. Mezi nejpoužívanější technologie řezání patří řezání tavením, pálením a odpařováním (sublimační). (4) (5)



Obr. 3 Princip řezání laserem (5)

Tavné řezání je nejpoužívanější metodou laserového řezání. Probíhá za působení dusíku či argonu. Princip spočívá v roztavení materiálu, který je z řezné spáry vyfouknut vysokotlakým proudem řezacího plynu. Řezací plyn je přiváděn koaxiálně a tvoří ochranou atmosféru okolo místa řezu. Současně slouží i k chlazení řezaného materiálu a chrání ho tím před tepelným ovlivněním. Přivádí-li se plyn za vysokého tlaku, dosahuje se velmi kvalitní řezné hrany bez otřepů. Tento způsob se používá například pro řezání korozivzdorné oceli. (4) (5) (7)

Řezání pálením probíhá za pomoci proudu kyslíku, díky kterému vznikne kyslíkový plamen a vzniklá tavenina s oxidy železa je tlakem plynu vyfouknuta. Díky oxidačnímu procesu vzniká exotermická reakce, která proces řezání urychluje a je možné zvýšit řeznou rychlost i tloušťku řezaného materiálu. Na řezných plochách však kvůli chemické reakci vzniká oxidová vrstva, která sice chrání materiál před korozí, ale často bývá nežádoucí a musí se odstranit.. (4) (5)

Odpařovací řezání je vhodné zejména pro řezání materiálů, u kterých nedochází k jejich tavení, jako je např. dřevo, keramika nebo uhlíková vlákna. Při této metodě řezání dochází k odpaření materiálu v místě řezu. Pro použití tohoto způsobu pro řezání kovů je nutná velmi vysoká hustota energie paprsku a tloušťka řezaného materiálu nesmí být větší než je průměr laserového svazku, jinak dochází ke kondenzování výparů a svaření rzi. (4) (5) (7)

Dle výzkumů provedených v RCMT se zařízení Lumonics JK701 H dá použít pro řezání kovových i některých nekovových materiálů. Běžnou ocel je možno řezat až do tloušťky 5mm, avšak pro tloušťky nad 4 mm musí být řezná rychlost velmi nízká. (4)

2.2 Laserové svařování

Laserové svařování je způsob tepelného spojování materiálů. Tato laserová technologie nachází své uplatnění v moderním strojírenství zejména díky splňování nejnáročnějších požadavků na vysokou kvalitu svarů. Aby bylo požadované kvality dosaženo, je nutné zhotovovat svary na CNC řízeném laseru. Tento proces je tedy náročný jak na přesnost stroje, tak i na přesnost svařovaných dílů, kdy případné nerovnosti plechů ztěžují vytvoření kvalitního svaru. Svařování laserem nabízí však možnosti, které nenabízejí jiné technologie svařování. Tato technologie se hodí nejlépe pro svařování tenkých dílů, dá se však svařovat materiál až do tloušťky 25 mm. Použitím této metody je možné dosáhnout velmi malých svarů, které lze aplikovat i v těžce dostupných místech. Oproti ostatním metodám svařování dochází k rychlému lokálnímu ohřevu v místě působení paprsku, kdy je dosaženo velmi vysoké hustoty výkonu až 10^{12} W/cm^2, která je koncentrována ve stopě paprsku. Protože je rychlost ohřevu mnohonásobně větší, než je rychlost odvodu tepla, dochází k malému tepelnému ovlivnění okolního materiálu a výsledná tepelně ovlivněná oblast není tedy tak výrazná, jako je tomu u ostatních technologií svařování, což je velmi příznivé pro kvalitu svaru. (8) (9) (10) (11) (12)

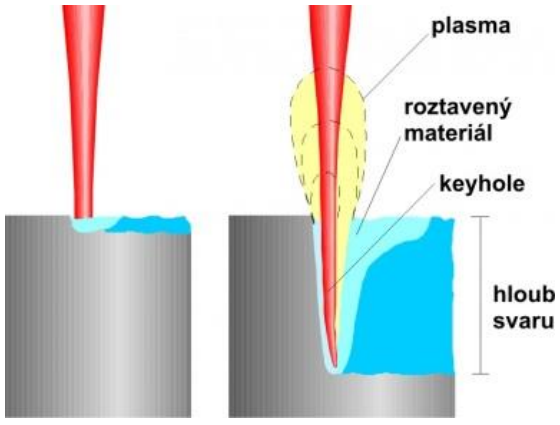
Obr. 4 Součást svařená za pomoci laseru (11)

Svařováním za pomoci laseru je možno vytvářet svary tupé, koutové, lemové, přeplátované, bodové i radiální a lze s ním svařovat širokou škálu materiálů, které nejsou jinými technologiemi svařitelné nebo jsou svařitelné velmi obtížně. Jedná se o materiály typu hliník, litina, slitiny mědi, titan, zlato. Za pomoci laserového paprsku se však k sobě dají svařit i dva rozdílné materiály. (9) (8) (11) (12)

Pro technologii svařování se nejvíce používají pevnolátkové Nd:YAG lasery. Oproti CO2 laserům dosahují sice menších výkonů a účinností, vyzařují však světlo o vlnové délce 1064, kterou kovy lépe absorbují. Laserový svazek vyzařovaný Nd:YAG laserem je navíc možné vést přes optická vlákna a při montáži laserové hlavy na robotické rameno je možné zhotovit svary i ve špatně přístupných místech. Dále se pro svařování používají například lasery diodové. (8) (12)

2.2.1 Princip laserového svařování

Laserové svařování probíhá často bez pomoci přídavného materiálu a provádí se dvěma metodami. Metodou vedení tepla (kondukční režim) a metodou tzv. klíčové dírky (keyhole welding) (Obr. 5). Při metodě vedení tepla dochází k natavení materiálu absorpcí laserového paprsku a následným vedením. Při této metodě se dosahuje pouze malých hloubek průvaru, rychlost svařování je však vysoká. Princip metody klíčové dírky spočívá v interakci laserového paprsku o vysoké plošné hustotě výkonu s materiálem, kdy dojde k roztavení materiálu, který se vlivem působení paprsku laseru začne odpařovat a výpary se přemění v plasma. Takto vznikne dutina, jejíž stěny tvoří roztavený materiál. Laserový paprsek se pak pohybuje ve směru svařování a roztavený kov za ním vlivem povrchového napětí uzavírá dutinu. Metodou klíčové dírky se dosahuje hlubokých a velmi úzkých svarů. (8) (10) (11) (7)

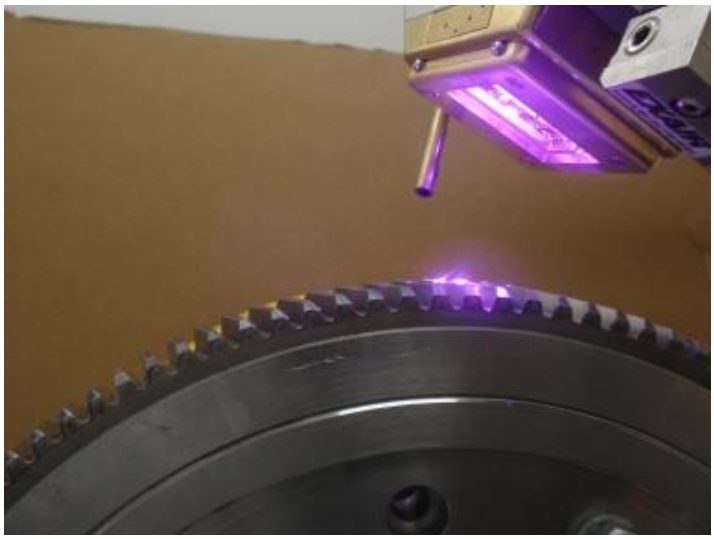


Obr. 5 Princip laserového svařování - vlevo metoda vedení, vpravo metoda klíčové dírky (8)

2.3 Laserové kalení

Povrchová úprava je velmi důležitým procesem při výrobě součástí. Ovlivňuje nejen trvanlivost součásti z hlediska jejího opotřebení, ale také mechanické vlastnosti povrchu. Kalení je způsob tepelného zpracování součásti za účelem zvýšení její tvrdosti hlavně na povrchu a ve vrstvách pod ním.

Povrchové kalení do hloubky až 2,5 mm se dá provádět i za použití laserového paprsku, který se rozfokusuje a nechá se dopadat na požadované místo (Obr. 6). Tím dojde k prudkému lokálnímu ohřevu v místě dopadu a následnému ochlazení okolním materiálem, který má teplotu okolí a je velmi málo tepelně zatížen. Tento princip se nazývá tzv. samokalení, kdy se nepoužívá žádné ochlazovací médium, ale ochlazení probíhá vedením tepla do okolního materiálu. Hlavní výhodou laserového kalení je velmi vysoká rychlost ohřevu a rychlost ochlazení, díky kterým vznikají uvnitř materiálu jemné struktury s malými zrny a krátkými martenzitickými jehlicemi. Jádro tedy zůstává houževnaté a dojde ke zvýšení tvrdosti povrchové vrstvy. Další výhodou je možnost lokálního kalení přímo v požadovaném místě. Kvalita kaleného povrchu je velmi vysoká při nízké oxidaci povrchu, nevznikají žádné povrchové trhliny a vyskytují se pouze minimální deformace. Pro kalení se nejčastěji používají lasery diodové. (13) (14) (15) (16) (17) (18)



Obr. 6 Laserové kalení zubů ozubeného kola (19)

2.4 Laserové navařování

Laserové navařování se dá charakterizovat jako nánosové svařování. Oproti svařování se při navařování musí používat přídavný materiál, ze kterého se formují návary. Jako přídavný materiál se využívá drát či prášek. Princip této technologie se liší podle použitého přídavného materiálu a podle oblasti použití. Rychlost a efektivitu navařování určují hlavně tyto parametry: výkon laseru, druh přídavného materiálu a jeho vlastnosti (průměr drátu, čistota a velikost částic prášku), rychlost podávání přídavného materiálu, rychlost posuvu (rychlost navařování). V závislosti na zvolených parametrech přídavného materiálu se upraví parametry laseru a lze tedy zhotovovat i velmi malé návary (velikost v řádech desetin mm), vhodné pro jemnější navařování. Laserové navařování se dá rozdělit do tří oblastí podle jeho využití: opravy součástí, navařování funkčních ploch a výroba celých součástí. (20) (21) (22)

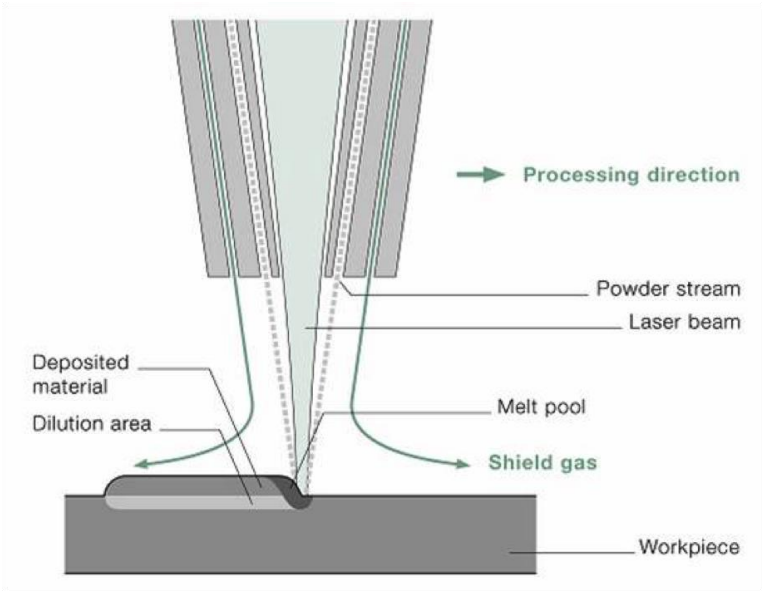
2.4.1 Navařování funkčních ploch

Kvalita povrchu součásti hraje velikou roli při použití součásti a její trvanlivosti. Často bývají kladené požadavky nejen na zaručení určité tvrdosti povrchu, ale také na určité materiálové a fyzikální vlastnosti, jako např. odolnost proti otěru nebo žárupevnost. Pro splnění těchto požadavků je většinou potřeba použití kvalitnějšího materiálu o daných vlastnostech, čímž cena výroby součásti vzroste. Z hlediska ceny výroby je mnohem výhodnější vyrobit jádro součásti např. z běžné konstrukční oceli a na funkční plochy součásti posléze navařit vrstvu materiálu o požadovaných vlastnostech. Nemusí se však jednat pouze o navaření vrstvy materiálu na hotovou součást, může se jednat i o navaření nových funkčních tvarů nebo části, jako mohou být např. osazení. (22) (23)

Laserové navařování je pro proces kombinované výroby vhodnou technologií díky vysoké kvalitě návarů bez trhlin či jiných vad. Oproti jiným technologiím navařování je při použití laseru navařená vrstva tenčí a původní materiál je méně tepelně ovlivněn. To má za důsledek i menší vnitřní pnutí a deformace materiálu. V porovnání s technologiemi povlakování, pokovování či žárovými nástřiky je vrstva sice tlustší, ale pevněji spojená se základním materiálem a dá se přesněji nanášet na vybraná místa. (24)

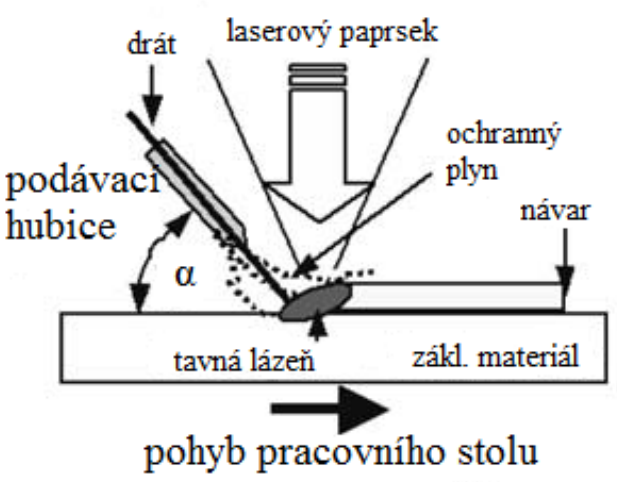
Z hlediska použití přídavného materiálu se princip technologie liší. Při laserovém navařování prášku, musí být stroj opatřen podavačem prášku, ze kterého je prášek pod tlakem dopraven do navařovací trysky, ve které je foukán společně s ochranným plynem

přímo do laserového paprsku. Laserový paprsek prášek roztaví a tento proud roztaveného prášku je následně nanášen na povrch součásti. Technologie navařování práškem je v současnosti již běžně používaná technologie s odladěnými parametry. Nevýhodou práškového navařování je však cena prášku, která bývá vyšší než cena drátu (zvláště pak u materiálů typu slitin titanu či Inconel). Vzhledem k principu technologie, kdy je roztavený prášek tlakově foukán na povrch materiálu dochází k jeho částečnému odrazu a tím pádem dochází ke ztrátám na materiálu. Zohlednit se musí i případné vady, kdy při nesprávném natavení částeček prášku nedojde k pevnému tavnému spojení s materiálem a mohou v návaru vznikat vměstky či póry. (25)



