

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Juránová** Jméno: **Kateřina** Osobní číslo: **437217**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Přístrojová a řídicí technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh technického řešení a konstrukce opto-mechanického zařízení AbloCAM

Název diplomové práce anglicky:

Design of technical solution and construction of the AbloCAM opto-mechanical device

Pokyny pro vypracování:

- 1) Rešerše možností prostorové manipulace terče ve vysokém a ultra-vysokém vakuu
- 2) Rešerše metod ablačních a desorpčních otisků pro charakterizaci fokusovaných svazků rentgenových laserů, technik ozařování (expozičních protokolů) a technik kalibrace polohovacího systému
- 3) Analýza stupňů volnosti polohovacího systému, minimálních technických specifikací lineárních/otočných motorů a rozsahu pracovních pohybů nutných pro požadované funkce zařízení AbloCAM
- 4) Testování optických vlastností modulárního mikroskopu NAVITAR v různých konfiguracích (různá zvětšení, režim diferenciálního interferenčního kontrastu, vliv okénka z taveného křemene)
- 5) Návrh technického řešení a konstrukce zařízení AbloCAM

Seznam doporučené literatury:

- J. Chalupský et al., "Characteristics of focused soft X-ray free-electron laser beam determined by ablation of organic molecular solids," Opt. Express 15, 6036 (2007).
J. Chalupský et al., "Spot size characterization of focused non-Gaussian X-ray laser beams," Opt. Express 18, 27836 (2010).
N. Gerasimova et al., "In situ focus characterization by ablation technique to enable optics alignment at an XUV FEL source," Rev. Sci. Instrum. 84, 065104 (2013).

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Jan Hošek, Ph.D., odbor přesné mechaniky FS

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

Mgr. Jaromír Chalupský, Ph.D., Fyzikální ústav AV ČR, v.v.i.

Datum zadání diplomové práce: **30.10.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **17.01.2020**

Platnost zadání diplomové práce: _____


doc. Ing. Jan Hošek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Diplomová práce

Návrh technického řešení a konstrukce opto-mechanického zařízení AbloCAM

Bc. Kateřina Juráňová



2020

Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Hošek, Ph.D.
Konzultant: Mgr. Jaromír Chalupský, Ph.D.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní, Ústav přístrojové a řídicí techniky

Poděkování

Ráda bych tímto poděkovala své rodině za podporu během celého mého studia. Děkuji svému vedoucímu práce, doc. Ing. Janu Hoškovi, Ph.D., za rady při vypracování této práce. Dále děkuji mým spolupracovníkům za získané poznatky, které jsem uplatnila při tvorbě této práce. Mé poslední a největší díky patří mému příteli za jeho veškerou podporu a lásku.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou práci vypracovala samostatně, a že jsem uvedla veškerou použitou literaturu. Souhlasím také s případnou publikací výsledků mé diplomové práce nebo její podstatné části, pokud budu uvedena jako její spoluautorka.

V Praze dne 24.1.2020

.....

Abstrakt

V této diplomové práci navrhuji konstrukci optomechanického zařízení AbloCAM, které je určeno pro použití ve vakuu, a testuji vlastnosti několika konfigurací mikroskopu od firmy Navitar. Práce nejprve přináší úvod do problematiky a její možné řešení. V další části práce se zabývám rešerší používaných metod ablačních a desorpčních otisků pro charakterizaci svazků rentgenových laserů a technik ozařování. Následuje kapitola analýzy pracovních pohybů, ze kterých vychází konstrukce optomechanického zařízení. Pro tyto pohyby jsem uvedla několik pohybových stolků, které se dají používat jak ve vakuu, tak mimo něj. V další kapitole testuji dvanáct konfigurací mikroskopu od firmy Navitar a jejich výsledky následně porovnávám. V poslední části práce navrhuji konstrukci optomechanického zařízení, které se bude používat ve vysokém až ultravysokém vakuu. Návrh konstrukce se skládá z manipulátoru z dostupných pohybových stolků, následuje jeho upevnění k držáku a celkové spojení s víkem vakuové komory. Součástí této kapitoly je i návrh uchycení mikroskopu k víku komory. Práce je zakončena zhodnocením výsledků.

Klíčová slova

F-sken, z-sken, $f(z)$ -sken, konstrukce do vakua, AbloCAM, manipulátor, pohybové stolky, Navitar mikroskop

Abstrakt

In this diploma thesis I present the design of the AbloCAM optomechanical device, which is intended to operate under vacuum, and I evaluate attributes of several configurations of a Navitar microscope. At first, the thesis defines the problem and its possible solution. In the next part of the thesis, I review the state-of-the-art ablation and desorption imprinting and its use in X-ray laser beam characterization and exposure techniques. This is followed by a chapter analyzing the kinds of operational motion which the optomechanical device construction is based on. I describe several motion stages capable of executing these kinds of motion under both the ambient air pressure and vacuum conditions. In the next chapter, I test twelve configurations of the Navitar microscope and I evaluate the test results. In the last part of my thesis, I design the construction of the optomechanical device intended to operate under high and ultra-high vacuum. The design consists of a manipulator based on commercially available motion stages, fastening of the manipulator to a mount and an attachment of these to a vacuum chamber. This chapter contains also the design of an attachment of the microscope to the chamber flange. The thesis is concluded by results evaluation.

Keywords

F-scan, z-scan, f(z)-scan, vacuum-compatible construction, AbloCAM, manipulator, motion stages, Navitar microscope

Obsah

1 Úvod	1
2 Metody charakterizace laserového svazku	3
2.1 Metoda f-sken	3
2.2 Metoda z-sken	6
2.2.1 Stigmatický gaussovský svazek	6
2.2.2 Jednoduchý astigmatický gaussovský svazek	6
2.3 Metoda f(z)-sken	8
2.4 Techniky ozařování terčů RTG svazkem	8
3 Analýza pracovních pohybů a dostupných pohybových systémů	11
3.1 Pracovní pohyby manipulátoru	11
3.2 Pohybové systémy do vakua	13
4 Navítar mikroskop	19
4.1 Základní konfigurace	21
4.1.1 Konfigurace 1	21
4.1.2 Konfigurace 2	23
4.1.3 Konfigurace 3	24
4.1.4 Konfigurace 4	25
4.1.5 Konfigurace 5	26
4.1.6 Konfigurace 6	26
4.1.7 Výsledné zhodocení konfigurací 1 až 6	27
4.1.8 Vliv vloženého sklíčka na zobrazení standardních konfigurací	27
4.2 DIC konfigurace	29
4.2.1 Konfigurace 7	30
4.2.2 Konfigurace 8	31
4.2.3 Konfigurace 9	32
4.2.4 Konfigurace 10	33
4.2.5 Konfigurace 11	34
4.2.6 Konfigurace 12	35
4.2.7 Zhodnocení konfigurací 7 až 12	35
4.2.8 Vliv vloženého sklíčka na zobrazení DIC konfigurací	36
5 Návrh konstrukce manipulátoru	39
5.1 Manipulátor vzorků	39
5.2 Uchycení manipulátoru	45
5.3 Uchycení držáku manipulátoru a mikroskopu k vakuové komoře	51
6 Závěr	57
Literatura	59
Přílohy	
A Zdrojový kód pro vyhodnocení rozlišení mikroskopu	61

Zkratky

PMMA	poly(methylmethakrylát)
FLASH	Free-electron laser in Hamburg
EUV	extrémní ultrafialové záření
AFM	mikroskopie atomárních sil (atomic force microscopy)
RTG	rentgenové záření
CCD	Charge-coupled device
HV	vysoké vakuum
UHV	ultra-vysoké vakuum
XHV	extrémně-vysoké vakuum
ICO	objektivy zaměřené do nekonečna (Infinity Corrected Objectives)
A	numerická apertura [-]
WD	pracovní vzdálenost [m]
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
USB	univerzální sériová sběrnice (universal serial bus)
FIJI	Fiji Is Just ImageJ
DIC	diferenciální interferenční kontrast
RA	Pravoúhlý (right angle)
ASCII	americký standardní kód pro výměnu informací (American Standard Code for Information Interchange)
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
$A_{eff}(z)$	efektivní plocha svazku závislá na souřadnici z [m ²]
E_{puls}	energie v impulsu [J]
$F_0(z)$	špičková (maximální) fluence v místě z [J · m ⁻²]
$F(x, y)$	prostorové rozložení fluence [J · m ⁻²]
$f(x, y)$	příčné rozložení fluence [J · m ⁻²]
f_{th}	prahová fluence [J · m ⁻²]
$d(x, y)$	hloubkový profil [m]
l_{at}	atenuační délka záření v materiálu [m]
p	normovací faktor profilu [-]
d_{max}	maximální hloubka kráteru [m]
S	plocha [m ²]
S_{MAX}	plocha podstavy ablaového kráteru v PMMA [m ²]
e	Eulerovo číslo
S_{foc}	plocha pásu svazku na úrovni 1/e maxima (fokální plocha) [m ²]
z_c	poloha pásu gaussovského svazku [m]
z_0	Rayleighova vzdálenost [m]
ρ_0	poloměr pásu gaussovského svazku [m]
r_i	poloměr eliptického imprintu ve směru hlavní osy i [m]
Δf	astigmatický rozdíl (vzdálenost sagitálního a tangenciálního ohniska) [m]
π	Ludolfovo číslo
θ	úhel dopadu měřený od povrchu [°]
β_{ob}	příčné zvětšení objektivu [-]
Γ_{ok}	zvětšení okuláru [-]
a	rozlišovací schopnost [m]
λ	vlnová délka [m]
H	hloubka ostrosti [m]
d_{min}	rozlišitelná vzdálenost [m]