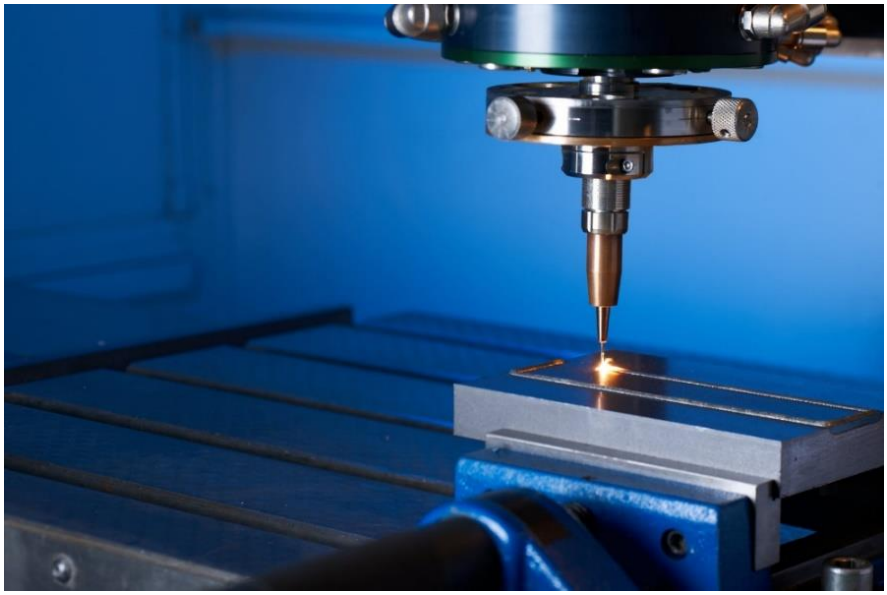
Obr. 7 Schéma navařování prášku (26)

Drát jako přídavný materiál konkuruje prášku v pořizovací ceně, ale i v efektivitě využití. Při navařování drátu laserem je drát odvíjen z cívky pomocí podavače, který drát přivádí do ohniska laserového paprsku. Paprsek natavuje společně s drátem i základní materiál a kladený roztavený drát je se základem pevně spojen. Využití drátu je tedy téměř stoprocentní. Také kvalita návarů a dosažená drsnost povrchu návarů je lepší než při použití prášku. Oproti prášku, který je nanášen koaxiálně se směrem laserového paprsku, bývá drát přiváděn laterálně pod určitým úhlem. Tento způsob podávání bývá zkoumán v rámci vědeckých experimentů, kdy se zatím za nejvhodnější sklon drátu ukázalo rozmezí úhlů od 10 – 75° vzhledem k rovině základního materiálu (25). Při navařování na zařízení JK701H v RCMT se pracuje se sklonem drátu 30°. Aby byly zajištěny kvalitní návary, musí být drát podáván ve směru pohybu stolu stroje, tedy proti směru navařování (Obr. 8). (27)



Obr. 8 Směr podávání drátu (27)

Nejlepším možným řešením je podávání drátu kolmo k povrchu materiálu. To je však pro drát na rozdíl od prášku problematické. Aby došlo k roztavení drátu v celém jeho průměru, musí být přiveden do ohniska paprsku. Tento problém byl vyřešen v institutu IWS Fraunhofer (28), kde navrhli a zkonstruovali laserovou hlavu s koaxiálně podávaným drátem (Obr. 9). Drát je podáván kolmo k povrchu a taven v místě styku s materiálem třemi laserovými paprsky, které vznikly rozdělením hlavního laserového svazku a jsou přiváděny laterálně na drát. Hlava se dá instalovat na robotické rameno a díky tomu je možné navařovat v jakýchkoli polohách. V současnosti je rozšířená spíše ruční metoda navařování drátu laserem. (20) (28)



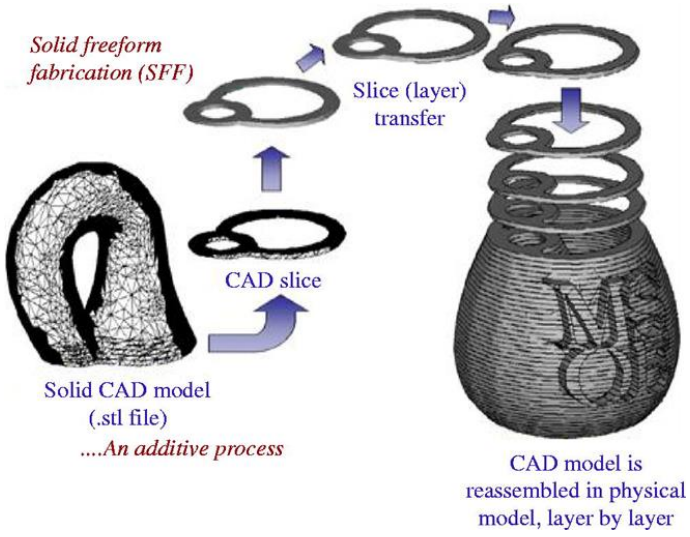
Obr. 9 Laserová hlava s koaxiálním podáváním drátu (29)

2.4.2 Opravy laserovým navařováním

U každé součásti dochází časem k jejímu opotřebení. Takovou součást je potřeba opravit nebo ji vyměnit za novou. V moderním strojírenství se z ekonomického hlediska vyplácí součásti opravovat namísto výroby nových. Opravy se nejvíce vyplácejí u tvarově složitých součástí, zvláště pak u lehce poškozených součástí a u součástí, kterým je potřeba pouze doplnit opotřebenou hranu nebo tvar. Laserové navařování se v opravárenství jeví jako velice perspektivní technologie. Touto technologií se dá velmi efektivně a kvalitně doplnit materiál do opotřebených míst součásti. Vzhledem k možnosti navařování malých jemných návarů se dají laserovým navařováním opravovat například i opotřebené tvářecí formy, hrany lopatek turbín, či opotřebené drážky pro pístní kroužky na hlavách pístů. (30) (29) (31) (22)

2.4.3 Výroba celých součásti

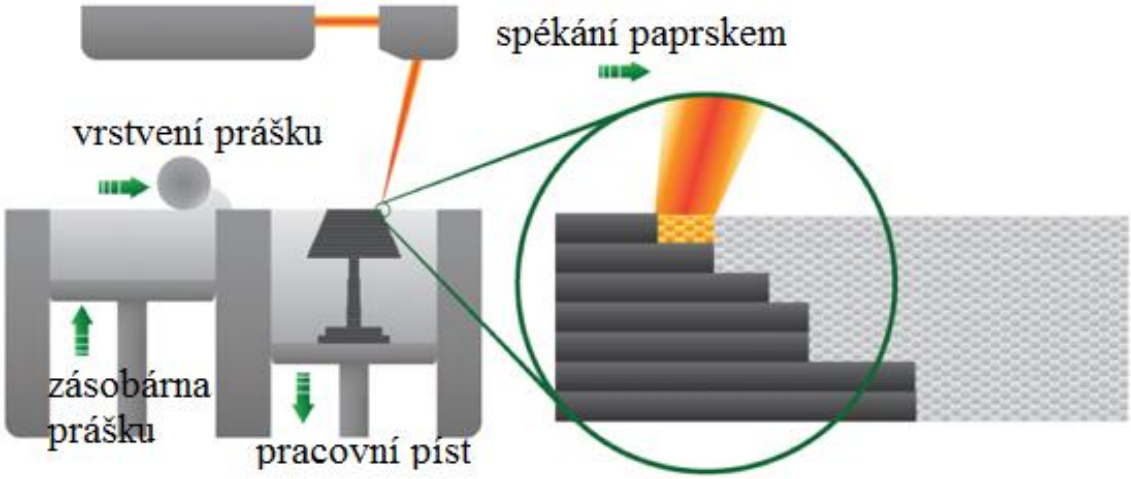
V současnosti je aditivní výroba (Additive Manufacturing, dále jen AM) velmi rychle se rozvíjející obor. Nejen že se touto technologií dají vyrábět tvarově velmi složité součásti často jinou technologií nevyrobitelné, ale také se dá ušetřit veliké množství materiálu oproti metodám třískového obrábění a na rozdíl od technologií slévání a tváření není potřeba drahých forem a přípravků. AM je často také označován jako Additive Layer Manufacturing (ALM) neboli aditivní výroba po vrstvách. Při AM se nejprve model součásti rozloží na jednotlivé vrstvy (Obr. 10), následně se vygeneruje program a součást je pak vrstvu po vrstvě vyrobena do finální podoby modelu. (32)



Obr. 10 Princip rozvrstvení modelu pro AM (32)

Aditivní výroba za pomoci laseru využívá všech již výše zmíněných výhod laseru při tepelném zpracování kovů, jako jsou malé tepelné ovlivnění okolního materiálu, možnost přesné fokusace paprsku na velmi malou plochu, vysokou hustotu výkonu na jednotku plochy, velmi rychlé ohřátí materiálu, malé teplotní deformace materiálu. Z hlediska technologie se dá aditivní výroba rozdělit podle jejího principu na dvě metody. Selective Laser Sintering (dále jen SLS) neboli selektivní spékání prášku a Direct Energy Deposition (dále jen DED) neboli přímé nanášení materiálu.

Technologií SLS se dají vyrábět součásti jakýchkoli tvarů. Při výrobě se používá kovový prášek, který je nanesen do tenké vrstvy na píst. Přesnou fokusací laserového paprsku je pak tento prášek v přesně stanovených místech nataven a dojde k jeho spojení dle tvaru vrstvy podle výrobního programu. Píst následně sjede níž o tloušťku vrstvy a je na něj nanesena další vrstva, ve které je opět prášek v programem přesně definovaných místech spečen laserovým paprskem. Takto se postupuje vrstvu po vrstvě, dokud není součást hotová. Přebytečný prášek se poté odčerpá zpět do zásobníku, odkud bude znova využit. Celý proces probíhá v ochranné atmosféře, nejčastěji se používá plyn argon. Pro technologii SLS je však potřeba speciální stroj a není možné ji provádět na zařízení JK701H. (33) (34)



Obr. 11 Výroba součásti pomocí SLS (33)

Druhým zmíněným procesem je DED. Princip této technologie je stejný, jako při výše zmíněném laserovém navařování. Jedná se o laserové navařování, kdy se materiál nanáší postupně vrstvu po vrstvě na kovový podklad, který může, ale nemusí být součástí výrobku. Pro technologii DED se v současnosti pro výrobu celých součástí vzhledem k odladěnosti procesu používá výhradně prášek. Cílem vědeckých experimentů je však

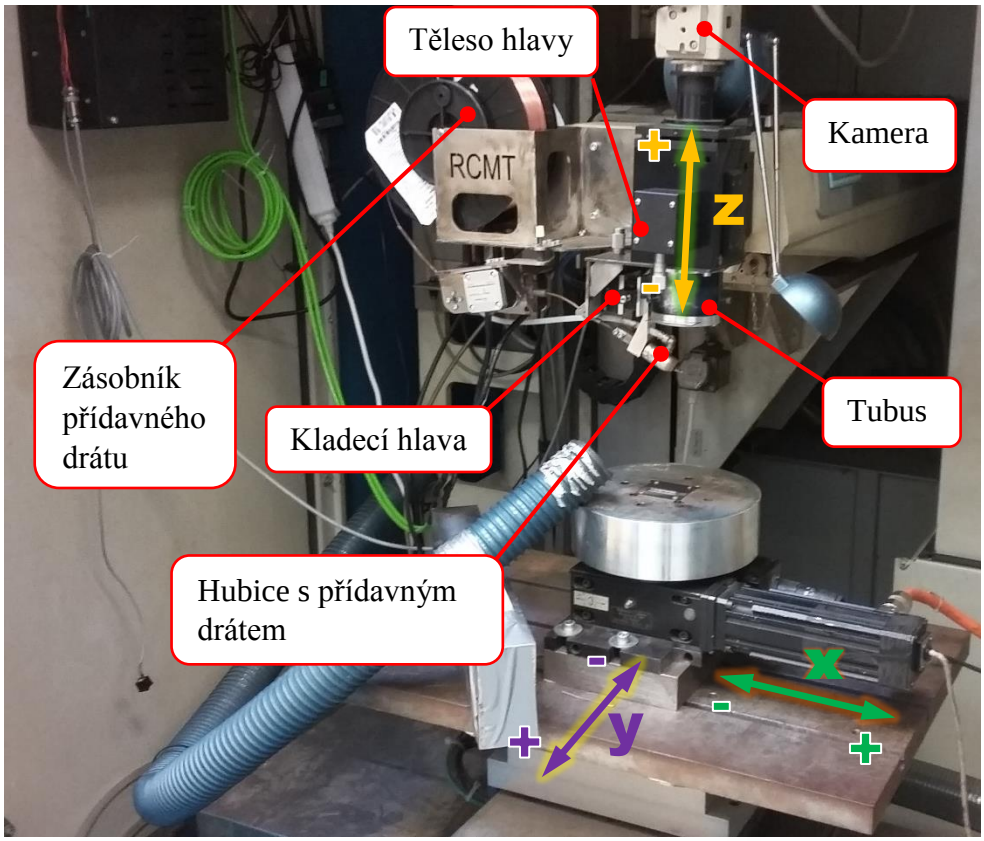
snaha co nejdříve odladit parametry procesu navařování drátu hlavně kvůli ceně drátu a kvalitě návarů. Pomocí DED se sice nedají vyrábět tak detailní a složité díly jako s SLS, výhodu má ale při výrobě větších částí, kdy je v případě SLS potřeba veliký pracovní prostor a veliké množství prášku. (35)

3 Revize původní laserové hlavy

Pro možnost návrhu úpravy laserové hlavy bylo nutné nejprve zjistit, v jakém je stavu. Byla zprovozněna kladecí hlava, sestrojena Janem Peškem v rámci jeho diplomové práce a bylo provedeno několik zkušebních návarů. U původní laserové hlavy byly zaznamenány nedostatky, které znemožňují její efektivní využití pro technologii laserového navařování. Bylo tedy rozhodnuto, že se navrhnou úpravy, které odstraní pokud možno všechny tyto nedostatky. Zařízení by následně mělo být vhodné pro opakované aplikace laserového navařování.

3.1 Konstrukce původní laserové hlavy

Původní laserová hlava v zařízení JK701H se skládá ze dvou hlavních částí: tubusu a tělesa hlavy. V tubusu je pevně uložena čočka a jsou k němu přimontovány kryty ochranných skel, které chrání čočku před poškozením. V případě použití zařízení JK701H pro technologii laserového řezání je do tubusu vložena řezací tryska, ve které je uložena čočka a ochranné sklo. Tento tubus je uložen v tělese hlavy a je možné ho polohovat podél vertikální osy z stroje (Obr. 12) pomocí mikrometrické hlavice. Uložení a vedení tubusu je realizováno pomocí kuličkového vedení, skládajícího se z kuliček uložených v pouzdře, které je vloženo mezi čtveřici válečků. Na hlavě je umístěna kamera, která pomáhá nastavení optimální výšky tubusu nad povrchem. Kamera slouží také k označení místa dopadu laserového paprsku pomocí nastavitelného kříže. Ke spodní části hlavy je připojena kladecí hlava, která slouží k přívodu přídavného materiálu ve formě drátu do ohniska laserového paprsku. Kladecí hlava se skládá ze zásobníku přídavného drátu, podávacího mechanizmu a hubice. Hubice je připevněna ke dvojici polohovacích goniometrických stolků, které slouží k polohování hubice a tedy k doladění přesného přívodu drátu do ohniska laserového paprsku.



Obr. 12 Pracovní prostor zařízení Lumonics JK701H

3.2 Princip laserového navařování na zařízení JK701H

K porozumění funkcí jednotlivých částí laserové navařovací hlavy je potřeba nejprve popsat proces laserového navařování na zařízení Lumonics JK701H. Po montáži kladecí hlavy od Jana Peška je potřeba nastavit požadovanou rychlost podávání drátu na ovládací jednotce kladecí hlavy. Dále je potřeba zajistit, aby byl drát podáván do ohniska laserového svazku, k čemuž slouží polohovací stolky nesoucí hubici s drátem. Hubice s drátem musí být v optimální výšce nad plochou základního materiálu, aby bylo dosaženo kvalitních návarů (tato výška byla stanovena experimentálně). Na začátku navařování dojde k sepnutí laseru, kdy laserový paprsek začne pálit do základního materiálu. Do ohniska laserového svazku, ve kterém vznikne lázeň roztaveného kovu je následně přiváděn drát pomocí kladecí hlavy a křížový stůl se základním materiálem se poté začne pohybovat v kladném směru osy *x* (Obr. 12). Tím vznikne návar. Důležité je, aby pohyb křížového stolu se základním materiálem směřoval od hubice s drátem, tedy aby byl opačný oproti směru navařování.

3.3 Nedostatky původní laserové hlavy

Původní kuličkové vedení nemá dostatečnou tuhost a při polohování tubusu podél osy *z* (Obr. 12) se často zadrhává a pohyb není plynulý. Tubus má znatelné vůle do vodorovné roviny stroje. Vůle v uložení představují značné komplikace při konfiguraci laseru, kdy se při jakékoli manipulaci s tubusem či hlavou musí opětovně provádět korekce místa dopadu laserového svazku pomocí kříže kamery. Následně se musí pomocí polohovacích stolků upravit poloha hubice s drátem, aby byl drát přiváděn přesně do ohniska paprsku a došlo k jeho správnému natavení. Toto opětovné nastavování zabírá mnoho času. Kvůli původnímu vedení s vůlemi a nepohyblivému uložení čočky v tubusu také není zajištěné, že laserový svazek prochází přesně středem čočky a nemůže být zajištěna jeho správná fokusace. Na kladecí hlavě byl jeden ze dvou goniometrických stolků rozbitý a bylo potřeba ho nahradit. Dále bylo zjištěno, že dva goniometrické stolky nejsou zcela vhodné řešení, neboť umožňují pouze natáčet přívod drátu podél svislé osy *z* a podél vodorovné osy *y* a je obtížné pomocí nich přesněji korigovat přívod drátu do ohniska paprsku.

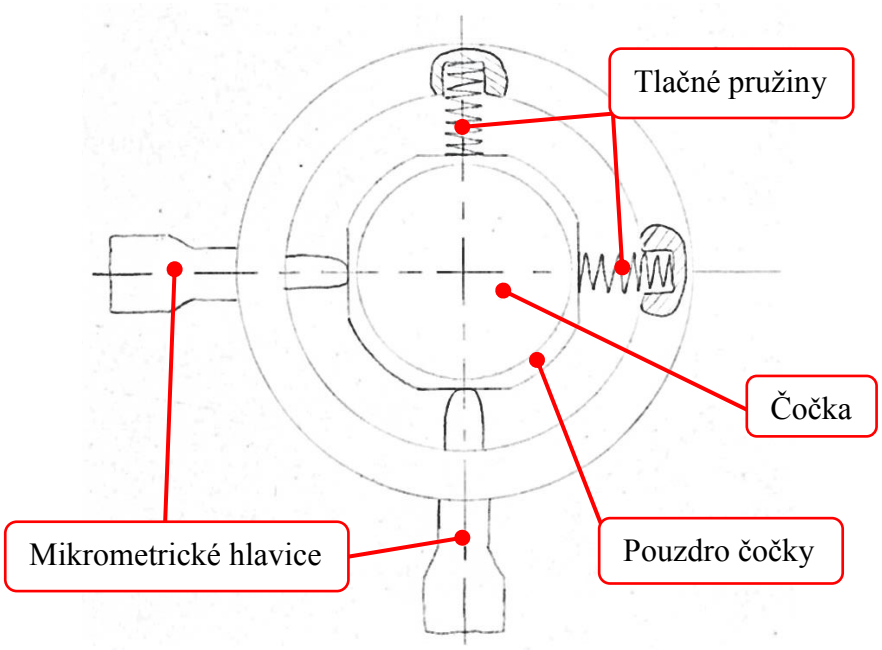
4 Předběžné návrhy úprav laserové hlavy

Po analýze všech nedostatků se začalo s navrhováním potřebných změn, které by tyto nedostatky odstranily. Hlavní diskutované změny laserové hlavy se týkaly zejména změn uložení a vedení tubusu v hlavě a dále návrhu polohování samotné čočky uvnitř tubusu. Cíl změny uložení tubusu je dosáhnout vyšší tuhosti, tím zamezit nežádoucím vůlím a dosáhnout vedení s plynulým pohybem tubusu podél svislé osy *y*. Implementací způsobu polohování čočky v osách *x* a *y* by měl být vyřešen problém s nesprávnou fokusací laserového paprsku a současným použitím jiných polohovacích stolků by se mohlo dosáhnout přesnějšího podávání drátu do ohniska paprsku. Při navrhování se muselo dbát i na to, aby složitost případných nově vyráběných dílů byla taková, aby se přednostně daly vyrobit ve VCSVTT.

4.1 Předběžný návrh způsobu polohování čočky

Při navrhování způsobu polohování čočky nejprve byly vyhledány komerční systémy a ověřeny pro jejich případnou vhodnost pro zařízení JK701H. Jelikož tato nabízená polohovadla nevyhovovala zejména kvůli svým rozměrům, bylo rozhodnuto, že se navrhne polohovadlo nové, kompatibilní se zařízením JK701H.

Nejprve bylo třeba stanovit princip, na kterém bude nové polohovadlo fungovat. K tomu byly použity získané 3D modely komerčních polohovadel, ze kterých byl zjištěn princip jejich funkce. Inspirace byla převzata z konstrukce polohovadla od firmy Thorlabs. Princip tohoto polohovadla spočíval v polohování čočky ve dvou osách pomocí dvojice mikrometrických hlavic a dvou malých listových per, které tlačily čočku proti hlavicím. Tento princip byl z hlediska návrhu a výroby v VCSVTT složitý a tak byla snaha nahradit listová pera vinutou pružinou, umístěnou diagonálně proti mikrometrickým hlavicím. Později bylo od tohoto řešení upuštěno, neboť došlo k názoru, že se v obou případech nedá polohovat čočka pouze v jedné ose, aniž by pružina netlačila čočku i do druhé osy. Následně byl navržen způsob polohování čočky pomocí dvojice mikrometrických hlavic a dvou pružin, uložených křížově proti sobě (Obr. 13). Tento návrh byl posléze schválen a určen k dalšímu zpracování.

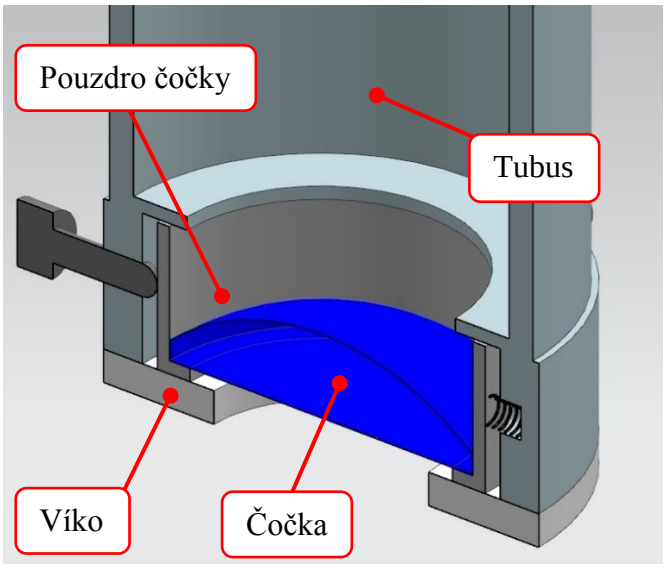


Obr. 13 Skica návrhu způsobu polohování

4.2 Návrh implementace polohovadla do laserové hlavy

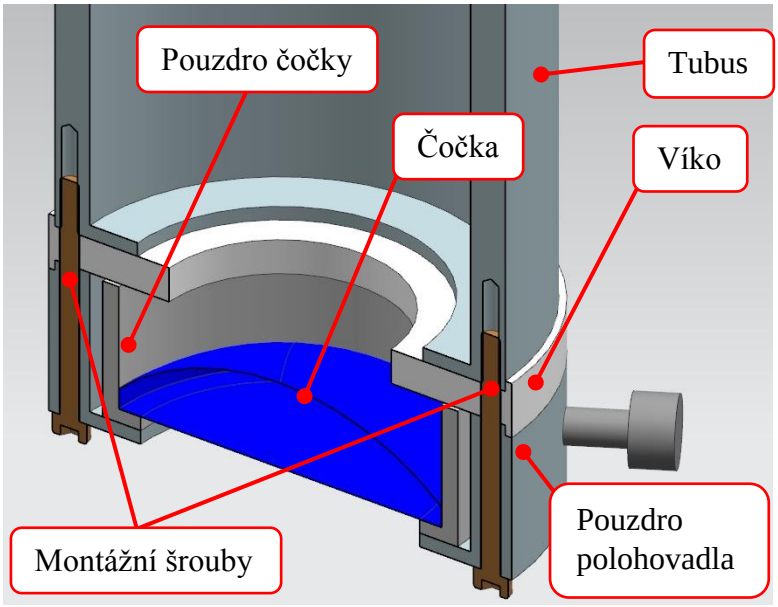
Poté co byl zvolen princip, na kterém bude polohovadlo fungovat, následoval návrh umístění polohovadla v laserové navařovací hlavě. Byly vytvořeny dva návrhy, které byly následně konzultovány.

V prvním návrhu bylo polohovadlo pevnou součástí tubusu, se kterým tvořilo jeden celek (Obr. 14). Pro tuto variantu by byl vyroben nový tubus, jehož průměr by byl ve spodní části větší než u původního, aby se do něj vešlo polohovadlo. Čočka by byla uložena v pouzdře, které by se pohybovalo po víku. Víko by uzavíralo zespoda polohovadlo. Tato varianta byla shledána nevhodnou, zejména kvůli složitosti výměny čoček po jiné laserové technologie. Polohovadlo by se muselo rozebrat a po výměně čočky by se musely znovu usazovat pružiny a pouzdro s čočkou, což by jeden operátor sám nezvládl.



Obr. 14 Polohovadlo součástí tubusu

Ve druhém návrhu bylo počítáno s polohovadlem jako samostatným celkem nesoucím čočku, který se připojí k tubusu (Obr. 15). Polohovadlo by se skládalo ze dvou částí: pouzdra polohovadla a víka. Tyto by k sobě byly spojeny pomocí šroubů a tvořily tak pevný celek. Skrze šrouby procházející stěnou polohovadla by se následně polohovadlo připojilo k tubusu. Výhodou tohoto řešení by byla snadná výměna čoček pro různé laserové technologie. Každá čočka by byla uložena ve vlastním polohovadle a to by se jednoduše odmontovalo z tubusu a vyměnilo za jiné. Toto řešení bylo zvoleno za vhodné, zejména díky snadné výměně čoček při použití zařízení JK701H pro různé laserové technologie.