α	polovina vstupního úhlu objektivu [°]
$\vartheta(x)$	průhyb v místě x [m]
$M_O(x)$	ohybový moment v místě x [Nm]
E	Youngův modul pružnosti [Pa]
J	kvadratický modul průřezu [m ⁴]
$\varphi(x)$	úhel natočení v místě x [°]
b	strana obdélníkového průřezu [m]
t	strana obdélníkového průřezu [m]
h	výška [m]
G_{v1}	tíhová síla těžiště těles [N]
$x_{T_{v1}}$	vzdálenost tíhové síly těžiště těles od L profilu [m]
x_T, y_T	souřadnice polohy těžiště [m]
x_i, y_i	souřadnice polohy těžiště i -tého dílu [m]
G_v	výsledná tíhová síla [N]
G_i	tíhová síla i -tého dílu [N]
m	hmotnost [kg]
ρ	hustota [kg · m ⁻³]
V	objem [mm ³]
F	síla [N]
l	délka [m]
t	tloušťka [m]
d	průměr [m]
$F_{v,Rd}$	únosnost ve stříhu [N]
n	počet šroubů
f_{ub}	mez pevnosti šroubu [Pa]
A_s	plocha jádra šroubu [m]
γ_{M2}	součinitel materiálu [-]
g	tíhové zrychlení [m · s ⁻²]
F_0	osová síla šroubu [N]
M_u	utahovací moment šroubu [Nm]
φ	úhel stoupání závitu [°]
γ'	třecí úhel [°]

Seznam obrázků

1	Negaussovský svazek zařízení FLASH (Free-electron laser in Hamburg) na vlnové délce 13,5 nm rekonstruovaný z netepelného ablačního otisku v PMMA, převzato z [3].	4
2	Normovaná hladina fluence f v závislosti na příslušné kontuře S z rekonstruovaného profilu svazku na 1, převzato od J. Chalupského [1].	5
3	Závislost plochy povrchové ablační kontury S na pozici z pro různé úrovně p , převzato od J. Chalupského [1].	7
4	Matice ablačních imprintů $f(z)$ -skenu na povrchu $PbWO_4$, převzato od J. Chalupského [1].	8
5	Souřadný systém terče.	10
6	Mapa výstřelů v PMMA, nalevo je metoda $f(z)$ -sken, uprostřed je metoda f -sken.	10
7	Schéma pracovních pohybů znázorněných v souřadném systému terče.	12
8	HLSM série lieárního pohybu firmy UHV Design s jedním vlnovcem [6].	15
9	HLSM série lieárního pohybu firmy UHV Design se dvěma spojenými vlnovci [6].	16
10	Série SLL12 lieárního stolku firmy SmarAct [8].	16
11	Série SLLV42 lieárního stolku firmy SmarAct [8].	17
12	Série SLC-17 lieárního stolku firmy SmarAct [8].	17
13	Standardně nabízený H-811.I2/I2V 6-Axis Miniature Hexapod od firmy PI USA [9].	17
14	P-911KNMV UHV-Compatible Miniature Piezo Hexapod vyrobený na zakázku firmou PI USA [9].	18
15	Rotační stolek s ultrazvukovým piezomotorem U-651 firmy PI USA [9].	18
16	Rotační stolek RS-40 firmy PI USA [9].	18
17	Schéma Základní konfigurace mikroskopu.	22
18	Graf porovnání rozlišovací schopnosti konfigurace 1 pro dvě celková zvětšení.	23
19	Graf porovnání rozlišovací schopnosti konfigurace 2 pro dvě celková zvětšení.	24
20	Graf porovnání rozlišovací schopnosti konfigurace 3 pro dvě celková zvětšení.	25
21	Graf porovnání rozlišovací schopnosti konfigurace 4 pro dvě celková zvětšení.	26
22	Graf porovnání rozlišovací schopnosti konfigurace 5 pro dvě celková zvětšení.	27
23	Graf porovnání rozlišovací schopnosti konfigurace 6 pro dvě celková zvětšení.	28
24	Graf hodnot šedi snímku vytvořeného s použitím a bez použití klíčka umístěného v prostoru objektivu se zvětšením $10\times$	28

25	Graf hodnot šedi snímku vytvořeného s použitím a bez použití sklíčka umístěného v prostoru objektivu se zvětšením $50\times$	29
26	Schéma DIC konfigurace mikroskopu.	30
27	Graf porovnání rozlišovací schopnosti konfigurace 7 pro dvě celková zvětšení.	31
28	Graf porovnání rozlišovací schopnosti konfigurace 8 pro dvě celková zvětšení.	32
29	Graf porovnání rozlišovací schopnosti konfigurace 9 pro dvě celková zvětšení.	33
30	Graf porovnání rozlišovací schopnosti konfigurace 10 pro dvě celková zvětšení.	34
31	Graf porovnání rozlišovací schopnosti konfigurace 11 pro dvě celková zvětšení.	35
32	Graf porovnání rozlišovací schopnosti konfigurace 5 pro dvě celková zvětšení.	36
33	Graf hodnot šedi snímku vytvořeného s použitím a bez použití sklíčka umístěného v prostoru objektivu se zvětšením $10\times$	37
34	Graf hodnot šedi snímku vytvořeného s použitím a bez použití sklíčka umístěného v prostoru objektivu se zvětšením $50\times$	37
35	Lineární pohybový stolek s ultrazvukovým piezomotorem XLS-1-80-1250. Nahoře je výkres stolku, dole je jeho skutečná podoba [10].	42
36	Lineární pohybový stolek s ultrazvukovým piezomotorem XLS-1-40-1250. Nalevo je výkres stolku, napravo je jeho skutečná podoba [10].	43
37	Rotační pohybový stolek s ultrazvukovým piezomotorem XRT-U-30-109. Nalevo je výkres stolku, napravo je jeho skutečná podoba [10].	43
38	Technický výkres navrhované desky spojující lineární stolek XLS-1-40-1250 a rotační stolek XRT-U-30-109.	45
39	Technický výkres navrhovaného L profilu.	46
40	Složený manipulátor s popisem dílů.	47
41	Výkres navrženého L profilu pro uchycení manipulátoru.	49
42	Výkres navržené tyče pro lineární posuv ve směru osy y a rotaci kolem této osy.	50
43	3D model navrženého držáku manipulátoru s popisem jeho dílů.	51
44	Řez spojením posuvně rotačního kuličkového pouzdra s víkem vakuové komory.	52
45	Výkres desky spojující posuvně rotační kuličkové pouzdro s víkem vakuové komory.	52
46	Výkres svěrného srážku spojujícího mikroskop se stojanem.	54
47	Výkres desky spojující držák mikroskopu se svěrnými držáky.	54
48	Výsledný konstrukční návrh uchycení manipulátoru a mikroskopu k výtku vakuové komory.	55

Seznam tabulek

1	Tabulka tlakových rozsahů vakua.	13
2	Tabulka porovnání parametrů lineárních systémů.	14
3	Tabulka porovnání parametrů hexapodů.	14
4	Tabulka porovnání parametrů rotačních soustav.	15
5	Parametry použitých objektivů [11].	19
6	Změřená hloubka ostrosti Konfigurace 1 mikroskopu pro 11 zvětšení. . .	21
7	Změřená hloubka ostrosti Konfigurace 2 mikroskopu pro 11 zvětšení. . .	23
8	Změřená hloubka ostrosti Konfigurace 3 mikroskopu pro 11 zvětšení. . .	24
9	Změřená hloubka ostrosti Konfigurace 4 mikroskopu pro 11 zvětšení. . .	25
10	Změřená hloubka ostrosti Konfigurace 5 mikroskopu pro 11 zvětšení. . .	26
11	Změřená hloubka ostrosti Konfigurace 6 mikroskopu pro 11 zvětšení. . .	27
12	Změřená hloubka ostrosti Konfigurace 7 mikroskopu pro 11 zvětšení. . .	31
13	Změřená hloubka ostrosti Konfigurace 8 mikroskopu pro 11 zvětšení. . .	32
14	Změřená hloubka ostrosti Konfigurace 9 mikroskopu pro 11 zvětšení. . .	32
15	Změřená hloubka ostrosti Konfigurace 10 mikroskopu pro 11 zvětšení. .	33
16	Změřená hloubka ostrosti Konfigurace 11 mikroskopu pro 11 zvětšení. .	34
17	Změřená hloubka ostrosti Konfigurace 12 mikroskopu pro 11 zvětšení. .	35
18	Tabulka parametrů lineárních stolků XLS-1-40-1250 a XLS-1-80-1250 [10].	40
19	Tabulka parametrů rotačního pohybového stolku XRT-U-30-109 [10]. . .	41
20	Parametry pro výpočet výsledného těžiště G_{v1} dílů držák vzorků, lineární stolec, spojovací deska a rotačního stolec.	44
21	Parametry pro výpočet výsledného těžiště G_{v2} dílů držák vzorků, lineární stolec, spojovací deska, rotačního stolec a L profil.	45

1 Úvod

Důležitou součástí jakéhokoli experimentu založeného na interakci hmoty s laserovým svazkem je prostorová charakterizace zaostřeného laserového svazku, protože jeho intenzitní a fázový profil výrazně rozhodují o výsledku. Nicméně charakterizace zaostřených laserových svazků přináší několik problémů v důsledku vysokých intenzit a (sub)mikrónovému rozměru stop. Řešením těchto problémů jsou metody ablačních a desorpčních otisků, které studují vlastnosti krátkovlnných svazků přímo v jejich ohnisku a to díky vyhodnocení poškození materiálu umístěného přímo do ohniska.

V současné době se tyto metody vyhodnocují ex-situ, proces vyhodnocení je velice časově náročný a vyžaduje kvalifikovaného pracovníka. To vedlo k zahájení projektu AbloCAM - zařízení provádějícímu vzorkování automaticky a in-situ. Toto zařízení se bude skládat z vakuové komory, která bude přírubou DN200CF připevněna k hlavní interakční komoře. Mezi těmito komorami bude pneumatický vakuový ventil. Touto konstrukcí nedojde k narušení vakua při vyjímání vzorků z hlavní interakční komory, u které je vytvoření dostatečně vysokého vakua časově náročné. O tento čas se pak prodlužuje délka experimentů nebo je čas na vlastní experiment kratší. Vakua se v komoře AbloCAMu dosáhne turbomolekulární vývěvou připevněnou na boční přírubu komory. Pro vyjmutí vzorků z vakuové komory bude její součástí otevíratelný port a napouštěcí ventil. Součástí komory budou také konektory pro zapojení elektricky ovládaných dílů. Dvnitř vakuové komory bude umístěn manipulátor vzorků, který projde skrz vakuový ventil a přírubu do hlavní interakční komory. Pro tento translační pohyb se použije Z-manipulátor s velkým rozsahem pohybu. Po skončení ozařování se manipulátor vrátí do původní polohy ve vakuové komoře a následuje vyhodnocení povrchu vzorků. To provede program využívající algoritmy umělé inteligence. Pro snímání povrchu vzorků se použije mikroskop od firmy Navitar, který bude umístěn ve svislé pozici nad víkem komory a vzorek bude pozorovat skrz průhledové okénko.