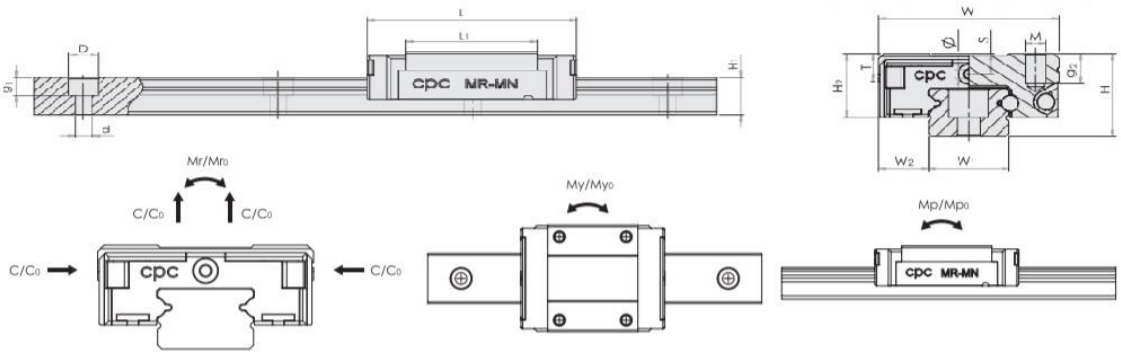
Obr. 15 Polohovadlo jako samostatný celek přiojený k tubusu

4.3 Návrh změny uložení a vedení

Jako náhrada původního vedení bylo navrženo vedení lineární. Toto vedení je realizováno skrze kolejnice a vozíčky a nabízí mnohem vyšší tuhost než původní vedení. Vzhledem k rozměrovým omezením úlohy, kdy se počítá s využitím některých současných částí hlavy a jejich pouhou úpravou, bylo navrženo lineární vedení s označením CPC MR7MN (Obr. 16). Šířka kolejnice tohoto vedení je stejná jako šířka drážky původního vedení v tubusu. Vozíčky s kolejnicemi by sloužily převážně k zajištění přesného vedení tubusu v ose *z* a zamezení vůlí nežádoucích vůlí. Kolejnice by tedy byly situovány svisle a vozíčky by byly namáhány pouze zanedbatelným zatížením C/C_0 (Obr. 16). Vyšší tuhost uložení by byla dosažena použitím čtyř vozíčků, dvou na každé kolejnici. Hmotnost polohovadla by byla zachycena dorazem, které se opírá o mikrometrickou hlavici připojenou k tělesu hlavy. Doraz s mikrometrickou hlavicí jsou součástí původní hlavy a byly by zachovány. Při běžném používání laserového zařízení by tedy lineární vedení nemělo být nijak významně staticky či dynamicky zatěžováno. Vozíčky s kolejnicemi by byly situovány na obvodu tubusu symetricky proti sobě, čímž by došlo k omezení vlivu působení statických momentů na vozíčky. Tento typ vedení by měl vyhovovat pro odstranění všech nedostatků původního vedení a byl posléze schválen.

Model Code	Fabricate Dimensions		Rail Dimensions (mm)				Block Dimensions (mm)					
	H	W_2	W_1	H_1	P	D×d×g_1	W	L	L_1	H_2	P_1	P_2
MR 7MN SS	8	5	7	4.7	15	4.2 x 2.4 x 2.3	17	23.7	14.3	6.5	8	12

Block Dimensions (mm)				Load Capacities (N)		Static Moment (Nm)			Weight	
M×g_2	Ø	S	T	C_{100}(dyn)	C_0(stat)	Mr_0	Mp_0	My_0	Block(g)	Rail(g/m)
M2 x 2.5	1.1	1.6	2.8	890	1400	5.2	3.3	3.3	8	215



Obr. 16 Specifikace lineárního vedení CPC MR7MN (36)

5 Zpracování finálního návrhu úpravy laserové hlavy

Po schválení dílčích návrhů bylo zpracováno kompletní řešení úpravy laserové hlavy. Při finálních návrzích bylo přihlíženo k předem daným omezením, kdy se při úpravě měl zachovat tubus a těleso hlavy s tím, že dojde pouze k jejich upravení. Další omezení se týkalo maximálního průměru polohovadla, aby polohovadlo nekolidovalo s kladecí hlavou, která je připevněna k tělesu hlavy.

5.1 Konečný návrh polohovadla

Při navrhování finálního polohovadla bylo vycházeno z dříve schválených návrhů. Polohovadlo by mělo být vytvořeno jako samostatný celek připevněný k tubusu, měla by být snadná jeho výměna a mělo by zajišťovat polohování čočky v osách *x* a *y* stroje. Princip polohování bude spočívat v posouvání pouzdra čočky pomocí dvojice mikrometrických hlavic. Proti hlavicím budou v ose zasazeny dvě tlačné pružiny, které budou tlačit pouzdro čočky proti šroubům. V polohovadla musí být také implementována stejná ochranná skla čočky, která byla využívána v původní hlavě. Materiál vyráběných části polohovadla bude kvůli zajištění nízké hmotnosti slitina hliníku ČSN 42 4201.

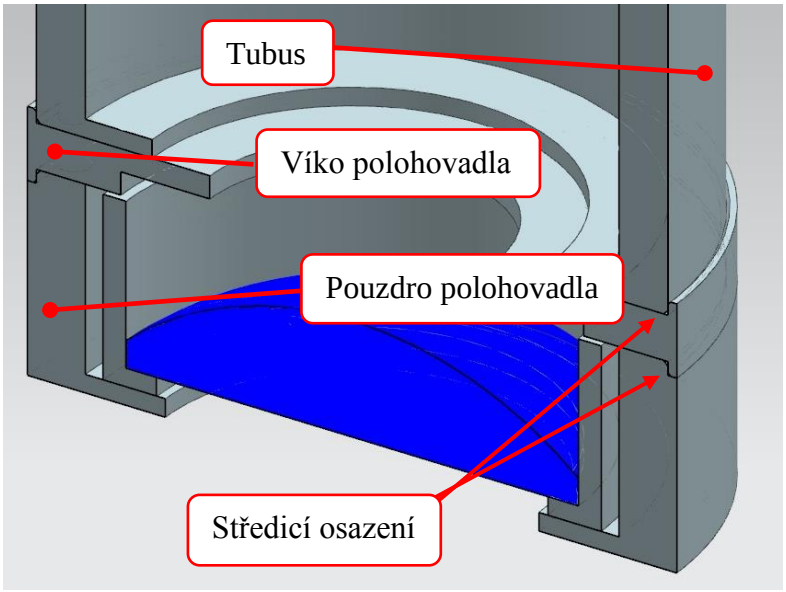
5.1.1 Stanovení důležitých rozměrů

Nejdůležitější a nejvíc limitující rozměr byl maximální průměr polohovadla, aby nedošlo ke kolizi s kladecí hlavou. Tento byl stanoven na základě změřené mezery mezi tubusem a kladecí hlavou, kdy maximální přípustný průměr vyšel $D = 76\ mm$, aby se tubus nedotýkal kladecí hlavy. Na základě toho byl stanoven průměr polohovadla $D = 73\ mm$, kdy bude vůle mezi polohovadlem a kladecí hlavou dostačující k zabránění kolize těchto členů. Pro funkční návrh bylo třeba znát také nejmenší průměr, respektive velikost nejmenšího členu ve středu polohovadla. Tímto členem je samotná čočka o průměru $D = 50{,}75\ mm$. Když byly známy hlavní limitující rozměry polohovadla, bylo třeba určit zbylé rozměry. K tomu byly vymodelovány hlavní části polohovadla. Nejprve bylo vytvořeno pouzdro čočky, jehož rozměry byly převzaty z původního pouzdra v původní hlavě. Rozměry původního pouzdra byly průměr $D = 56\ mm$ a výška $H = 20\ mm$. Přestože celková výška polohovadla nebyla limitující rozměr, byla snaha ji navrhnout tak, aby spodní plocha čočky byla pokud možno ve stejné poloze vůči tubusu,

jako byla v původní laserové hlavě. Dalším podstatným rozměrem byl rozsah polohování, tedy vzdálenost, o kterou bude možno pouzdro s čočkou posouvat do jednotlivých os. Po konzultacích s Ing. Janem Brajerem, Ing. Ivanem Divišem a Ing. Pavlem Zemanem, Ph.D. se došlo k závěru, že polohovadlo má sloužit hlavně k jemnému doladění polohy čočky a tudíž stačí i malý rozsah pohybu. Navržený rozsah pohybu byl stanoven na 4 mm, tedy 2 mm do kladného a 2 mm do záporného směru os x a y. Tento rozsah byl po konzultaci shledán za dostačující. Na základě tohoto rozsahu byla stanovena tloušťka stěny pouzdra polohovadla $t = 6\ mm$. To byl jeden z důležitých rozměrů, neboť stěnou polohovadla měly procházet montážní šrouby a budou v ní také zahloubení pro pružiny. Hloubka zahloubení bude kritický parametr při návrhu pružin. Od stanovených důležitých rozměrů se následně odvíjely návrhy rozměrů ostatních částí polohovadla.

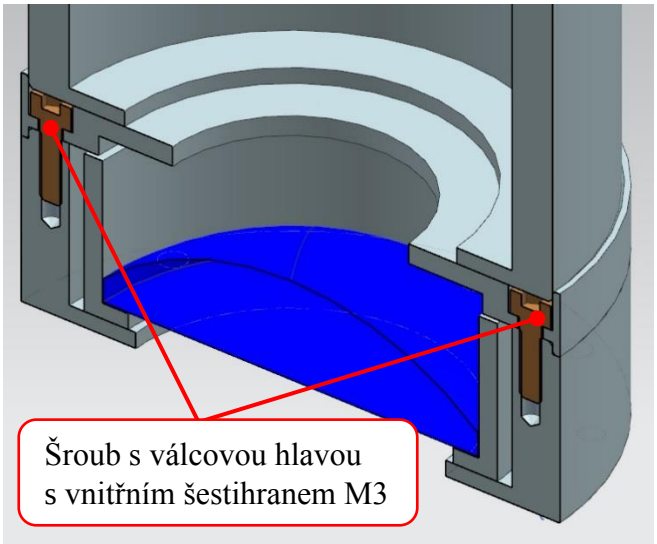
5.1.2 Stanovení důležitých prvků polohovadla

Spojení polohovadla s tubusem bude realizováno skrze šrouby procházející stěnou polohovadla tak, jako to bylo zobrazeno v předběžném návrhu (Obr. 15). Aby bylo dosaženo přesného spojení polohovadla s tubusem, musí být obě součásti vůči sobě středěné. Vzhledem k povaze úlohy, kdy se počítá s častou výměnou polohovadla, bylo vybráno středění pomocí osazení. Bylo využito rozdílu vnějších průměrů polohovadla a tubusu a středění bylo navrženo na průměru 71 mm, což je vnější průměr tubusu. Na stejném průměru bylo provedeno středění víka s pouzdrem polohovadla (Obr. 17).



Obr. 17 Středění polohovadla s tubusem

Na základě toho musel být vyřešen způsob spojení pouzdra polohovadla s víkem tak, aby mohlo polohovadlo přesně dosedat na spodní část tubusu. Navržené spojení víka s pouzdrem polohovadla bude realizováno pomocí dvou šroubů s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem. Aby byla zachována rovná dosedací plocha na víku, budou díry pro šrouby ve víku zahloubeny, čímž dojde ke skrytí hlav šroubů. Od toho se začala odvíjet výška víka, která musela být dostačující, aby se do ní mohla vyvrtat zahloubení. Výška víka byla stanovena na $h = 6\ mm$ a pro spojení byly zvoleny šrouby s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem se závitem M3 třídy 8.8, které pro tuto aplikaci mají dostatečnou pevnost. Průměr hlavy tohoto šroubu je $d_k = 5{,}5\ mm$ a jeho výška $k = 3\ mm$ (37). Výška víka je dostačující, aby při vyvrtání zahloubení zbyl dostatek materiálu pod hlavou šroubu a hlavy šroubů byly pod úrovní dosedací plochy. Zároveň nebude polohovadlo příliš vysoké. Počet spojovacích šroubů víka s tělesem polohovadla byl stanoven na dva, uložené symetricky proti sobě (Obr. 18). Šrouby by neměly být nijak významně staticky zatíženy, protože tíhu polohovadla ponesou šrouby, kterými se připojí polohovadlo k tubusu. Počet dvou šroubů byl zvolen také proto, aby byl zredukován celkový počet šroubů procházejících stěnou polohovadla.

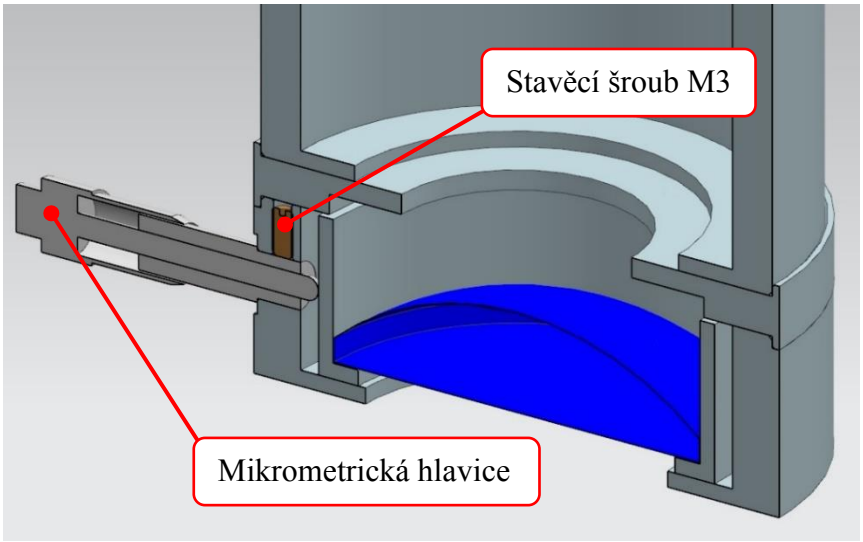


Obr. 18 Spojení pouzdra polohovadla s víkem

Aby mohly být navrženy pozice montážních šroubů polohovadla k tubusu, musely být do polohovadla zasazeny mikrometrické hlavice a pružiny, aby s nimi šrouby nekolidovaly.

5.1.3 Návrh mikrometrických hlavic

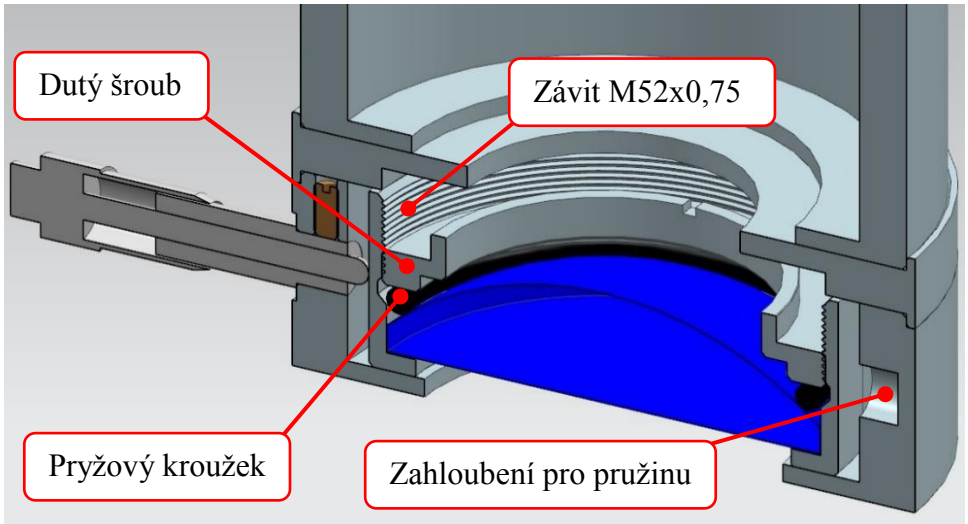
Vzhledem k rozměrovým omezení úlohy byly potřeba hlavice s malým rozsahem pohybu 4 mm. Nejmenší rozsah pohybu, který byl u komerčních mikrometrických hlavic nalezen, byl 6,5 mm. U mikrometrických hlavic se rozsah pohybu měří od nulové polohy, kdy je trn plně vysunut. Pro tuto aplikaci by bylo třeba, aby plně vysunutý trn měřil 4,5 mm. 4 mm je samotný rozsah polohování a 0,5 mm vznikne obrobením rovných ploch na stěně pouzdra čočky pro styk s trnem mikrometrické hlavice. Trn by se musel buď zkrátit nebo více vyšroubovat z hlavice, kdy by ale z rysky nebylo možno odečíst, o jakou vzdálenost byl posunut. Trn mikrometrické hlavice bývá vyráběn z tvrdých materiálů a jeho obrobení by bylo obtížné. Proto bylo po konzultaci a vyzkoušení původní mikrometrické hlavice z hlavy laseru rozhodnuto, že se v případě polohování do záporných směrů budou muset mikrometrické hlavice více vyšroubovat, což by tomuto řešení nemělo nikterak vadit. Dalším důležitým parametrem byly připojovací rozměry hlavice, neboť byly limitovány tloušťkou stěny pouzdra polohovadla, která je 6 mm. Nejvhodnější nalezená hlavice pro tuto aplikace byla od společnosti Thorlabs. Měla rozsah pohybu 6,5 mm, délku připojovací části 6 mm o průměru 6 mm a maximální zatížení trnu 2 kg. Připojení hlavice k pouzdru polohovadla bude ručním zatlačením hlavice do díry ve stěně pouzdra a následným zajištěním pomocí stavěcího šroubu (Obr. 19). Pro montáž hlavice bylo zvoleno uložení H7/js7, což je uložení vhodné pro zatlačení rukou a stavěcí šroub se závitem M3 o délce 6 mm (37).



Obr. 19 Uložení mikrometrické hlavice v polohovadle

5.1.4 Uložení čočky

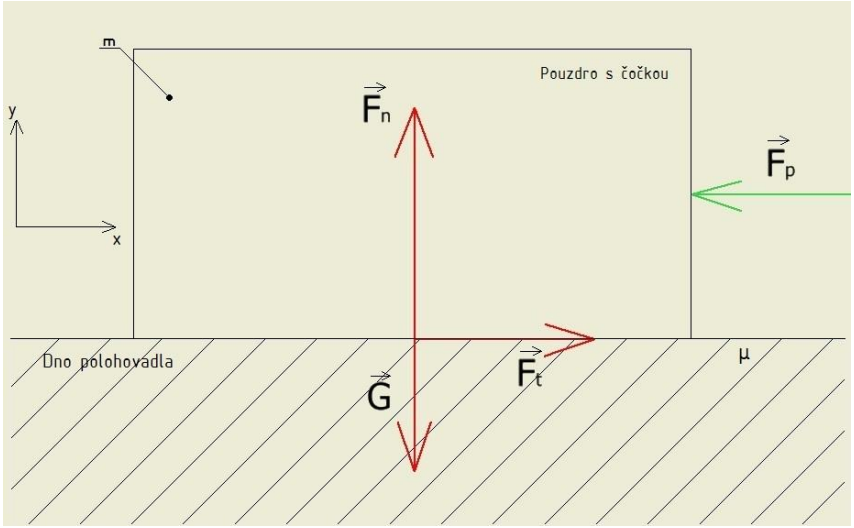
Aby bylo možné navrhnout potřebné pružiny pro funkční polohování, bylo nutné stanovit jejich přítlačnou sílu. Důležitý parametr pro tento výpočet byla hmotnost, kterou budou pružiny posouvat. K tomu bylo třeba dokončit návrh uložení čočky v pouzdře. Zde bylo opět inspirací řešení z původní laserové hlavy, kde byla čočka nepohyblivě uložena v pouzdře a axiálně zajištěna proti pohybu pomocí dutého šroubu. Mezi dutým šroubem a čočkou byl vložen pryžový kroužek kruhového průřezu, aby při dotahování šroubu nedošlo k poškození čočky. Pro dutý šroub byl vybrán závit s označením M52x0,75, což je závit vhodný pro jemnou mechaniku a optiku (37). Závit byl vybrán s ohledem na vnitřní rozměry pouzdra čočky. Dutý šroub byl opatřen dvěma zářezy pro utažení. Pohyb pouzdra s čočkou by měl být pouze posuvný po dně polohovadla, aby byla zajištěna správná funkce polohovadla. Z tohoto důvodu musí být pouzdro s čočkou zajištěno proti nežádoucímu pohybu. K tomuto účelu bylo navrženo předepnutí pouzdra pomocí axiálně umístěné pružiny, která se bude opírat o víko a dutý šroub. Dutý šroub byl tedy upraven, byla snížena jeho výška a byl opatřen osazením o průměru 40 mm, na které se poté nasadí pružina. Aby mohla být tato pružina navržena, musely být správně navrženy přítlačné síly pružin působících na pouzdro radiálně. Tyto pružiny budou zasazeny do zahloubení ve stěně polohovadla. Průměr zahloubení byl z důvodů jednodušší výroby stanoven stejný jako průměr díry pro montáž mikrometrické hlavice, tedy 6 mm. Hloubka zahloubení byla zvolena 4 mm, aby zbyl dostatek materiálu ve stěně pouzdra polohovadla (Obr. 20).



Obr. 20 Upevnění čočky v pouzdře

5.1.5 Návrhový výpočet pružin

Pro výpočet potřebné síly vyvinuté pružinou bylo třeba zjistit hmotnost celku, který bude posouvat. Hmotnost součástí byla získána přímo z programu NX10. Hmotnost čočky v pouzdře i s dutým šroubem a pryžovým kroužkem vychází dle programu *m = 100 g*. Následně bylo navrženo zjednodušené schéma sil působících na polohovadlo (Obr. 21).



Obr. 21 Zjednodušené schéma - síly působící na pouzdro čočky

Ze zákona akce a reakce je patrné, že tíhová síla *G* pouzdra s čočkou působící na dno polohovadla vyvolá normálovou sílu F_n, která bude mít stejnou velikost a opačný směr. Při sestavení rovnic rovnováhy do směrů os *x* a *y* vzniknou tyto rovnice:

$$x: F_t - F_p = 0 \tag{1}$$

$$y: F_n - G = 0 \tag{2}$$

Z rovnic (1) a (2) vyplývá:

$$F_t = F_p \tag{3}$$

$$F_n = G \tag{4}$$

Tíhová síla *G* byla stanovena pomocí rovnice:

$$G = m \cdot g \tag{5}$$

Dosazením tohoto vztahu do rovnice (4) vznikne vztah:

$$F_n = m \cdot g \tag{6}$$

Kde $m = 0{,}1\ kg$ je hmotnost pouzdra s čočkou a $g = 9{,}81\ m/s^2$ je tíhové zrychlení. Výsledná normálová síla tedy vyšla:

$$F_n = 0{,}1 \cdot 9{,}81 = 0{,}981\ N \tag{7}$$

Z normálové síly F_n se vypočítá třecí síla F_t pomocí vztahu:

$$F_t = F_n \cdot \mu \tag{8}$$

Člen μ v této rovnici je součinitel smykového tření. V této úloze se jedná o smykové tření dvou hliníkových ploch. V takovém případě se pohybuje hodnota součinitele smykového tření v rozmezí 1,05 – 1,35 (38) (39). Pro výpočet třecí síly byla vybrána hraniční hodnota 1,35, aby vyšla co největší třecí síla, protože ta je důležitým faktorem při návrhu pružin. Po číselném dosazení do rovnice (8) vyjde třecí síla:

$$F_t = 0{,}981 \cdot 1{,}35 = 1{,}324\ N \tag{9}$$

Pokud se zpětně dosadí do rovnice (3), vyjde potřebná síla od pružiny:

$$F_p = 1{,}324\ N \tag{10}$$

Pokud bude pružina působit na pouzdro s čočkou takto velikou silou, bude soustava pořád v rovnováze a nedojde k pohybu pouzdra. Pro zajištění správné funkce polohovadla musí však platit vztah:

$$F_p > F_t \tag{11}$$

Toto bude podstatná úvaha při volbě pružiny. Důležité je, aby tato nerovnost platila při maximální výchylce pouzdra s čočkou, kdy bude délka pružiny přibližně 9 mm. V této situaci bude síla od pružiny nejmenší v celém rozsahu pohybu, protože bude nejméně stlačena. Bylo rozhodnuto, že se při navrhování pružin nejprve ověří vhodnost komerčně nabízených pružin pro tuto aplikaci. V případě, že žádná nevyhoví, dojde k návrhu pružiny na míru. Rozměrově vhodná pružina byla nalezena u společnosti Hennlich. Její parametry jsou následující: volná délka $l_0 = 12{,}5\ mm$, průměr drátu $d = 0{,}63\ mm$, vnější průměr $D_e = 12{,}5\ mm$, délka při maximálním stlačení $l_n = 5{,}1\ mm$ a tuhost $R = 2{,}29\ N/mm$. Následně bylo třeba ověřit její vhodnost z hlediska potřebné síly. K tomu posloužil vztah pro určení síly od pružiny na základě jejího stlačení:

$$F_p = R \cdot x \tag{12}$$

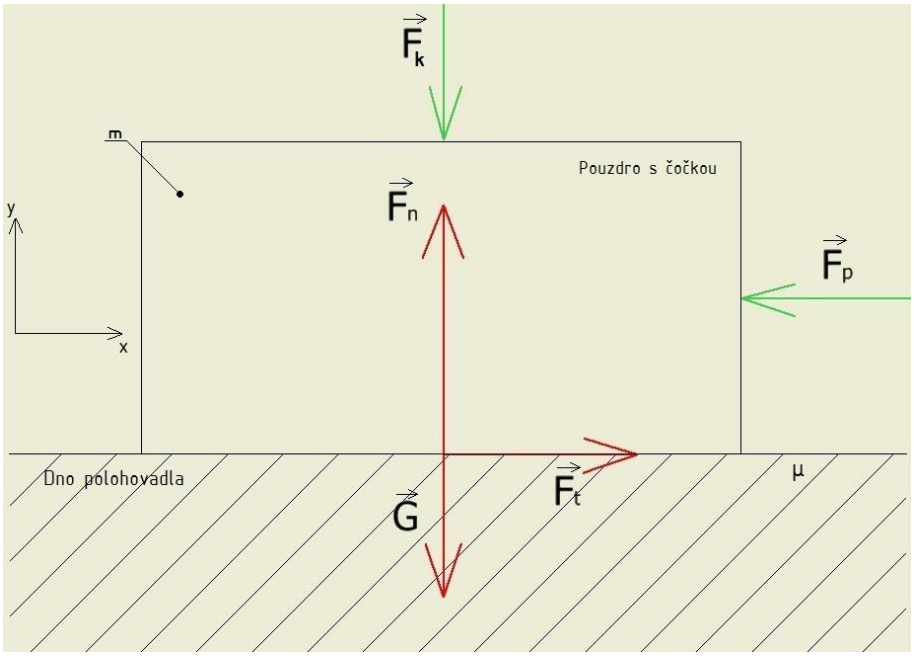
Člen R je tuhost pružiny a člen x vyjadřuje vzdálenost, o kterou je pružina stlačena. Dosazením do rovnice (11) vyjde vztah, kterým se ověří vhodnost této pružiny při nejmenším stlačení:

$$R \cdot x > F_t \tag{13}$$

Po číselném dosazení, kdy je za hodnotu stlačení zvolena hodnota $x = 3{,}5\ mm$, kterou získáme odečtením maximální délky pružiny v polohovadle od volné délky pružiny, vyjde:

$$8{,}015 > F_t \tag{14}$$

Tato podmínka je splněna, neboť velikost třecí síly je $F_t = 1{,}324\ N$. Podmínka (11) je tedy splněna s dostatečnou rezervou. Tato pružina byla shledána za vhodnou. Nyní bylo třeba provést návrh přítlačné pružiny, která bude zajišťovat pouzdro s čočkou proti nežádoucímu pohybu. Přítlačná síla této pružiny nebude muset být veliká, její úkol bude pouze zabránit pouzdru s čočkou v samovolném pohybu. U této pružiny bude podstatné určit, jakou maximální silou bude moci působit na pouzdro s čočkou, aby vzniklá třecí síla nebyla příliš veliká. Pro výpočet bylo nakresleno nové schéma (Obr. 22). Postup výpočtu bude obdobný, jako v případě první pružiny.