Cílem této práce je návrh konstrukce manipulátoru vzorků na základě stanovených požadavků a jeho připevnění k Z-manipulátoru, a také testování mikroskopu, který je možné složit do dvanácti konfigurací. Na začátku práce se seznámíme s metodami charakterizace laserových svazků, na základě kterých jsem provedla analýzu potřebných pracovních pohybů. Dále uvádím rešerši vakuově kompatibilních pohybových stolků. Další částí práce je testování a následné zhodnocení jednotlivých konfigurací mikroskopu. Nakonec jsem navrhla konstrukci manipulátoru, jeho uchycení a uchycení mikroskopu k víku vakuové komory.

2 Metody charakterizace laserového svazku

V současné době umíme u optických laserů téměř dokonale ovládat a kontrolovat jejich výstupní parametry, zatímco u rentgenových laserů tomu tak ještě není [1]. Horší kontrolovatelnost rentgenových laserových svazků je zapříčiněna celou řadou jevů, které ovlivňují homogenitu profilu intenzity a fáze. Jejich důsledkem se o rentgenových svazcích mluví jako o negaussovských, které zpravidla nemají analytické vyjádření. Rentgenové svazky jsou fokusované do mikrónových až sub-mikrónových stop, proto se pro charakterizaci jejich podélného a příčného profilu musí používat jiné metody, než se běžně používají u optických laserů. Tyto metody dělíme na přímé (testovací element umístěn v ohnisku laserového svazku a jeho blízkém okolí), polopřímé (testovací maska umístěna v ohnisku, detektor mimo) a nepřímé (testovací maska i detektor mimo fokus).

Metody ablačních otisků, pro které je konstrukce určena, patří mezi přímé přístupy. Nevýhoda ablačního poškození se stala pro metody ablačních a desorpčních otisků výhodou, jelikož umožňuje studovat vlastnosti krátkovlnných svazků přímo v ohnisku. V roce 2007 byla publikována metoda, která je založená na laserem indukovaném ablačním poškození PMMA (polymethylmethakrylát) [2]. S klesající vlnovou délkou však nebylo nadále možné tento postup používat a byl vyvinut postup jiný, nevyžadující znalost morfologie celého ablačního kráteru [3]. Pro tento postup charakterizace negaussovského profilu je postačující pouze informace o ablační kontuře otisku na povrchu terče v závislosti na měnící se energii impulsu. Jelikož se laserový svazek skenuje podél fluenční osy, nazývá se tato metoda fluenční sken neboli f-sken (popřípadě F-sken). Fluence (plošná hustota energie) je definována jako časový integrál intenzity. Fluenční osa je znázorněna na obrázku 1.

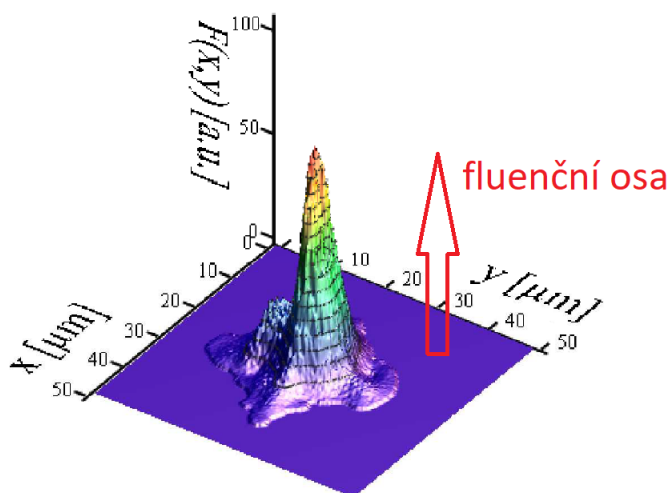
Profil fokusovaných rentgenových svazků můžeme zkoumat nejen ve směru příčném, ale i podélném. Pro tento účel byla vyvinuta metoda z-sken [4]. Kombinace obou zmíněných metod je nazývána metoda f(z)-sken [1].

2.1 Metoda f-sken

Jak již bylo zmíněno, rentgenové laserové svazky jsou často negaussovské. Studium profilu svazku má velký význam při provádění a vyhodnocování interakčních experimentů, jelikož negaussovský profil hustoty energie může negativně ovlivnit jejich výsledky [1]. Pro měření plochy negaussovských svazků se používá veličina efektivní plocha svazku, která dává do přímé souvislosti energii laserového impulsu a špičkovou fluenci. Výhodou efektivní plochy je, že ji lze aplikovat na jakýkoli svazek a že ji lze měřit pomocí ablačních imprintů. Vztah pro efektivní plochu svazku závislou na souřadnici z je [3]:

$$A_{eff}(z) = \frac{E_{puls}}{F_0(z)} = \iint_{R^2} f(x, y, z) dx dy, \quad (1)$$

kde $A_{eff}(z)$ je efektivní plocha svazku, E_{puls} je energie v impulsu, $F_0(z)$ je špičková (maximální) fluence v místě z a funkce $f(x, y, z)$ udává profil svazku v prostoru, kde souřadnice x, y představují rovinu kolmou na směr šíření svazku. Efektivní plocha může být chápána jako zobecnění bodové plochy svazku definované jako plocha v úrovni $1/e$



Obrázek 1 Negaussovský svazek zařízení FLASH (Free-electron laser in Hamburg) na vlnové délce 13,5 nm rekonstruovaný z netepelného ablačního otisku v PMMA, převzato z [3].

maximální fluence. V případě gaussovského svazku je tato hodnota právě rovna efektivní ploše.

První způsob měření efektivní plochy svazku pomocí ablačních imprintů vychází z metody rekonstrukce příčného profilu svazku extrémního ultrafialového záření (EUV) založené na měřeních ablačních otisků v PMMA pomocí mikroskopie atomárních sil (atomic force microscopy, AFM), odkud se získá nenormovaný příčný profil svazku $F(x, y)$ ve zvolené pozici z (viz. Obrázek 1) [3]. Závislost prostorového rozložení fluence $F(x, y)$ na tvaru ablačního otisku je:

$$F(x, y) = F_0 f(x, y) = F_{th} \exp\left(\frac{d(x, y)}{l_{at}}\right), \quad (2)$$

kde F_0 je špičková fluence, $f(x, y)$ je příčné rozložení fluence, F_{th} je prahová fluence, $d(x, y)$ je hloubkový profil a l_{at} je atenuační délka záření v materiálu. Atenuace je zeslabení záření při průchodu materiálem. Maximum příčného rozložení fluence $f(x, y)$ je normované na jedničku, platí tedy $0 \leq f(x, y) \leq 1$ v celé příčné rovině (x, y) . Rovnice (2) vychází z Lambert-Beerova zákona exponenciálního útlumu elektromagnetického záření v absorbujícím prostředí, kde je aplikována podmínka pro ablační práh.

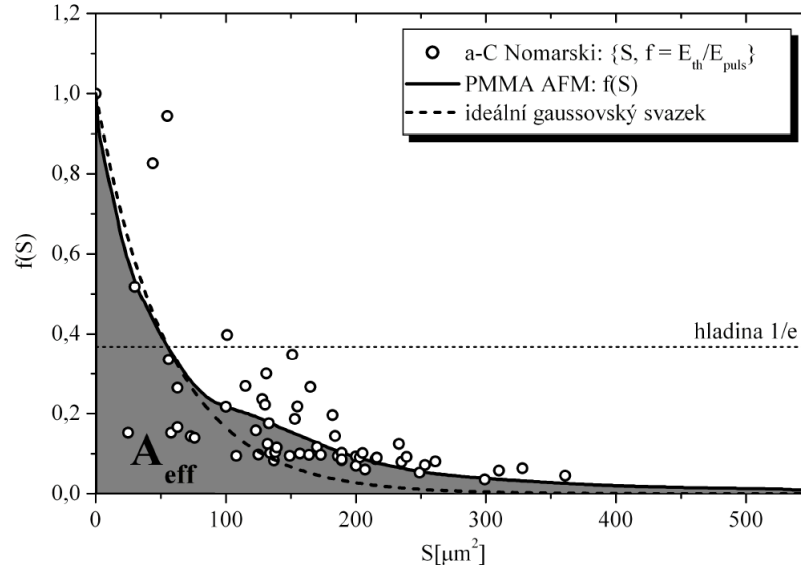
Před integrací profilu je zapotřebí jeho úpravy. Nejprve se odřízne část svazku pod netepelným ablačním prahem. Poté se profil přenormuje faktorem

$$p = \exp\left(\frac{d_{max}}{l_{at}}\right) = \frac{F_0}{F_{th}}, \quad (3)$$

kde d_{max} je maximální hloubka kráteru.

Normovací faktor p je citlivý na určení maximální hloubky, proto je někdy nutné ještě numerické vyhlazení. Po integraci dle vztahu (1) získáme efektivní plochu se systematickým podhodnocením plynoucím z prahového ořezávání, které škáluje přibližně s faktorem $1/p$. Nejspolehlivější výsledky jsou tak při co největším poměru špičkové a prahové fluence p , nesmí se však překročit tepelný ablační práh.

Z rekonstruovaného normovaného profilu svazku lze pak snadno vyčíst závislost hladiny fluence f na ploše kontury S . V grafu na obrázku 2 je tato závislost vynesena plnou čarou, přerušovanou čarou je vynesena exponenciální závislost pro ideální gaussovský



Obrázek 2 Normovaná hladina fluence f v závislosti na příslušné kontuře S z rekonstruovaného profilu svazku na 1, převzato od J. Chalupského [1].

svazek. Jak z obrázku 2 tak i z rovnice (1) je patrné, že efektivní plochu svazku můžeme vyjádřit i jako plochu pod grafem funkce $f(S)$:

$$A_{eff} = \int_0^{S_{MAX}} f(S) dS. \quad (4)$$

kde S_{MAX} je plocha podstavy ablaového kráteru v PMMA, tedy plocha povrchové ablační kontury. V ideálním případě se tato mez blíží nekonečnu, ale v reálném případě je to nesplnitelné a opět se zde počítá se systematickou chybou $\sim 1/p$.

Druhá metoda pro měření efektivní plochy vychází z rovnice pro tvar ablačního otisku v PMMA v závislosti na fluenčním profilu [1]:

$$d(x, y) = l_{at} \ln \left(\frac{F_0}{F_{th}} f(x, y) \right), \quad (5)$$

kde platí $0 \leq f(x, y) \leq 1$. Dosazením podmínky pro povrchovou ablační konturu $d(x, y) = 0$ získáme důležitý vztah:

$$f(x, y) = \frac{F_{th}}{F_0} = \frac{1}{p}, \quad (6)$$

který říká, že povrchová ablační kontura zobrazuje konturu svazku na hladině $\frac{1}{p}$ (poměr prahové a špičkové fluence) maxima. Mění-li se tedy špičková hodnota fluence F_0 , mění se i hodnota p a tím se mění i ablační kontura. Pouhou změnou energie impulsu můžeme skenovat příčný profil svazku ve směru osy F resp. f , proto metoda nese označení F-sken resp. f-sken.

Označení f -sken přísluší normovanému fluenčnímu skenu vyjadřujícímu závislost $f(S)$. Jeho oborem hodnot je interval $0 \leq f(S) \leq 1$. Analogicky však existuje i nenormovaný fluenční sken, který se značí F -sken a je spojen s normovaným relací $F(S) = F_0 f(S)$. Oborem hodnot F -skenu je pak interval $0 \leq F(S) \leq F_0$.

Výhod fluenčního skenu oproti rekonstrukci příčného profilu svazku z ablačních otisků v PMMA je několik. Jelikož se ablační kontura nachází na okraji kráteru, kde

je fluence vždy rovna F_{th} a je relativně nízká, nedochází k nežádoucím vlivům tepelných efektů. Pro zkoumání ablační kontury dále stačí dobrý optický mikroskop, není potřeba časově náročný AFM. Velkou výhodou je také možnost použití jiných vhodných materiálů, které mají ablační práh neměnný a nezávislý na špičkové fluenci F_0 .

2.2 Metoda z-sken

V předešlé části jsem se zabývala pouze příčnou charakterizací laserového svazku resp. příčným profilem fluence v dané pozici z . Vzorek však může být umístěn libovolně podél svazku, kde plošná hustota energie dovolí ablaci popř. desorpci [1]. Můžeme tak studovat změnu profilu svazku procházením skz ohnisko podél optické osy z . Tato metoda proto nese označení z -sken. Z naměřených dat se pak může stanovit poloha a poloměr pásu ohniska, Rayleighova vzdálenost, divergence svazku, astigmatický rozdíl atd. Tato metoda je prozatím použitelná pro stigmatické a jednoduché astigmatické gaussovské svazky.

2.2.1 Stigmatický gaussovský svazek

Tvar ablačního otisku a jeho závislost na poloze z nám poskytuje informaci o fokusačním výkonu [1]. Rovnice plochy kruhové kontury reprezentující tvar ablačního otisku stigmatického gaussovského svazku na povrchu vzorku je [4]:

$$S(z, F_0) = S_{foc} \left(1 + \frac{(z - z_c)^2}{z_0^2} \right) \left(\ln \frac{F_0}{F_{th}} - \ln \left(1 + \frac{(z - z_c)^2}{z_0^2} \right) \right) \quad (7)$$

přičemž $S_{foc} = \pi \rho_0^2$ je plocha pásu svazku na úrovni $1/e$ maxima (fokální plocha), ρ_0 je poloměr pásu na úrovni $1/e$ maxima, F_0 je špičková fluence ve fokusu, F_{th} je prahová fluence, z je libovolná podélná pozice, z_c je absolutní poloha pásu a z_0 je Rayleighova vzdálenost.

Špičkovou a prahovou fluenci můžeme nahradit energií pulsu a prahovou energií, protože platí poměr [1]:

$$p = \frac{F_0}{F_{th}} = \frac{E_{puls}}{E_{th}}. \quad (8)$$

Vztah (7) je modelovou funkcí, která může být proložena změřenými plochami kráterů S . Z fitu pak získáme parametry svazku a prahovou energii v ohnisku.

Na obrázku 3 je do grafu vyneseno několik závislostí plochy S při různých poměrech p při parametrech $S_{foc} = 300 \mu m^2$, $z_0 = 11 mm$, $z_c = 0 mm$. Z grafu můžeme vidět, že pro úrovně $p > 2,71828$ (Eulerovo číslo) se nachází lokální minimum v místě pásu svazku a závislost má typický tvar „zubu“. Pro úrovně $p \leq 2,71828$ se v ohnisku nachází globální maximum funkce $S(z, p)$. Protože se metoda z -skenu používá i ke stanovení polohy ohniska svazku, musí se poměr p volit dostatečně vysoký.

2.2.2 Jednoduchý astigmatický gaussovský svazek

Astigmatismus je aberace fokusační optiky způsobená rozdílným zakřivením vlnoplochy v sagitálním a tangenciálním směru [1]. V důsledku toho vznikají dvě ohniska, sagitální a tangenciální. Proto se zavádí dvě polohy pásu (z_{c1} a z_{c2}), dvě Rayleighovy vzdálenosti

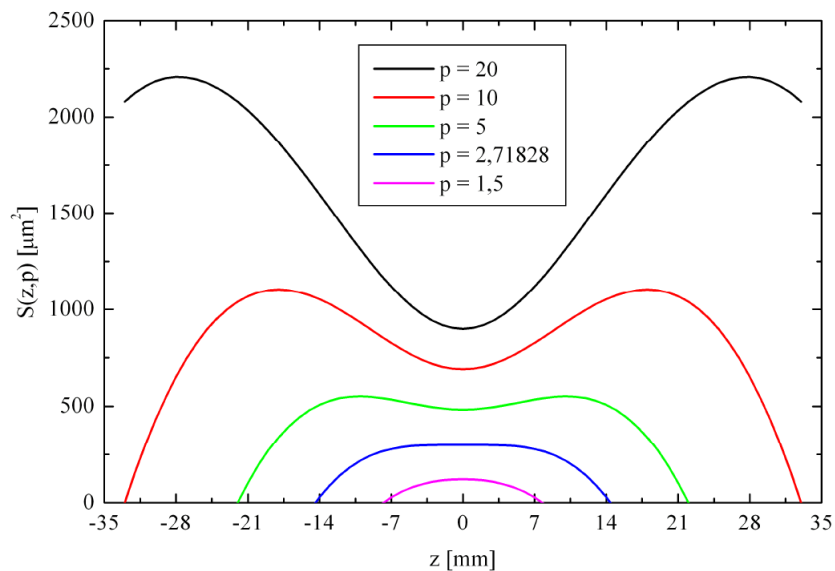
(z_{01} a z_{02}) a dva poloměry pásu (ρ_{01} a ρ_{02}). Tvarem povrchové ablační kontury astigmatického svazku je elipsa, jejíž orientace se mění při průchodu nominálním ohniskem o 90° . Poloměry eliptického imprintu ve směrech hlavních os jsou [4]:

$$\begin{aligned} r_1(z, F_0) &= \rho_1(z) \left(\ln \frac{F_0}{F_{th}} - \ln \left(\frac{\rho_1(z)\rho_2(z)}{\rho_{01}\rho_{02}} \right) \right)^{\frac{1}{2}}, \\ r_2(z, F_0) &= \rho_2(z) \left(\ln \frac{F_0}{F_{th}} - \ln \left(\frac{\rho_1(z)\rho_2(z)}{\rho_{01}\rho_{02}} \right) \right)^{\frac{1}{2}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Členy $\rho_1(z)$ a $\rho_2(z)$ jsou poloměry svazku v jednotlivých směrech a v závislosti na pozici z a platí pro ně rovnice:

$$\begin{aligned} \rho_1(z) &= \rho_{01} \left(1 + \left(\frac{z - z_{c1}}{z_{01}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \\ \rho_2(z) &= \rho_{02} \left(1 + \left(\frac{z - z_{c2}}{z_{02}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \end{aligned} \quad (10)$$

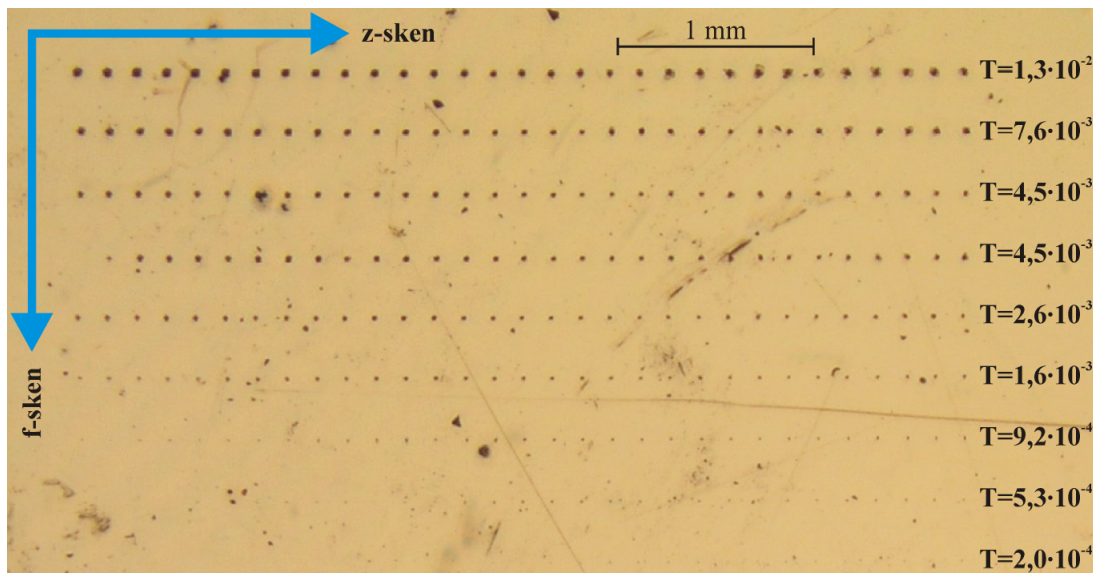
Rovnice (9) představují soustavu modelových funkcí, které lze naitovat na změřená data. Jelikož jsou obě rovnice vzájemně závislé, musí se naitovat současně. Z fitovacích parametrů pak můžeme určit astigmatický rozdíl $\Delta f = z_{c2} - z_{c1}$, což je vzdálenost sagitálního a tangenciálního ohniska. Vynásobením rovnic (9) a π získáme vyjádření plochy kráteru shodné s (7) za předpokladu, že $\rho_{01} = \rho_{02} = \rho_0$, $z_{c1} = z_{c2} = z_{c0}$ a $z_{01} = z_{02} = z_0$.