Obr. 22 Schéma působení sil včetně druhé pružiny

Opět byly sestaveny rovnice rovnováhy:

$$x: F_t - F_p = 0 \tag{15}$$

$$y: F_n - G - F_k = 0 \tag{16}$$

Na základě předchozích výpočtů je třeba dosazovací metodou navrhovat přítlačnou sílu F_k tak, aby výsledná třetí síla byla rovna maximálně polovině minimální hodnoty síly F_p, tedy:

$$F_t \leq \frac{F_p}{2} \tag{17}$$

Kde $F_p = 8\ N$. V tomto případě byla normálová síla vyjádřena:

$$F_n = G + F_k \tag{18}$$

Po dosazení do rovnice (8) je vztah pro sílu F_t:

$$F_t = \mu \cdot (\ G + F_k) \tag{19}$$

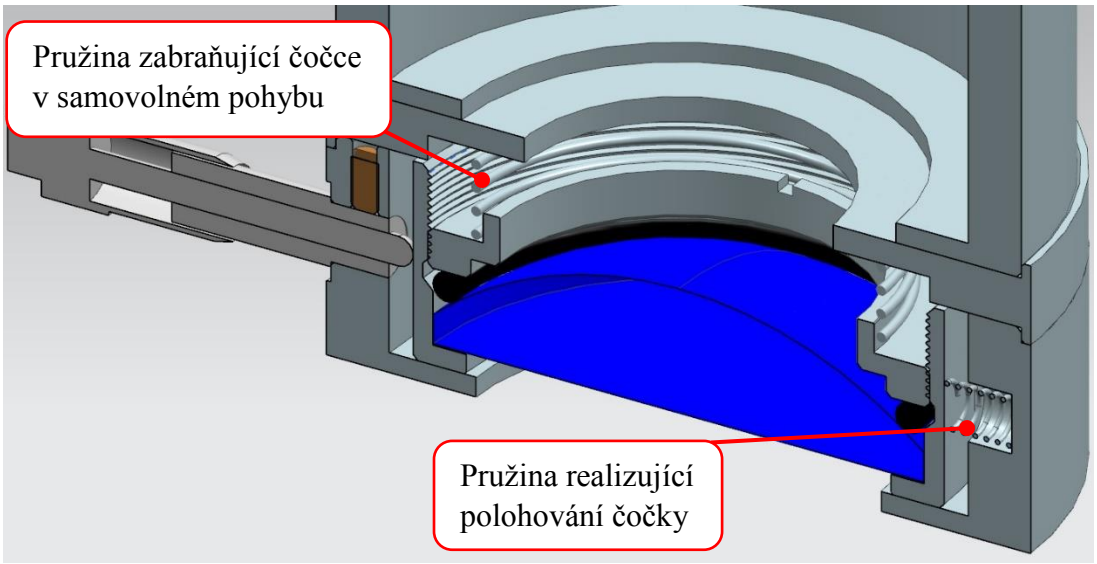
Za sílu F_t byla dosazena hodnota 4 N, což je polovina minima síly F_p, a za tíhovou sílu G byla dosazena dříve vypočtená hodnota 0,981 N. Pro tento výpočet platí předpoklad, že pružina bude z tenkého drátu. Její hmotnost byla tedy zanedbána. Následně byl výraz upraven, aby z něj byla vyjádřena potřebná síla F_k.

$$F_k = \frac{4}{1{,}35} - 0{,}981 = 1{,}982\ N \tag{20}$$

Potřebná délka stlačené pružiny vycházela z modelu na 9 mm. Dále bylo třeba stanovit tuhost pružiny, její vnější průměr, průměr drátu a volnou délku. Průměr drátu byl zvolen 1 mm. Vnější průměr se od této tloušťky odvíjel a byl zvolen 43 mm tak, aby měl vnitřní průměr velikost 41 mm a pružina se dala nasunout na osazení dutého šroubu. Volná délka a tuhost se určily za pomoci rovnice (12). Velikost síly od pružiny byla dosazena z (20) a stlačení bylo zvoleno 6 mm. Tuhost pružiny se tedy rovná:

$$R = \frac{F_k}{x} = \frac{1{,}982}{6} = 0{,}33\ N/mm \tag{21}$$

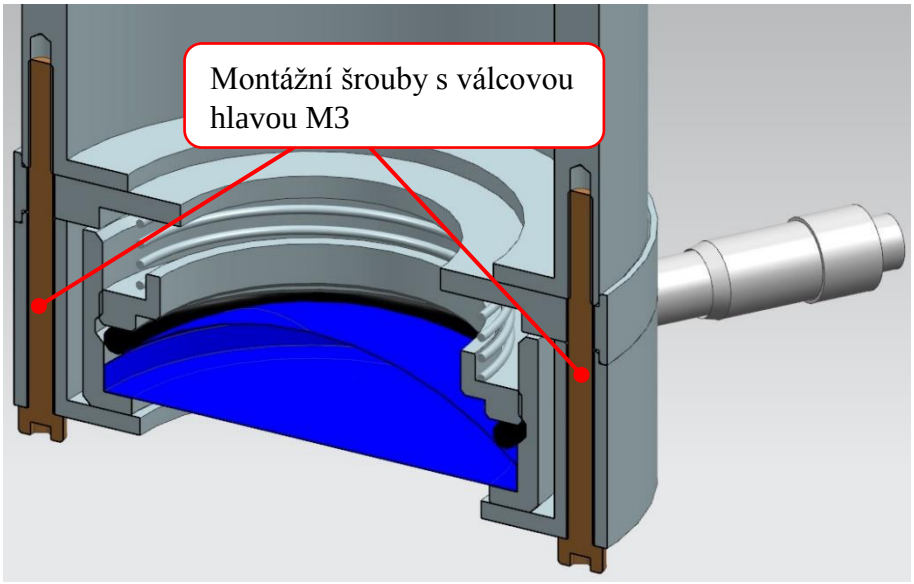
Navržená pružina má parametry: volná délka $l_0 = 15\ mm$, průměr drátu $d = 1\ mm$, vnější průměr $D_e = 43\ mm$, tuhost $R = 0{,}33\ N/mm$ a počet činných závitů $n = 3{,}5$.



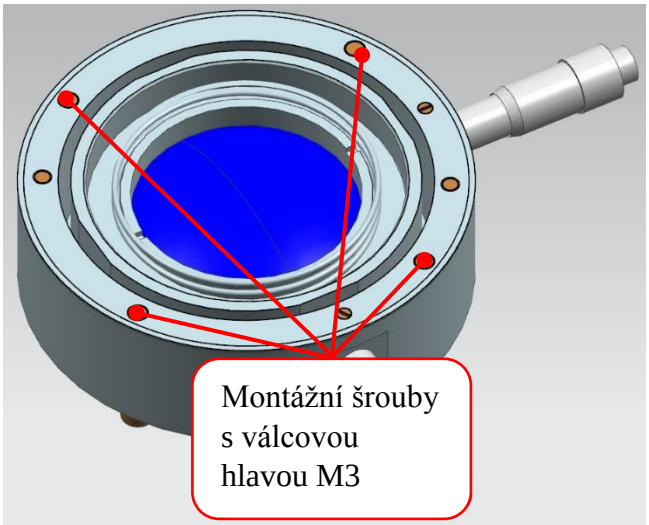
Obr. 23 Polohovadlo osazeno pružinami

5.1.6 Stanovení polohy připojovacích šroubů

Připojení polohovadla k tubusu bylo navrženo za pomoci šroubů s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem, procházejících stěnou polohovadla (Obr. 24). Bylo rozhodnuto o použití čtyř šroubů, kvůli snadnějšímu uspořádání vůči mikrometrickým hlavicím, pružinám a šroubům spojujícím víko s pouzdrem polohovadla. Délka šroubů byla zvolena 40 mm v závislosti na výšce polohovadla a hloubce navržené díry se závitem ve stěně tubusu. Byly zvoleny šrouby s válcovou hlavou se závitem M3 třídy pevnosti 8.8. Pro tuto aplikaci budou mít dostačující pevnost.



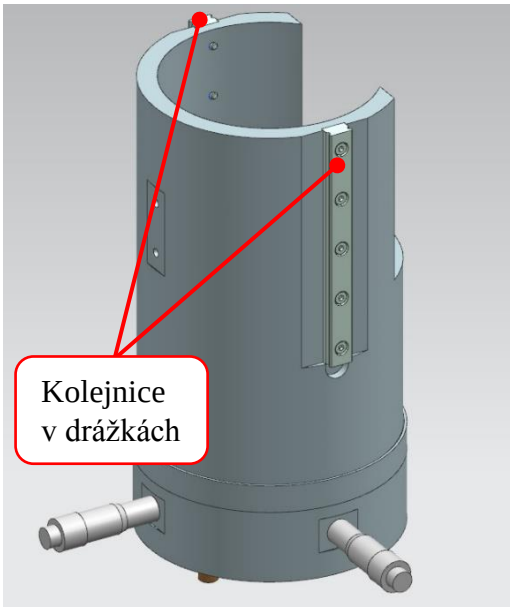
Obr. 24 Způsob uchycení polohovadla k tubusu



Obr. 25 Polohy montážních šroubů

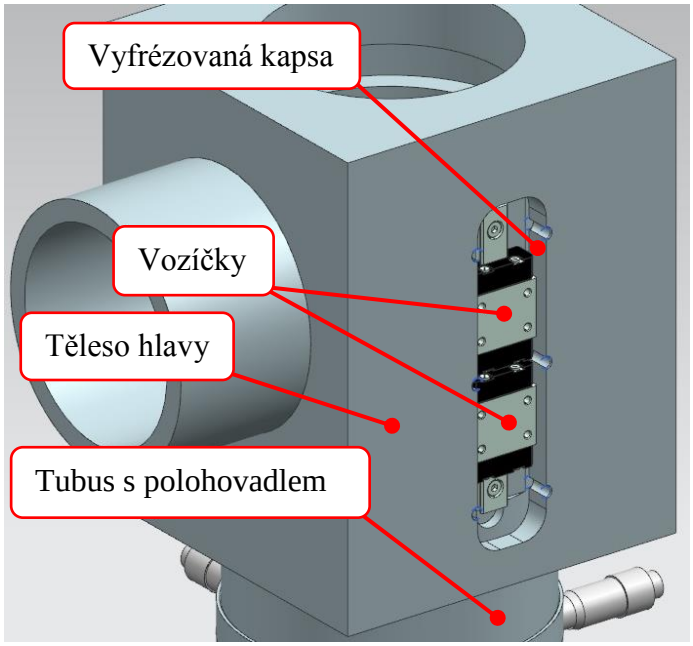
5.2 Vedení v nové laserové hlavě

Vedení a uložení tubusu v tělese laserové hlavy bude realizováno pomocí dvou lineárních vedení. Kolejnice budou zasazeny do vyfrézovaných drážek po stranách tubusu a připojeny pomocí šroubů s válcovou hlavou M2, které se zašroubují do vyřezaných závitů ve stěně tubusu (Obr. 26). Okolo drážek bude třeba obrobit rovinné plochy, aby vznikla dostatečná mezera mezi vozíčky a stěnou tubusu a vozíčky při pohybu nekolidovaly s tubusem. Princip uložení bude takový, že se vozíčky nepohyblivě spojí s tělesem hlavy a při nastavování výšky tubusu nad pracovním povrchem se bude tubus s kolejnicemi pohybovat vůči vozíčkům.



Obr. 26 Upevnění kolejnic k tubusu

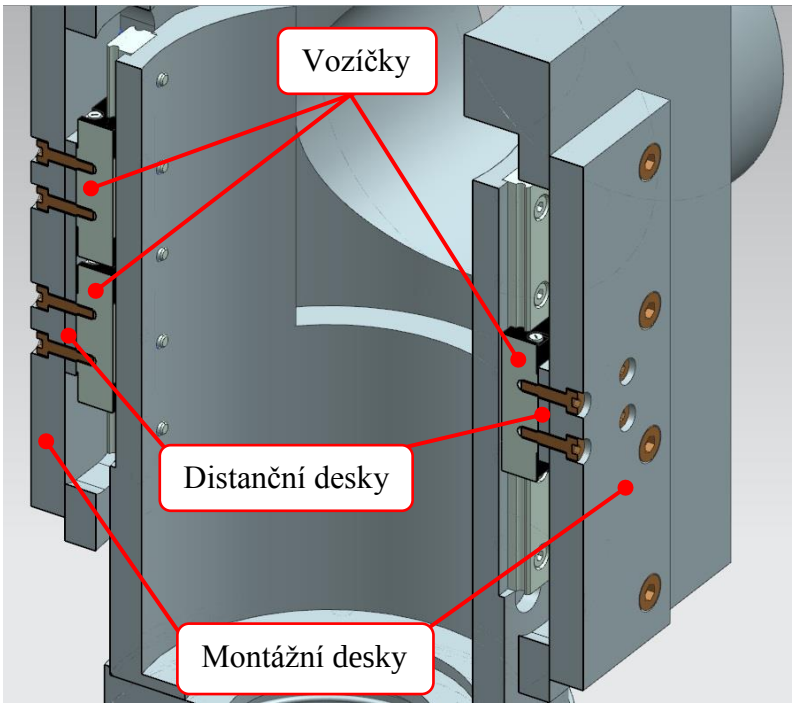
Těleso hlavy musí být pro montáž vozíčků upraveno. V tělese bude vyfrézována kapsa o šířce 18 mm, do které se vsadí vozíčky (Obr. 27). Délka kapsy byla zvolena stejná, jako délka původní kapsy v tělese hlavy, dojde tedy pouze ke zvětšení její šířky.



Obr. 27 Uložení vozíčků v tělese hlavy

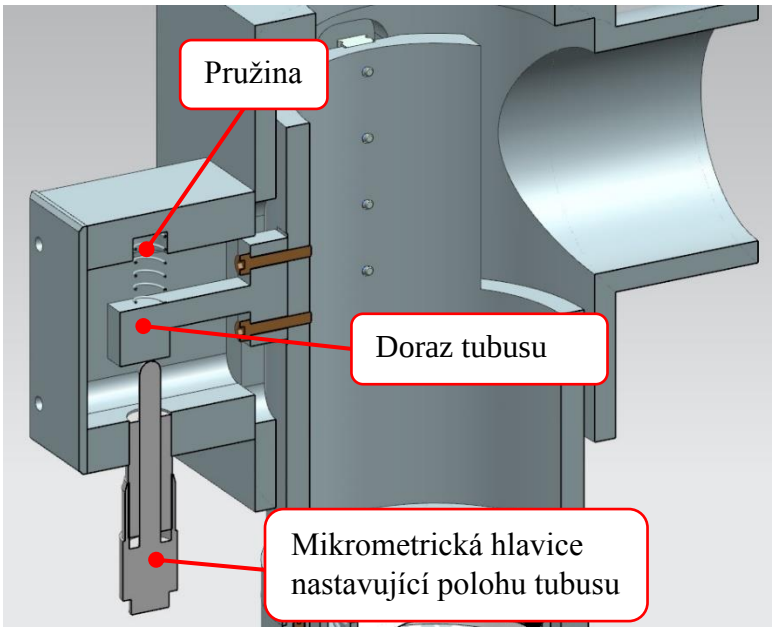
Způsob uchycení vozíčků k tělesu hlavy byl navržen obdobný původnímu vedení. K tělesu hlavy se připojí montážní desky, každá pomocí 8 šroubů s válcovou hlavou do nově vytvořených děr se závitem. Tyto desky zakryjí vyfrézovanou kapsu a následně se k ním připojí vozíčky pomocí šroubů. Pro připojení montážních desek byly zvoleny šrouby s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem M3. Tloušťka desek byla určena 6 mm, aby se do ní dalo vyrobit zahloubení a hlavy šroubů zůstaly skryty. Z Obr. 27 je patrné, že vnější plocha tělesa hlavy a horní plocha vozíčků neleží v jedné rovině. To by mohlo způsobit problémy při montáži, kdy by se na jedné straně utáhly šrouby pro montáž vozíčků více, než na druhé straně a tubus by neležel rovnoběžně s vertikální osou z stroje. Proto byly navrženy distanční destičky o tloušťce 1,9 mm, které vyplní mezeru mezi vozíčky a montážními deskami (Obr. 28). Na rozdíl od součástí polohovadla, pro které byl vybrán materiál dural (ČSN 42 4201) kvůli nízké hmotnosti, byla pro montážní a distanční desky zvolena konstrukční ocel S235JR. U těchto desek bude požadována nízká drsnost dosedacích ploch, která bude muset být docílena rovinným broušením. Konstrukční ocel nebude tolik náchylná k případným deformacím a navíc bude možné použití magnetických upínačů při broušení. Aby byla usnadněna montáž vedení, byla zvolena konfigurace tří vozíčků. Kdy se nejprve přimontuje strana vedení se dvěma

vozíčky a následně se připojí druhá strana s jedním vozíčkem. Jeden vozíček na protistraně bude lépe reagovat na případné rozměrové nepřesnosti z výroby. Vzhledem ke zvoleným rozměrovým a geometrickým tolerancím pro vyráběné součásti (viz přiložená výkresová dokumentace) je zaručená smontovatelnost dané sestavy. V případě problémů při montáži by případně stačilo sbrousit distanční desky a tím snížit jejich tloušťku.