Obrázek 3 Závislost plochy povrchové ablační kontury S na pozici z pro různé úrovně p , převzato od J. Chalupského [1].

2.3 Metoda $f(z)$ -sken

Tato metoda se používá pro obecný negaussovský laserový svazek. V podstatě se jedná o f -sken, přičemž se na každé úrovni atenuace provede podélný z -sken [1]. Tím se získá matice ablačních otisků pro různé pozice z a energie pulsů E_{puls} , ze které můžeme stanovit efektivní kaustickou křivku svazku $A_{eff}(z)$.



Obrázek 4 Matice ablačních imprintů $f(z)$ -skenu na povrchu $PbWO_4$, převzato od J. Chalupského [1].

2.4 Techniky ozařování terčů RTG svazkem

Doposud jsem uvedla několik metod charakterizace rentgenových laserových svazků. Nyní se zaměřím na techniky ozařování vzorků (terčů), které se liší pro jednotlivé metody charakterizace svazku či laserové optiky.

Pro vytvoření ablačních otisků musí být lokální deponovaná dávka dostatečně velká, aby se špičková fluence pohybovala nad ablačním prahem materiálu [1]. Tyto otisky vytvořené jedním výstřelem mají hloubku typicky ~ 10 - 100 nm. Ablační otisk tak můžeme pozorovat AFM mikroskopem a postačí nám jeden výstřel (single-shot). U malých lokálních deponovaných dávek se naopak ocitáme pod ablačním prahem laseru a vzniká desorpční otisk. Jelikož je jeho hloubka vytvořená jedním výstřelem řádově ~ 1 nm, byl by desorpční otisk kvůli drsnosti povrchu těžko pozorovatelný i s AFM mikroskopem. Proto se do jednoho místa vzorku akumuluje více výstřelů (multi-shot).

Před začátkem každého experimentu je nutné vytvořit iradiační protokol, ve kterém se stanoví nastavení laseru pro jednotlivé výstřely, úhel dopadu laserového svazku na terč, čísla terčů, poloha výstřelů na terči, množství výstřelů atd. Po experimentu je pak na vzorku mapa výstřelů viz. obrázek 6. Souřadný systém každého terče umístěného na držáku (viz obrázek 5) je následující: osa z je ve směru šíření svazku, osa x je horizontálně, osa y je vertikálně, všechny osy jsou na sebe kolmé a počátek souřadného systému je na povrchu vzorku. Souřadný systém laserového svazku je dán primární experimentální osou určenou vstupem a výstupem paprsku.

Z předešlé kapitoly víme, že f -sken metoda slouží k charakterizaci příčného profilu svazku a k měření prahu ablačního poškození. Mapa fluenčního skenu je reprezentována

2D maticí ve směrech x a y . Matice se „zapisuje“ po řádcích po ekvidistantních krocích ve zvoleném směru, přičemž atenuace svazku zůstává v rámci jednoho řádku neměnná. Víceero opakování výstřelů na stejné úrovni atenuace je nezbytné pro získání dostatečně velkého souboru dat, který dobře zachycuje fluktuace energií impulsů výstřelů od výstřelů popřípadě stabilitu svazku. Atenuace se mění po úrovních mezi jednotlivými řádky [3]. Tento postup je časově efektivní, jelikož každá změna atenuace vyžaduje jistý čas. O něco efektivnější přístup zahrnuje úsporu času při pohybech motorů v době, kdy je svazek blokován, tedy při přechodu mezi jednotlivými řádky. Pokud jsou zaznamenávány souřadnice a parametry každého výstřelu, není potřeba vracet se vždy na začátek řádku, ale postačí provést skenování v opačném směru (zig-zag mapování). Typický fluenční sken čítá 10-15 úrovní atenuace od prahové energie až po maximální výstupní energii laseru a 20-100 ablačních otisků pro každou úroveň v závislosti na požadované přesnosti měření. Krok v příčných směrech x a y se volí s ohledem na odhadovanou velikost imprintu tak, aby nedošlo k překryvu otisků.

Metoda z-sken se používá pro podélnou charakterizaci svazku a k nalezení fokusu. Proto se iradiační protokol skládá z translace komory podél osy svazku z a translace terče alespoň podél jedné z os x , y [4]. Aby byly dobře zachyceny fluktuace parametrů svazku, provádí se pro každou pozici z několik (cca. 10) opakování, čímž z řádkového z-skeny opět vznikne matice. Směry skenování se kvůli úspoře času volí s ohledem na rychlost podélného z posuvu a příčného x , y posuvu. Krok v příčném směru se volí tak, aby nedocházelo k překryvu otisků, a to ani mimo ohnisko. Krok v podélném směru z se volí s ohledem na odhadovanou Rayleighovu vzdálenost z_0 svazku, aby byl dobře proměřen pás svazku, typicky $z_0/10$ až $z_0/5$. Rozsah z-skeny se zpravidla stanovuje jako 2 až 5-ti násobek Rayleighovy vzdálenosti, aby bylo možno přesně stanovit divergenci svazku a faktor šíření svazku (M-parametr) [1]. Volba kroku a rozsahu však musí respektovat konečnou velikost terče a minimální délku kroku ve směru příčném.

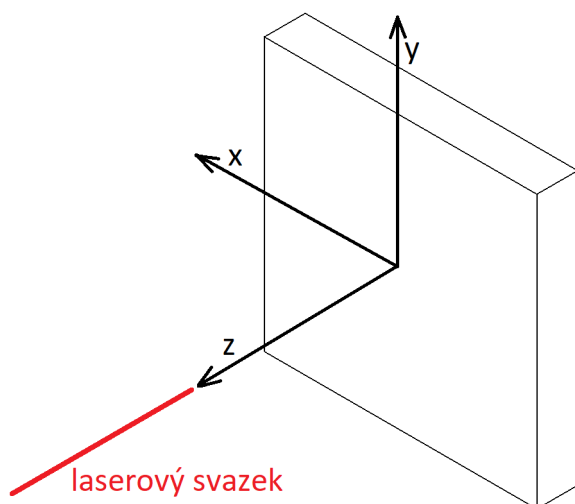
Charakterizaci svazku ve směru šíření se zabývá také metoda F(z)-sken. Jelikož je to kombinace předešlých metod, iradiační protokol se skládá z translace komory ve směru osy z , translace terče v osách x, y a ze změny atenuace. Zpravidla nejrychlejší postup je provést nejprve skenování ve směru osy z , a poté měnit úroveň atenuace. Typický f(z)-sken čítá cca. 10-20 úrovní atenuace od prahové energie impulsu v ohnisku po maximální dosažitelnou energii laseru. Krok v příčném a podélném směru a rozsah skenu se volí podobně jako u z-skeny.

Předešlé techniky ozařování se provádí se svazkem dopadajícím kolmo na terč, tedy pod úhlem 0° od kolmice terče. Ozařovat vzorek můžeme ale i pod nekolmým úhlem dopadu v rozmezí $\pm 90^\circ$. Metodou f-skeny pak získáme charakterizaci svazku pod úhlem a také můžeme měřit ablační práh poškození zrcadel s nekolmým dopadem (např. vrstvených zrcadel). Při ozařování pod tečným úhlem se používá metoda f-sken pro charakterizaci svazku pod tečným úhlem a pro měření prahu ablačního poškození zrcadel s tečným dopadem. Při ozařování pod tečným úhlem je však potřeba mít na paměti, že stopa otisku se prodlužuje s $1/\sin(\theta)$, kde θ je úhel dopadu měřený od povrchu. To významně ovlivní délku kroku v příčném směru a mnohdy je lepší provádět skenování ve směru kratšího poloměru otisku. Ozařování pod tečným úhlem je také extrémně citlivé na přesnost nastavení úhlu. Pro opravdu malé tečné úhly okolo 10 mrad a menší začíná podstatnou roli hrát i směrová nestabilita svazku, která způsobí značné fluktuace polohy otisku na terči.

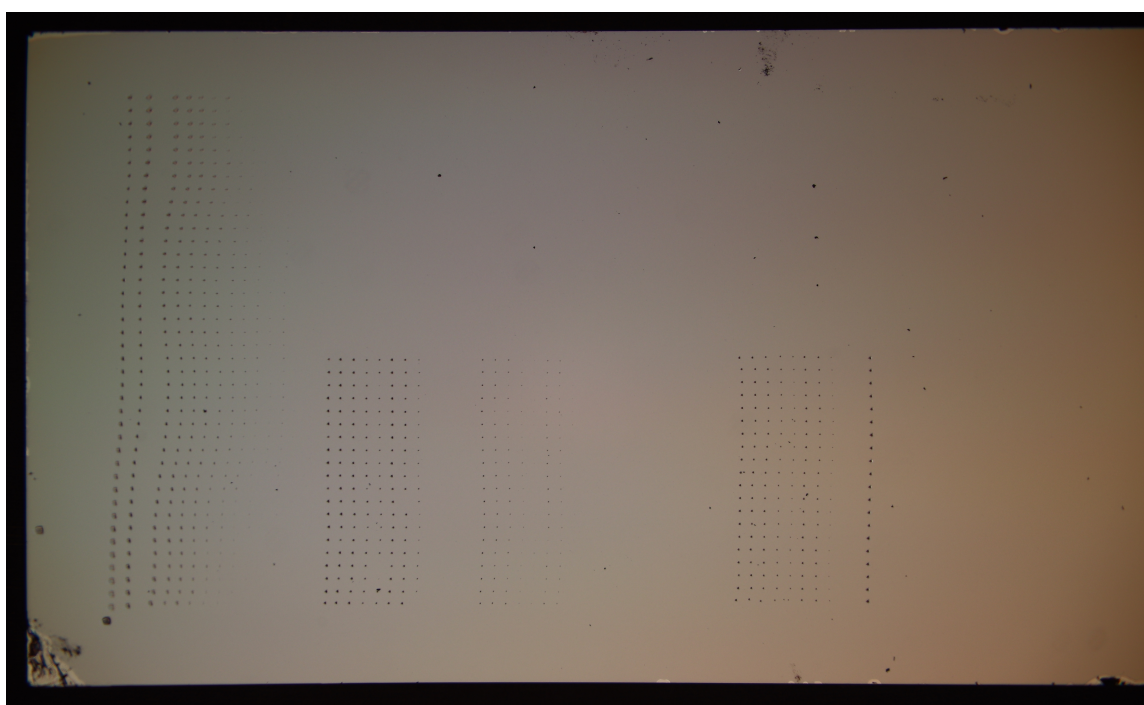
V závislosti na požadované přesnosti měření může na terči vzniknout i několik tisíc otisků, z nichž velká část může být velmi malých až těžko pozorovatelných. Některé řádky skenů pod prahem ablance nejsou pozorovatelné vůbec, popř. pozorujeme pouze jednotlivé výstřely, které práh ablance lehce překročily díky fluktuacím. Přesto je potřeba

2 Metody charakterizace laserového svazku

informace o poloze i velice slabých i podprahových řádků skenů. Proto se na terči často vytvářejí orientační značky, tzv. markery, které zpravidla označují začátek a konec řádku. Tyto značky se tvoří akumulací mnoha výstřelů laseru do jednoho místa, aby byly dostatečně viditelné.



Obrázek 5 Souřadný systém terče.



Obrázek 6 Mapa výstřelů v PMMA, nalevo je metoda $f(z)$ -sken, uprostřed je metoda f-sken.

3 Analýza pracovních pohybů a dostupných pohybových systémů

Konstrukce AbloCAMu má být univerzální pro metody f-sken, z-sken a f(z)-sken pro kolmý i nekolmý dopad. V závislosti na místě konání experimentů budou tyto metody vyhodnocovány jak ex-situ, tak in-situ. Z tohoto důvodu je zapotřebí navrhnout manipulátor, který bude složený z dostupných pohybových systémů a bude možné ho používat jak v normálním prostředí, tak ve vakuu. Návrh takového manipulátoru je součástí této práce. Pro vyhodnocování ex-situ bude manipulátor připevněn k optickému stolu v laboratoři na daném pracovišti a bude využíván jako automatizovaný posuv vzorku pro mikroskop. Pro in-situ vyhodnocování bude navržena soustava, která se připevní na přírubu hlavní interakční komory. Tato soustava se skládá z vakuové komory, manipulátoru, mikroskopu, turbomolekulární pumpy, pneumatického vakuového ventilu a portu pro výměnu vzorků. Jelikož hlavní interakční komory nemají shodný tvar a rozměry, je návrh vytvořen pro konkrétní komoru nacházející se na Akademii věd České republiky. Idea fungování celé této sestavy pro vyhodnocování je následující. Manipulátor s terčí vyjede skrz pneumatický ventil a přírubu v horním víku komory do hlavní interakční komory. V této komoře proběhne ozařování dle předem definovaného iradiačního protokolu. Poté manipulátor dopraví terče k průzorovému okénku, nad kterým je umístěn mikroskop. Pomocí mikroskopu se zobrazí jednotlivé otisky, které dále vyhodnotí program používající algoritmy strojového učení.

3.1 Pracovní pohyby manipulátoru

Jelikož interakční vakuová komora, ke které se AbloCAM připevní, je nepohyblivá, je veškeré polohování vzorku dáno pouze manipulátorem. V této práci je manipulátor navržen pro ozařování kolmo na terč. Na základě znalostí potřebných pohybů terče u jednotlivých metod můžeme určit základní funkční pohyby manipulátoru. Jako další funkční pohyby můžeme považovat ty, které nám umožňují pohyb terče z vakuové komory AbloCAMu do hlavní interakční komory. Vzhledem k velikosti laserového otisku na terči, která je v řádech desítek μm , je správný průběh experimentu velmi ovlivněn přesnou polohou terče vůči laserovému svazku. Vliv na vzájemnou polohu terče a svazku má například rovinnost povrchu terčů, natočení terčů vůči laserovému svazku vzniklé konstrukcí manipulátoru a komory, i samotné nastavení laserového paprsku. Aby tak došlo k co nejpřesnějšímu polohování, je někdy zapotřebí pomocných pohybů.

Jak již bylo zmíněno, funkčními pohyby jsou všechny pohyby terčů z kapitoly 2.4 a pohyby terče z vakuové komory do hlavní komory. U těchto pohybů jsme na základě znalostí z předešlých experimentů určili jejich přibližný rozsah, krok a přesnost. Souřadný systém terče bereme stejný jako na obrázku 5. Funkční pohyby jsou tedy následující:

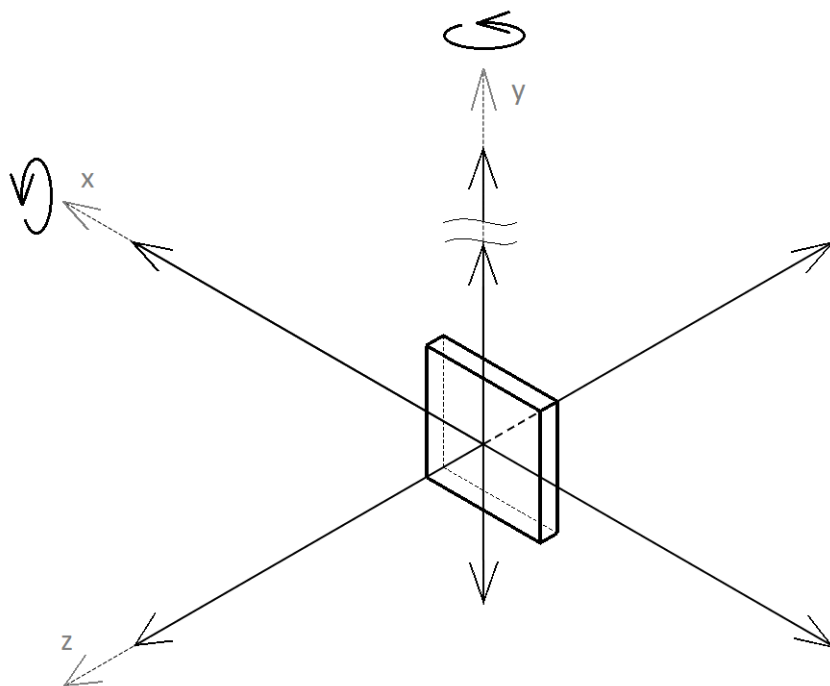
- Translace ve směru osy x v rozsahu ~ 50 mm. Krok v této ose je minimálně ~ 10 μm a přesnost pohybu je vyžadována na mikrometry.
- Translace ve směru osy y v rozsahu ~ 20 mm. Krok v této ose je stejný jako pro osu x tedy 10 μm . Přesnost pohybu je také na mikrometry.

3 Analýza pracovních pohybů a dostupných pohybových systémů

- Translace ve směru osy z (ve směru paprsku) v rozsahu ~ 50 mm s krokem minimálně $\sim 10 \mu\text{m}$ a s přesností na mikrometry.
- Hrubá translace ve směru osy y v rozsahu ~ 450 mm.

K těmto pohybům jsou ještě přidány pomocné pohyby umožňující přesnější polohování terče. Pomocné pracovní pohyby navrhovaného manipulátoru pro kolmé ozařování terče jsou následující:

- Rotace kolem osy y s přesností pod $0,1^\circ$ a rozsahem $>360^\circ$.
- Rotace kolem osy x s přesností pod $0,1^\circ$ a rozsahem 180° .



Obrázek 7 Schéma pracovních pohybů znázorněných v souřadném systému terče.

Pro nastavení polohy souřadnicového systému manipulátoru se před začátkem experimentu provádí několik operací, kterými se změří odchylky od ideální polohy a následně se tyto odchylky vykompenzují. Takovéto justování popsal například Sobierajski a kol. [5]. Postup justování je specifický dle konkrétního pracoviště, proto jsem pro pracoviště, kde bude AbloCAM používán, stanovila následující postup:

- Hrubé nastavení polohy manipulátoru v interakční komoře.
- Autokolimace trasovacím He-Ne laserem, který je paralelní s hlavním svazkem.
- Kompenzace horizontálního a vertikálního odklonu od primární osy rotací manipulátoru
- Autokolimace s hlavním svazkem.

Některá pracoviště mají pohyblivou interakční komoru. Mouchou s ní hýbat do stran i ji úhlově natáčet. V našem případě je komora nepohyblivá, proto se do procesu justace nezapojuje. Justování os se vztahuje k tzv. primární experimentální ose, kterou je osa z manipulátoru. Proces autokolimace se provádí dvěma způsoby. V prvním prochází svazek trasovacího laseru skrz aperturu a dopadne na odrazivý materiál umístěný na držáku

vzorků. Následně se na desce apertury sleduje odražený svazek a změnou natočení manipulatoru se tímto svazkem pohybuje dokud se neztotožní se svazkem přicházejícím. Druhým způsobem autokolimace se úhly horizontálního a vertikálního odklonu primární osy od osy svazku určují pohybem manipulatoru ve směru z , který musí koincidovat se směrem primární osy. Pokud svazek na CCD, umístěném na držáku terčů, utíká horizontálně/vertikálně, není primární osa rovnoběžná. Ze změny polohy svazku lze vypočítat kompenzační úhel mezi osami. Kompenzace horizontálního úhlu se provádí snadno otočením celého manipulatoru. Kompenzace ve vertikálním směru je složitější, jelikož se nedá točit celým manipulatorem, ale jen jeho částí s držákem vzorků. Proto se musí vypočítat, o jaké hodnoty ve směru os y a z se musí celý manipulator pohnout, aby při pohybování vzorkem ve směru osy z docházelo ke kompenzaci odklonu.