Obr. 28 Finální návrh vedení v nové laserové hlavě

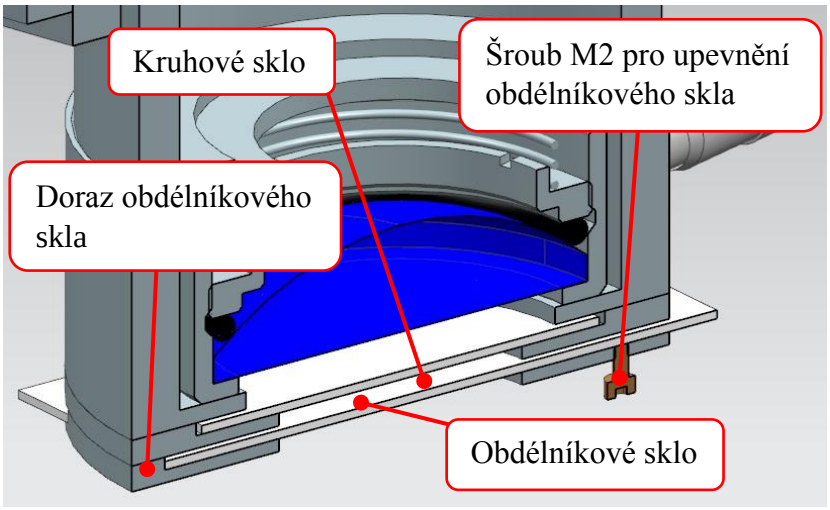
Princip nastavení polohy tubusu v ose z stroje probíhá za pomoci mikrometrické hlavice, která tlačí na doraz tubusu a tím mění jeho polohu v tělese hlavy. Z druhé strany tlačí na doraz pružina, která brání tubusu v samovolném pohybu (Obr. 29). Tento způsob polohování je zachován z původní laserové hlavy a neprošel žádnými změnami.



Obr. 29 Princip polohování tubusu

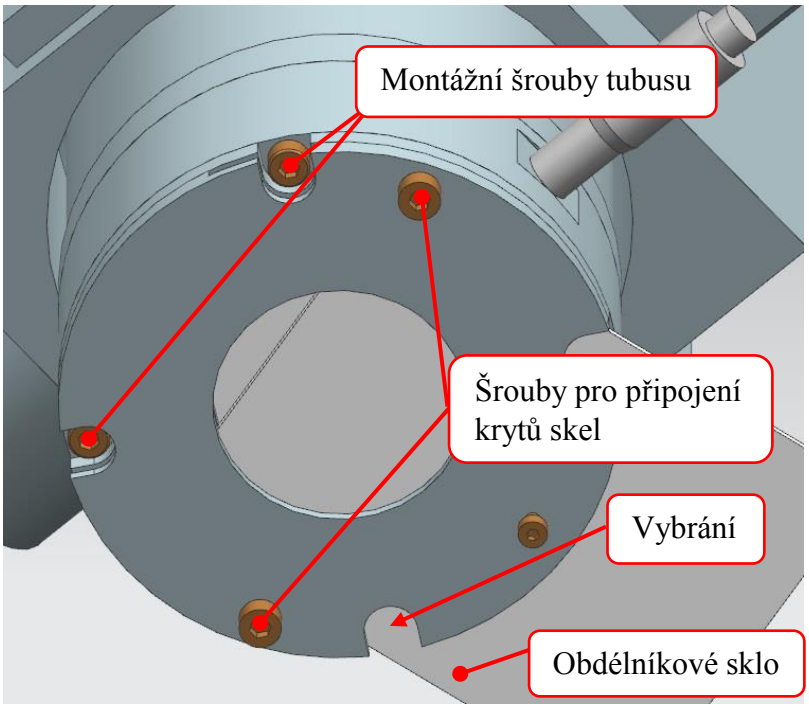
5.3 Způsob uchycení ochranných skel

Součástí zadání bylo také použití stejných ochranných skel, která jsou využívána v původní laserové hlavě, neboť jich je k dispozici veliké množství. Jedná se o dvě ochranná skla (Obr. 30). První sklo je kruhové a má za úkol chránit přímo samotnou čočku proti nečistotám či mechanickému poškození. Toto sklo není nutné často měnit, neboť je chráněno druhým sklem, které je obdélníkové. Kruhové sklo je uloženo v zahloubení v kruhovém členu, který se připojí na spodek tubusu. K tomuto členu je zespoda připojen další kruhový člen, ve kterém je vyfrézována obdélníková drážka, do které se zasune druhé sklo. Oba členy mají ve středu otvor kvůli průchodu laserového svazku a jsou společně připojeny k tubusu pomocí dvou šroubů. Na rozdíl od kruhového skla lze obdélníkové sklo kdykoliv jednoduše vyměnit pouhým vysunutím a zasunutím nového bez jakékoli potřebné demontáže. Toto sklo bývá často zašpiněno spalinami vzniklými při navařování, či na něm přímo ulpívají kapičky roztaveného kovu. Z těchto důvodů dochází k jeho časté výměně.



Obr. 30 Připojení ochranných skel k polohovadlu

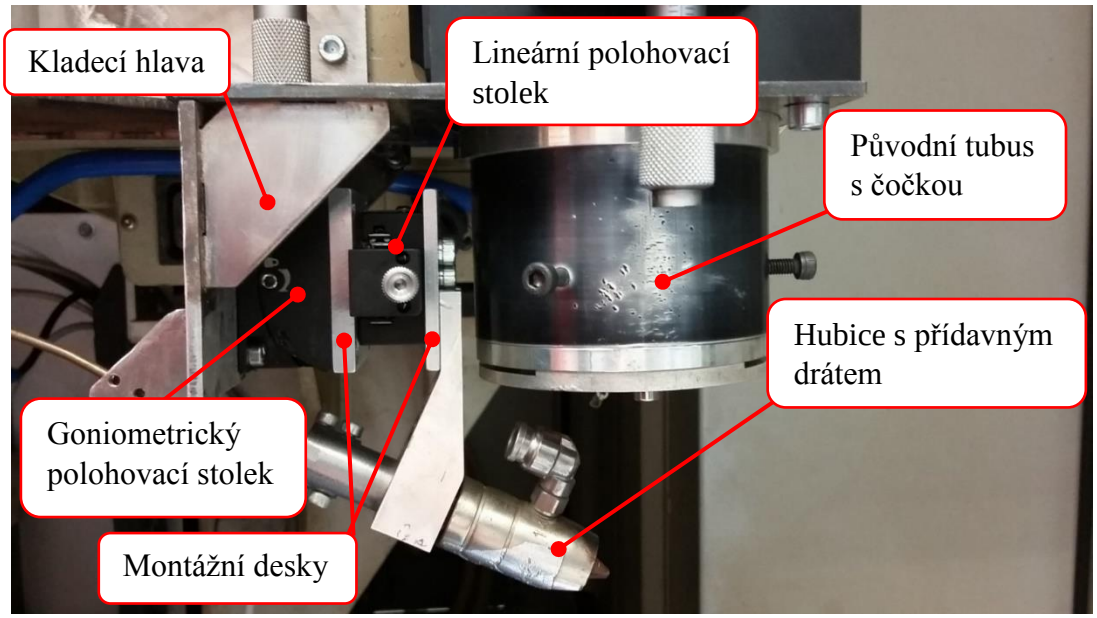
Tento princip uložení skel byl zachován s pár změnami. První změna se týká drážky pro obdélníkové sklo, která není celá průchozí, jako tomu bylo v původním řešení. Sklo se dá tedy dorazit na její konec. Na druhém konci drážky je pak zespoda vyříznut závit pro šroub se závitem M2, kterým se sklo pevně uchytí (Obr. 30). Tuto úpravu si vyžádaly časté problémy s praskáním skla, kdy vlivem rozstřiku roztaveného materiálu při navařování mělo sklo tendenci prasknout a střepy se pak rozlétly všude po pracovním prostoru stroje. Toto opatření by v případě prasknutí skla mělo případnému odletu střepů zabránit. Do obou členů jsou po obvodu vyfrézována vybrání, aby bylo možné povolit či utáhnout šrouby připojující polohovadlo k tubusu. Díky tomu se kryty skel stanou součástí polohovadla a polohovadlo bude možné odmontovat z tubusu bez demontáže krytů skel. V takovém případě bude muset být vysunuto obdélníkové sklo, které svými rozměry zakrývá montážní šrouby polohovadla. Kryty jsou k polohovadlu připojeny pomocí dvou šroubů, které se zašroubují do děr se závitem ve stěně polohovadla.



Obr. 31 Pohled na spodek polohovadla - obdélníkové sklo je úmyslně vysunuto pro zobrazení šroubů

5.4 Návrh úpravy kladecí hlavy

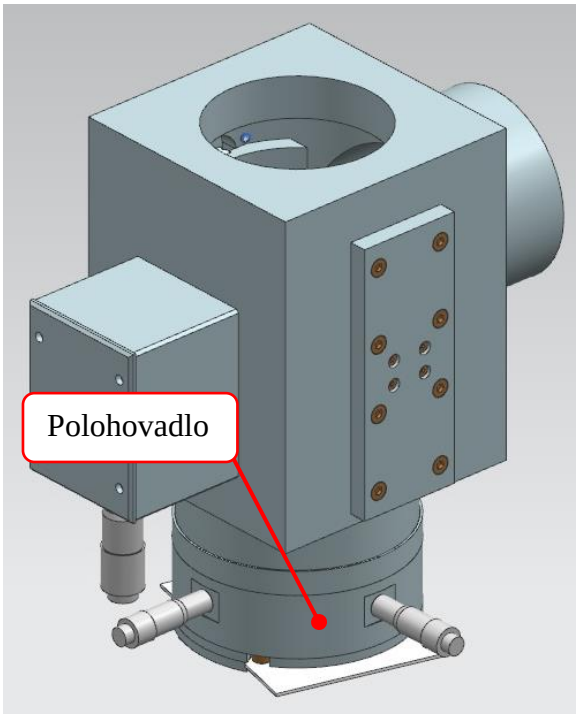
Kladecí hlava navržená Janem Peškem funguje v rámci možností spolehlivě. Úpravy se tedy týkaly pouze rozbitého polohovacího stolku, nesoucího hubici s drátem. Navrženy byly celkem dvě nové konfigurace polohovacích stolků: dvojice lineárních a lineární s goniometrickým. Po diskuzi možností jednotlivých konfigurací bylo rozhodnuto, že se z původní konfigurace zachová jeden goniometrický stolek, který slouží k nastavení úhlu sklopení drátu vůči vodorovné rovině a na něj se připojí stolek lineární, který bude sloužit k polohování drátu v ose *y* stroje (Obr. 32). V této konfiguraci nabízí lineární stolek oproti původnímu goniometrickému výhodu v tom, že při úpravě polohy drátu bude směr podávání drátu vždy rovnoběžný se směrem navařování, což bude působit příznivě na kvalitu návaru. Vzhledem k tomu, že byl k dispozici lineární stolek od jiného výrobce, než je stolek goniometrický, byly jeho připojovací rozměry jiné a musely se navrhnout a vyrobit dvě hliníkové montážní desky, které umožnily montáž lineárního stolku na goniometrický a montáž hubice s drátem na lineární stolek. Tato úprava byla již zrealizována a její funkčnost ověřena.



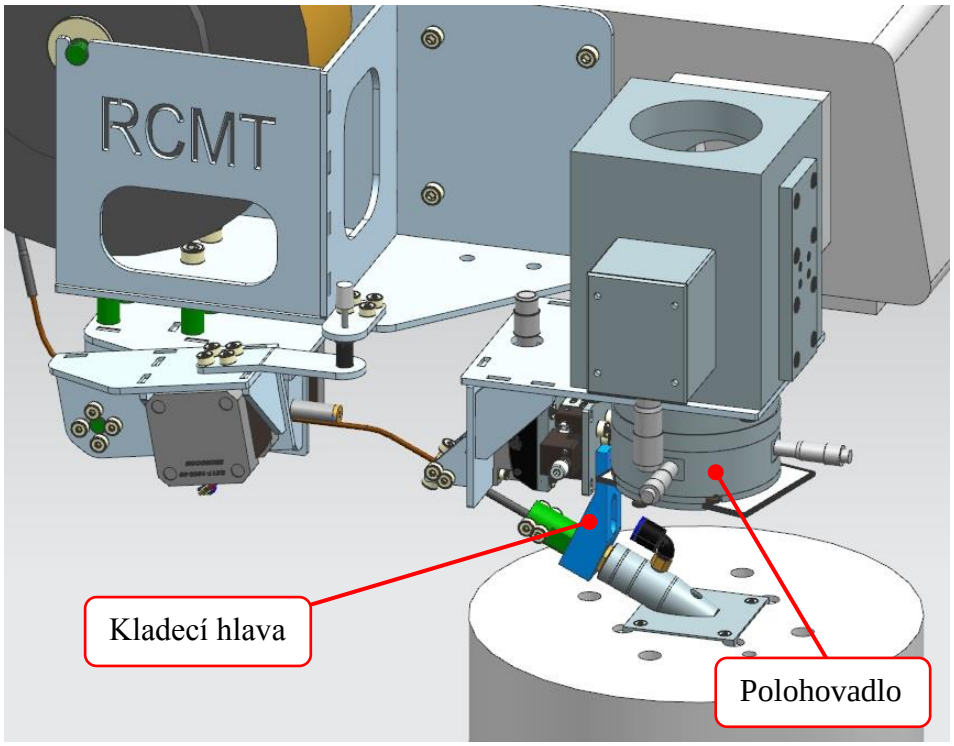
Obr. 32 Kladecí hlava s vyměněným polohovacím stolkem

5.5 Finální návrh upravené laserové navařovací hlavy

Všechny návrhy úprav byly zpracovány do modelu upravené laserové navařovací hlavy a následně vloženy do modelu pracovního prostoru zařízení Lumonics JK701H v programu Siemens NX 10. Ke všem nově vyráběným či upraveným dílům byla vytvořena potřebná výkresová dokumentace.