3.2 Pohybové systémy do vakua

Pro pohyb objektů ve vakuových komorách není vždy nutné konstruovat vlastní pohybové systémy. V dnešní době je na trhu několik firem, které vyrábí pohybové stolky do různých stupňů vakua, pomocí nichž se dá složit téměř jakýkoli pohybový systém. Vakuum je obecně rozděleno dle hodnot tlaku na několik kategorií, viz. tabulka 1. Konstrukce do vysokého a ultravysokého vakua mají určitá materiálová omezení. Je vyloučeno používat jakékoli organické materiály, většinu plastů a zinek. Nejčastěji se používá nemagnetická nerez ocel a pro těsnění měděné či stříbrné těsnicí kroužky. Ovládání pohybových systémů se nabízí buď manuální, nebo motorizované, které umožňuje procesy zautomatizovat. Na základě pracovních pohybů jsem provedla průzkum dostupných pohybových stolků. Každá firma ke svým výrobkům dodává počítačový software k jejich ovládání. Celkové ovládání je možné implementovat v programu LabVIEW i Python.

pásma	tlak v Pa	tlak v mbar
nízké vakuum	$1 \times 10^5 - 3 \times 10^3$	$1 \times 10^3 - 3 \times 10^1$
střední vakuum	$3 \times 10^3 - 1 \times 10^{-1}$	$3 \times 10^1 - 1 \times 10^{-3}$
vysoké vakuum (HV)	$1 \times 10^{-1} - 1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-7}$
ultravysoké vakuum (UHV)	$1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-10}$	$1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-12}$
extrémně vysoké vakuum (XHV)	$< 1 \times 10^{-10}$	$< 1 \times 10^{-12}$

Tabulka 1 Tabulka tlakových rozsahů vakua.

Pro hrubý translační pohyb z vakuové komory do hlavní interakční komory se používá leštěná tyč, jejíž pohyb i utěsnění zajišťuje systém s vlnovcem. Ten vyrábí například firma UHV Design nebo Demaco. Firma UHV Design nabízí několik sérií výrobků, pro naše účely je nejvhodnější série HLSM (viz obrázky 8 a 9). Ta umožňuje zdvih až 1 m s vysokou přesností během celého zdvihu, hladký pohyb, funkčnost do 250°C, motorizované verze pro všechny výrobky i konfiguraci výrobků dle vlastní potřeby [6]. Firma Demaco nabízí například sérii LD 40 S, která je určena pro přírubu DN 40 CF [7]. Motorizované ovládání je pomocí dvou nebo tříkrokového motoru, zdvih tyče je 50-600 mm s přesností 0,001 mm a funkčnost výrobku je do 230°C. K výrobkům této série lineárních manipulatorů je možné přimontovat rotačný stolek DN 40 PLS, který poskytuje nepřetržitě otáčení 360°s přesností 0,01°. Pro přesnější nastavení úhlu je k dispozici jemné regulování šnekového soukolí.

Lineární pohyb s mikrometrovou přesností může být proveden například pomocí lineárního stolku. Jedním z výrobců těchto systémů do UHV je firma Xeryon [10] či

SmarAct [8], která nabízí výrobky série SLL (obrázky 10 a 11) a série SLC (obrázek 12). Obě série zahrnují systémy s volitelnou vzdáleností posuvu, je možné je upravit pro spojení vzájemně či s jinými systémy a také nabízí úpravy pro zákaznickovy specifické potřeby. Pohyb série SLL je založen na valivém pohybu kuliček v drážkách a je udržován pomocí kolejnic. Na kolejnice je možné umístit více vozíků. Díky většímu rozměru nabízí SLLV42 oproti SLL12 větší konstrukční pevnost. SLC série je díky tuhosti používána pro nano- a mikropolohování s vysokou přesností a stabilitou. Také je možné do každého systému integrovat bez zvětšení vnějších rozměrů snímač polohy pro operace v uzavřené smyčce. SLC série nabízí produkty SLC-17 se šířkou 17 mm a SLC-24 se šířkou 24 mm.

Parametry	SLL12	SLLV42	SLC-17	SLC-24
Normální zatížení [N]	30	30	30	30
Blokovací síla [N]	≥ 3	≥ 5	≥ 3.5	≥ 3.5
Rozměr [mm]	27x13	60x16	17x8.5	24x10.5
Rychlost posuvu [mm/s]	> 15	> 15	> 20	> 20
Přesnost [nm]	< 1	< 1	< 1	< 1

Tabulka 2 Tabulka porovnání parametrů lineárních systémů.

Pro lineární a rotační pohyb je možné použít hexapod od firmy PI USA. Tato firma nabízí i hexapody o malých rozměrech kompatibilních do vakua (obrázek 13) a možnost návrhu hexapodu podle zákaznickových potřeb (obrázek 14) [9]. Příklady parametrů těchto dvou výrobků jsou v tabulce 3, zde je brána osa z kolmo k pracovní ploše. Výhodou hexapodu je pokrytí 6-ti stupňů volnosti v menší konstrukci než při skládání pohybů z jednotlivých soustav. Nevýhodou jsou menší pracovní rozsahy, obzvláště v rotaci.

Parametry	H-811.I2/I2V	P-911KNMV
Pracovní rozsah X,Y [mm]	$\pm 17, \pm 16$	± 1.5
Pracovní rozsah Z [mm]	± 6.5	± 1.5
Pracovní rozsah Θ_X, Θ_Y [°]	± 10	± 2
Pracovní rozsah Θ_Z [°]	± 21	± 2
Přesnost [nm]	5	100
Rozměr [mm]	$\varnothing 136 \times 114$	$\varnothing 100 \times 90$
Nosnost [kg]	2.5	1.5

Tabulka 3 Tabulka porovnání parametrů hexapodů.

Pro rotační pohyb je možné použít i rotační stolek. Celou řadu těchto systémů do UHV nabízí firma PI USA a i u nich nabízí úpravy dle potřeby [9]. Tyto systémy mohou být se stejnosměrným, krokovým i piezo motorem. Parametry některých výrobků jsou v tabulce 4. U-651 (obrázek 15) je stolek s nízkým profilem 14 mm a otvorem vycentrovaným doprostřed pro větší pole použitelnosti. Pohyb je pomocí zkříženého válečkového vedení a ultrazvukového piezo motoru, při vypnutí dochází k jeho samosvornosti. Poloha osy je měřena enkodérem a díky optickému referenčnímu snímači je umožněno opakování pohybu. Tento rotační stolek se používá pro aplikace s malým provozním cyklem. Stolek RS-40 (obrázek 16) má snímač referenčního bodu a nabízí se buď s krokovým motorem a převodovkou, nebo se stejnosměrným motorem, převodovkou a rotačním enkodérem na hřídeli motoru. Plynulý a přesný pohyb u stolku PRS-110

je zajištěn krokovým motorem a šnekovou převodovkou. Tento stolek je také vybaven referenčními spínači.

Parametry	U-651.04V	RS-40	PRS-110
Motor	ultrazvukový piezo	stejnoseměrný	krokový
Rozsah rotace [°]	>360	360	360
Max. rychlost [°/s]	540	7	2.7
Min. pohyb [μrad]	12	87	-
Přesnost [μrad]	4	0.45	35
Zatížení [N]	20	20	100
Přípustná laterální síla [N]	-	5	50

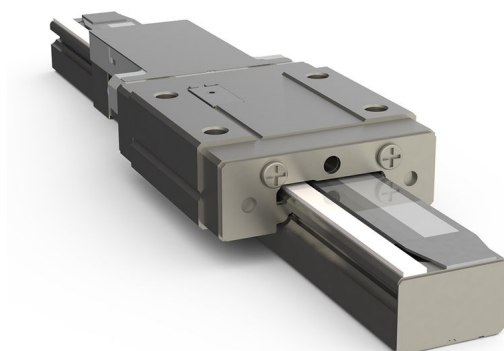
Tabulka 4 Tabulka porovnání parametrů rotačních soustav.



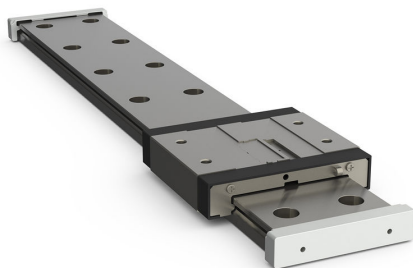
Obrázek 8 HLSM série lineárního pohybu firmy UHV Design s jedním vlnovcem [6].



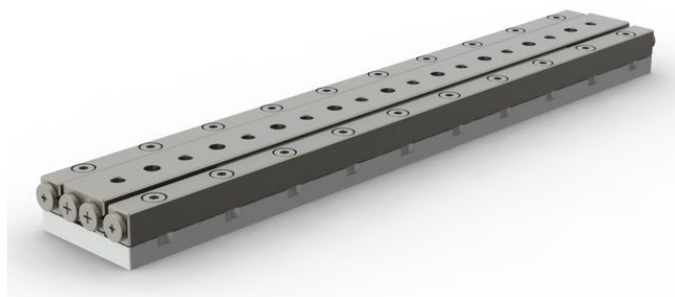
Obrázek 9 HLSM série lieárního pohybu firmy UHV Design se dvěma spojenými vlnovci [6].



Obrázek 10 Série SLL12 lieárního stolku firmy SmarAct [8].



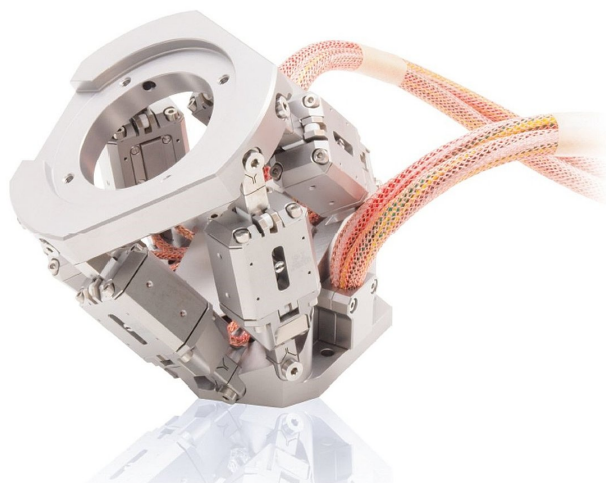
Obrázek 11 Série SLLV42 lieárního stolku firmy SmarAct [8].