Obr. 33 Model upravené laserové navařovací hlavy



Obr. 34 Model pracovního prostoru zařízení Lumonics JK701H

6 Závěr

Na začátku práce byla provedena rešerše laserových technologií vhodných pro zařízení Lumonics JK701H. Zařízení je pro tyto technologie ve VCSVTT aktivně využíváno. Rešerše tedy byla podpořena výsledky experimentů a výzkumnými zprávami z centra.

Kladecí hlava byla uvedena do provozu, byla ověřena její funkčnost a zhotoveno několik zkušebních návarů. Následně byla provedena revize původní laserové hlavy s kladecí hlavou a zaznamenány jejich nedostatky. Původní uložení laserové hlavy nedosahovalo požadované tuhosti a při polohování tubusu docházelo k jeho zadrhávání. Tím vznikly nežádoucí vůle, kvůli kterým došlo k vyosení tubusu a nesprávné fokusaci laserového paprsku čočkou uloženou v tubusu. Na základě těchto nedostatků byly vytvořeny předběžné návrhy úprav laserové navařovací hlavy. Návrhy se týkaly nahrazení původního vedení za vedení lineární a vytvoření polohovadla pro možnost polohování čočky. Následně byla ověřena vhodnost těchto návrhů a došlo k jejich detailnímu zpracování. Finální návrh obsahuje upravenou laserovou navařovací hlavu s tubusem uloženým v tělesu hlavy pomocí lineárního vedení. Lineárním vedením bude zajištěna vyšší tuhost uložení tubusu v laserové hlavě a plynulý pohyb tubusu při jeho polohování. Ve finálním návrhu bylo k tubusu připojeno polohovadlo s čočkou, které je sestaveno jako samostatný celek (Obr. 33). Polohovadlo bylo navrženo tak, aby jeho montáž k tubusu byla snadná a rychlá. Tím bude usnadněna výměna čoček pro použití zařízení pro jinou laserovou technologii. Polohovadlo bude sloužit k přesnějšímu doladění polohy čočky v tubusu laserové hlavy a tím pomůže k lepší fokusaci laserového paprsku. Polohování je navrženo pomocí dvojice mikrometrických hlavic a dvojice tlačných pružin. Při navrhování pružin byl sestaven návrhový výpočet, aby mohla být zajištěna správná funkce polohovadla. Z výpočtu byla získána potřebná přítlačná síla pružin a následně byly vybrány vhodné pružiny. Navržena byla i menší úprava kladecí hlavy, kdy došlo k návrhu výměny goniometrického polohovacího stolku za lineární, který by zajistil přesnější nastavení polohy podávaného drátu vůči ohnisku laserového paprsku. Tato úprava byla následně provedena a lineární stolek byl implementován do kladecí hlavy. Za pomoci lineárního stolku byl zajištěn přesnější přívod drátu do ohniska laserového paprsku a zároveň bylo dosaženo rovnoběžnosti směru pohybu podávaného drátu a směru navařování. To mělo příznivý vliv na kvalitu návarů.

7 Seznamy

7.1 Seznam obrázků

Obr. 1 Zařízení Lumonics JK701H 12
Obr. 2 Řezání laserem [6] 13
Obr. 3 Princip řezání laserem [5] 14
Obr. 4 Součást svařená za pomoci laseru [11] 15
Obr. 5 Princip laserového svařování - vlevo metoda vedení, vpravo metoda klíčové dírky [8] 16
Obr. 6 Laserové kalení zubů ozubeného kola [19] 17
Obr. 7 Schéma navařování prášku [26] 19
Obr. 8 Směr podávání drátu [27] 20
Obr. 9 Laserová hlava s koaxiálním podáváním drátu [29] 20
Obr. 10 Princip rozvrstvení modelu pro AM [32] 21
Obr. 11 Výroba součásti pomocí SLS [33] 22
Obr. 12 Pracovní prostor zařízení Lumonics JK701H 25
Obr. 13 Skica návrhu způsobu polohování 28
Obr. 14 Polohovadlo součástí tubusu 29
Obr. 15 Polohovadlo jako samostatný celek přiojený k tubusu 29
Obr. 16 Specifikace vozíčku CPC MR7MN [36] 30
Obr. 17 Středění polohovadla s tubusem 32
Obr. 18 Spojení pouzdra polohovadla s víkem 33
Obr. 19 Uložení mikrometrické hlavice v polohovadle 34
Obr. 20 Upevnění čočky v pouzdře 35
Obr. 21 Zjednodušené schéma - síly působící na pouzdro čočky 36
Obr. 22 Schéma působení sil včetně druhé pružiny 38
Obr. 23 Polohovadlo osazeno pružinami 40
Obr. 24 Způsob uchycení polohovadla k tubusu 40
Obr. 25 Polohy montážních šroubů 41
Obr. 26 Upevnění kolejnic k tubusu 41
Obr. 27 Uložení vozíčků v tělese hlavy 42
Obr. 28 Finální návrh vedení v nové laserové hlavě 43
Obr. 29 Princip polohování tubusu 44
Obr. 30 Připojení ochranných skel k polohovadlu 45
Obr. 31 Pohled na spodek polohovadla - obdélníkové sklo je úmyslně vysunuto pro zobrazení šroubů 46
Obr. 32 Kladecí hlava s vyměněným polohovacím stolkem 47
Obr. 33 Model upravené laserové navařovací hlavy 47
Obr. 34 Model sestavy pracovního prostoru zařízení Lumonics JK701H 48

7.2 Seznam příloh

7.2.1 Seznam použitého softwaru

- Siemens NX 10
- Microsoft Word 2013
- Microsoft PowerPoint 2013
- GIMP 2
- Adobe Acrobat Reader

7.2.2 Seznam výkresů

Sestava – Laserová navařovací hlava – 20-17-0208-00

Těleso hlavy – 20-17-0208-01

Tubus laserové hlavy – 20-17-0208-02

Pouzdro polohovadla – 20-17-0208-03

Víko polohovadla – 20-17-0208-04

Pouzdro čočky – 20-17-0208-05

Dutý šroub – 20-17-0208-06

Kryt kruhového skla – 20-17-0208-07

Kryt obdélníkového skla – 20-17-0208-08

Distanční deska malá – 20-17-0208-09

Distanční deska velká – 20-17-0208-10

Montážní deska 1 – 20-17-0208-11

Montážní deska 2 – 20-17-0208-12

Kusovník – 20-17-0208-K

7.3 Seznam literatury

[1] KOIKE, R., a další. Graphical Evaluation Method for Void Distribution in Direct Energy Deposition. *Procedia Manufacturing.* 2016, stránky 105-112.

[2] Kuznetsov, A., a další. Annular Laser Beam Cladding Process Feasibility Study. *Physics Procedia.* 2016, stránky 647-656.

[3] Cutting stainless steel at record thickness. [Online] 2013. [Citace: 11. 12. 2016] http://www.us.trumpf.com/en/metanavigation/news-archive/cutting-stainless-steel-at-record-thickness/rec-uid/266055.html.

[4] AMBROŽ, Petr. *Přesnost řezání materiálů laserem GSI Lumonics JK701H.* Praha : ČVUT v Praze, 2010.

[5] KOŘÁN, Pavel. SERIÁL NA TÉMA LASERY - LASEROVÉ ŘEZÁNÍ (LASER CUTTING). [Online] 19. 2. 2013 [Citace: 12. 12. 2016] http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129.

[6] Maximum Industries inc. [Online] [Citace: 17. 12. 2016] http://www.maximumind.com/laser-cutting-maximum-industries.html.

[7] LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi.* Olomouc : Univerzita Palackého v Olomouci.

[8] KOŘÁN, Pavel. SERIÁL NA TÉMA LASERY - LASEROVÉ SVAŘOVÁNÍ I (LASER WELDING). [Online] 18. 2. 2013 [Citace: 2016. 12. 12] http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-i-laser-welding-134.

[9] BRAJER, Jan. *Svařování laserem.* Praha : Výzkumné centrum pro strojírenskou výrobní techniku a technologii.

[10] KUBÍČEK, Jaroslav a Mrňa, L. *Technické aspekty svařování laserem.* Brno : VUT FSI Brno, 2008.

[11] Laserové svařování. *Lasertherm.* [Online] [Citace: 18. 12. 2016] http://www.lasertherm.cz/sluzby/laserove-svarovani/.

[12] AMBROŽ, Petr. *Svařování obtížně svařitelných materiálů pevnolátkovým Nd:YAG laserem.* Praha : ČVUT v Praze, 2009.

[13] Laserové kalení. *Lasertherm.* [Online] [Citace: 23. 12. 2016] http://www.lasertherm.cz/sluzby/laserove-kaleni/.

[14] Laserové kalení. *MATEX PM.* [Online] [Citace: 20. 12. 2016] http://www.matexpm.com/cz/laserove-kaleni.

[15] Laserové kalení. *VÚTS Liberec.* [Online] [Citace: 19. 12. 2016.] http://www.vuts.cz/laserove-kaleni-1.html.

[16] Laserové kalení. *Trumpf.* [Online] [Citace: 18. 12. 2016] http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/obrabeni-povrchu/laserove-kaleni.html.

[17] Kalení laserem. *MM Spektrum.* [Online] [Citace: 20. 12. 2016] http://www.mmspektrum.com/clanek/kaleni-laserem-urychluje-vyrobu-soucasti-a-nastroju.html.

[18] Laserové kalení. *Lascam.* [Online] [Citace: 19. 12. 2016] http://www.lascam.cz/laserove-kaleni/.

[19] Laserové kalení. *Lao - průmyslové systémy.* [Online] [Citace: 19. 12. 2016] http://www.lao.cz/aplikace-79/povrchove-upravy-93/laserove-kaleni-94.

[20] PEŠEK, Jan. *Konstrukce zkušebního zažízení pro laserové navařování oceli.* Praha : ČVUT v Praze, 2014.

[21] NOWOTNY, Steffen. *Laser-Präzisionsauftragschweißen mit zentrischer Werkstoffzufuhr.* Dresden : IWS Fraunhofer, 2009.

[22] Laserové navařování. *Lasertherm.* [Online] [Citace: 13. 11. 2016] http://www.lasertherm.cz/sluzby/laserove-navarovani/.

[23] AMBROŽ, Petr a Švábek, R. *Navařování práškových otěruvzdorných materiálů laserem.* Praha : ČVUT v Praze, 2010.

[24] VONDROUŠ, Petr, Švábek, R. a Ambrož, P. *Nanášení otěruvzdorných ochranných povlaků.* Praha : ČVUT v Praze, 2008.

[25] SYED, W. U. H, Li, Lin a Pinkerton, A. J. *A comparative study of wire feeding and powder feeding.* místo neznámé : Applied Surface Science, 2005.

[26] 3D printing. *Tecnica.* [Online] [Citace: 23. 11. 2016] http://tecnica.com/tag/3d-printing/.

[27] SYED, W. U. H. a Li, Lin. *Effects of wire feeding direction and location in multiple layer diode laser direct.* místo neznámé : Applied Surface Science, 2005.

[28] Coaxial laser wire cladding head COAXwire. [Online] [Citace: 8. 11 2016.] http://www.iws.fraunhofer.de/en/business_fields/surface_treatment/laser_cladding/system_technology/COAXwire.html.

[29] Cladding, repair and additive manufacturing: direct metal deposition by means of laser wire cladding. [Online] [Citace: 8. 11 2016.] http://www.iws.fraunhofer.de/en/pressandmedia/press_releases/2014/press_release_2014-13.html.

[30] TORIMS, Toms. *The application of laser cladding to mechanical component repair, renovation and regeneration.* místo neznámé : DAAAM International Scientific Book, 2013.

[31] VONDROUŠ, Petr, Kraus, L. a Hálek, J. *Nanášení ochranných povlaků. Renovace opotřebených zápustek a forem laserem.* Praha : ČVUT v Praze, 2007.

[32] SIGLER, Dean. Additive Manufacturing for Electric Motors. [Online] 11. 1. 2013. [Citace: 14. 11. 2016] http://sustainableskies.org/additive-manufacturing-for-electric-motors/.

[33] SLS - «Selective Laser Sintering». [Online] [Citace: 20. 11. 2016] http://web.fhnw.ch/technik/projekte/eit/Fruehling2013/CantBurg/.

[34] PALERMO, Elizabeth. What is Selective Laser Sintering. [Online] [Citace: 15. 11. 2016] http://www.livescience.com/38862-selective-laser-sintering.html.

[35] Laser Metal Deposition (LMD). *Trumpf.* [Online] [Citace: 15. 11. 2016] http://www.trumpf-laser.com/en/solutions/applications/additive-manufacturing/laser-metal-deposition.html.

[36] *Anaheim Automation.* [Online] [Citace: 12. 2. 2017] http://www.anaheimautomation.com/manuals/linearguide/L010592%20-%20CPC_MR_Specs.pdf.

[37] DRASTÍK, František. *Strojnické tabulky pro konstrukci i dílnu. 2. dopl. vyd.* O strava : Montanex, 1999. ISBN 80-857-8095-X.

[38] SOUČINITEL TŘENÍ. *E-konstruktér.* [Online] [Citace: 28. 3. 2017] http://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/soucinitel-treni.

[39] Coefficients Of Friction. *Roymech.* [Online] [Citace: 28. 3. 2017] http://www.roymech.co.uk/Useful_Tables/Tribology/co_of_frict.htm.