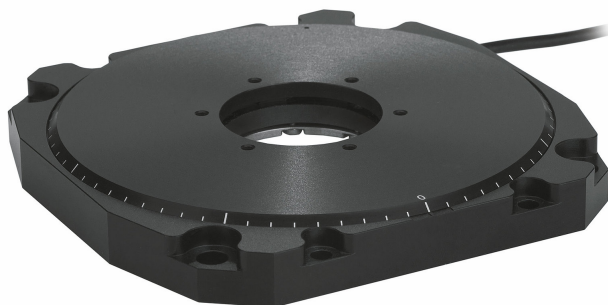
Obrázek 12 Série SLC-17 lieárního stolku firmy SmarAct [8].



Obrázek 13 Standardně nabízený H-811.I2/I2V 6-Axis Miniature Hexapod od firmy PI USA [9].



Obrázek 14 P-911KNMV UHV-Compatible Miniature Piezo Hexapod vyrobený na zakázku firmou PI USA [9].



Obrázek 15 Rotační stolek s ultrazvukovým piezomotorem U-651 firmy PI USA [9].



Obrázek 16 Rotační stolek RS-40 firmy PI USA [9].

4 Navitar mikroskop

Po skončení ozařování terče v hlavní interakční komoře pokračuje experiment vyhodnocením výsledků. Vzhledem k mikrónovým rozměrům laserových otisků v materiálu je pro jejich zkoumání zapotřebí mikroskopu. Samotné vyhodnocení otisků pak provádí buď odborný pracovník, nebo program založený na umělé inteligenci. Proces vyhodnocování však není součástí této práce. Mikroskop bude ve svislé pozici připevněn buď k optickému stolu v laboratoři, nebo ke konstrukci vakuové komory AbloCAMu. K pozorování vzorků bude používán mikroskop od americké firmy Navitar. Ten se skládá z několika dílů, které umožňují různé konfigurace. K dispozici jsou také dva objektivy, jejichž parametry můžeme vidět v tabulce 5. Oba objektivy jsou Plan Achromat, Plan znamená korekci vady sklenutí pole a Achromat znamená korekci barevné vady (korekce pro tři základní chromatičnosti). Objektivy jsou také zaměřeny do nekonečna, což je označeno zkratkou ICO (Infinity Corrected Objectives), a dochází tak ke korekci na rovnoběžný chod paprsků. Součástí této práce je zhodnocení jednotlivých konfigurací s oběma objektivy.

Parametry	ICO Motic	ICO Mitutoyo
Zvětšení	10×	50×
Hloubka ostrosti [μm]	3,5	0,9
Ohnisková vzdálenost [mm]	20	4,0
Zorné pole, 1/2"senzor [mm]	0,48 × 0,64	0,13 × 0,10
Zorné pole, 2/3"senzor [mm]	0,66 × 0,88	0,18 × 0,13
Numerická apertura A	0,28	0,55
Rozlišení [μm]	1	0,5
Pracovní vzdálenost WD [mm]	33,5	13

Tabulka 5 Parametry použitých objektivů [11].

Osvětlovací soustavu tvoří díl se vstupem pro optické vlákno o průměru 8 mm, který je z boku přišroubovaný k tubusu mikroskopu. Dále koaxiální optický kabel dlouhý 1m a zdroj světla. Tím je SOL-R od firmy Fiberoptics Technology Inc. s nastavitelnou ohniskovou vzdáleností lampy, 21 V halogenovou žárovkou a s příkonem 150 W.

Pro pozorování předmětu se použije kamera acA2500-60um od firmy Basler s následujícími parametry [12]:

- senzor ON Semiconductor PYTHON 5000
- typ senzoru CMOS
- velikost senzoru 12,4 mm × 9,8 mm
- rozlišení senzoru 2590 px × 2048 px, 5MP
- velikost pixelu 4,8 μm × 4,8 μm
- snímkovací frekvence 60 fps
- globální závěrka
- monochromatická
- rozhraní USB 3.0

Optické přístroje jsou charakterizovány jejich významnými vlastnostmi jako je například celkové zvětšení, rozlišovací schopnost, hloubka ostrosti, numerická apertura a další [13].

Celkové zvětšení mikroskopu nám říká, kolikrát se předmět jeví větší při pozorování mikroskopem ve srovnání s jeho pozorováním pouhým okem. Jeho hodnota je dána součinem příčného zvětšení objektivu β_{ob} a zvětšením okuláru Γ_{ok} :

$$\Gamma = \beta_{ob} \cdot \Gamma_{ok}. \quad (11)$$

Rozlišovací schopnost je schopnost od sebe ještě rozlišit dva body. Lze ji vypočítat rovnicí 12, ze které její závislost na vlnové délce, indexu lomu prostředí a vlastnostech objektivu. Rozlišovací schopnost objektivu je tím větší, čím větší je jeho průměr. Na rozlišovací schopnost má vliv interference a ohyb světla, vady optiky a nepřesnosti při výrobě a montáži. Z tohoto důvodu se paprsky z určitého bodu neprotnou v obrazovém prostoru v jediném bodě, ale budou vytvářet rozptylový kroužek.

Výpočet rozlišovací schopnosti:

$$a = 0,61 \cdot \frac{\lambda}{A}, \quad (12)$$

kde λ je vlnová délka a A je numerická apertura.

Hloubka ostrosti je vzdálenost mezi dvěma rovinami, kdy daný předmět vidíme ještě ostrý. Předměty, které leží nad nebo pod touto vzdáleností, vidíme rozostřeně nebo je vůbec nevidíme. Hloubka ostrosti je závislá na numerické apertuře, cloně i postavení kondenzoru. Výpočet je dán vztahem:

$$H = \frac{d_{min}}{tg\alpha}, \quad (13)$$

kde d_{min} je rozlišitelná vzdálenost a α je polovina vstupního úhlu objektivu.

Numerická apertura vyjadřuje účinnou světelnost objektivu a je to bezrozměrné číslo, které se vypočítá rovnicí 14. Numerická apertura je tím větší, čím větší je sinus vrcholového úhlu.

$$A = n \cdot \sin\alpha, \quad (14)$$

Zorného pole je maximální průměr kruhu v předmětové rovině, který lze mikroskopem pozorovat.

Pro zhodnocení vlastností jednotlivých konfigurací mikroskopu používám dvě měřítka. První měřítko má délku 1 mm a čáry od sebe vzdálené 10 μm . Druhé měřítko je od firmy Thorlabs a nachází se na něm několik rastrů, pro zhodnocení konkrétně používám Ronchiho mříž s různým počtem čar na milimetr (lp/mm). Pro každou konfiguraci jsem vybrala dvanáct zvětšení, pro které jsem vytvořila několik sad snímků. Na základě těchto snímků jsem pak vyhodnotila rozlišení mikroskopu, jeho zorné pole a numerickou aperturu.

Pro zhodnocení rozlišení jedenácti zvětšení každé konfigurace jsem vytvořila ze snímku Ronchiho mřížky normalizovanou křivku. Tyto křivky jsem pak spojila dohromady do jednoho grafu. Pro tento postup používám skript v programu Matlab, který uvádím v příloze A. Vzhledem k množství dat v této práci uvádím pouze dvě zvětšení pro každou konfiguraci.

Průměr zorného pole určuji z grafu vytvořeného v programu FIJI pomocí volby *Analyze a Plot Profile*.

Hloubku ostrosti jsem stanovila experimentálně několika měřeními. To probíhalo tak, že jsem umístila měřítko od firmy Thorlabs do pracovní vzdálenosti daného objektu a našla jsem takovou polohu, ve které je rastr rozostřený. Poté jsem postupně malými kroky posunovala měřítkem do roviny, ve které byl rastr poprvé vidět ostře a následně jsem pokračovala až do roviny, ve které se rastr začal rozostřovat. Výsledný počet kroků jsem si zaznamenala. Velikost jednoho kroku jsem určila jako podíl 3 mm zaostřovacího rozsahu mikroskopu (angl. fine focus) a maximálního počtu kroků. Následně jsem hloubku ostrosti vypočítala vynásobením velikosti kroku počtem změřených kroků. Pro každé zvětšení jsem provedla pět měření a vypočítala z nich průměr. Nepřesnost měření je dána několika faktory. Určení ostrosti je podmíněno subjektivním vnímáním každého člověka. Dále je optická soustava zatížena občasnými vibracemi, které ztěžují zachycení obrazu ostře. Jedním z faktorů je také hodnota maximálního počtu kroků, kterou mikroskop určuje při každém jeho spuštění a která není vždy stejná.

4.1 Základní konfigurace

Základní konfigurace je vidět na schématu 17. Skládá se z kamery, která je pomocí C-spojky upevněna k adaptéru. C-spojka se používá pro kamery se senzory, které mají diagonální rozměr menší než 20 mm [11]. Pro základní konfiguraci je k dispozici krátký adaptér se zvětšením $3,3\times$, standardní adaptéry se zvětšením $2,0\times$ a $1,0\times$. Adaptér je připevněn k motorizovanému tubusu mikroskopu s koaxiálním osvětlením zorného pole. Pomocí dvou 5ti-krokových motorů se ovládá přiblížení a jemné zaostření. Jejich referenční poloha je určována Hallovými senzory. Zaostřovat lze v rozsahu 3 mm. K druhé straně tubusu je pomocí objektivové spojky připojen jeden z objektivů. Soustava adaptéru a tubusu mikroskopu dává zvětšení $1,91\times - 23,1\times$. Pro osvětlovací soustavu je použit díl se vstupem pro optické vlákno a průsvitnou čočkou.

4.1.1 Konfigurace 1

Tato konfigurace se skládá z objektivu se zvětšením $10\times$ a adaptéru se zvětšením $1\times$. Soustava adaptéru a tubusu mikroskopu dává zvětšení $0,58\times - 7\times$. Celkové zvětšení této optické soustavy je $\Gamma = 5,8\times - 70\times$.

Numerická apertura je stejná jako objektivu, tj. $A = 0,28$.

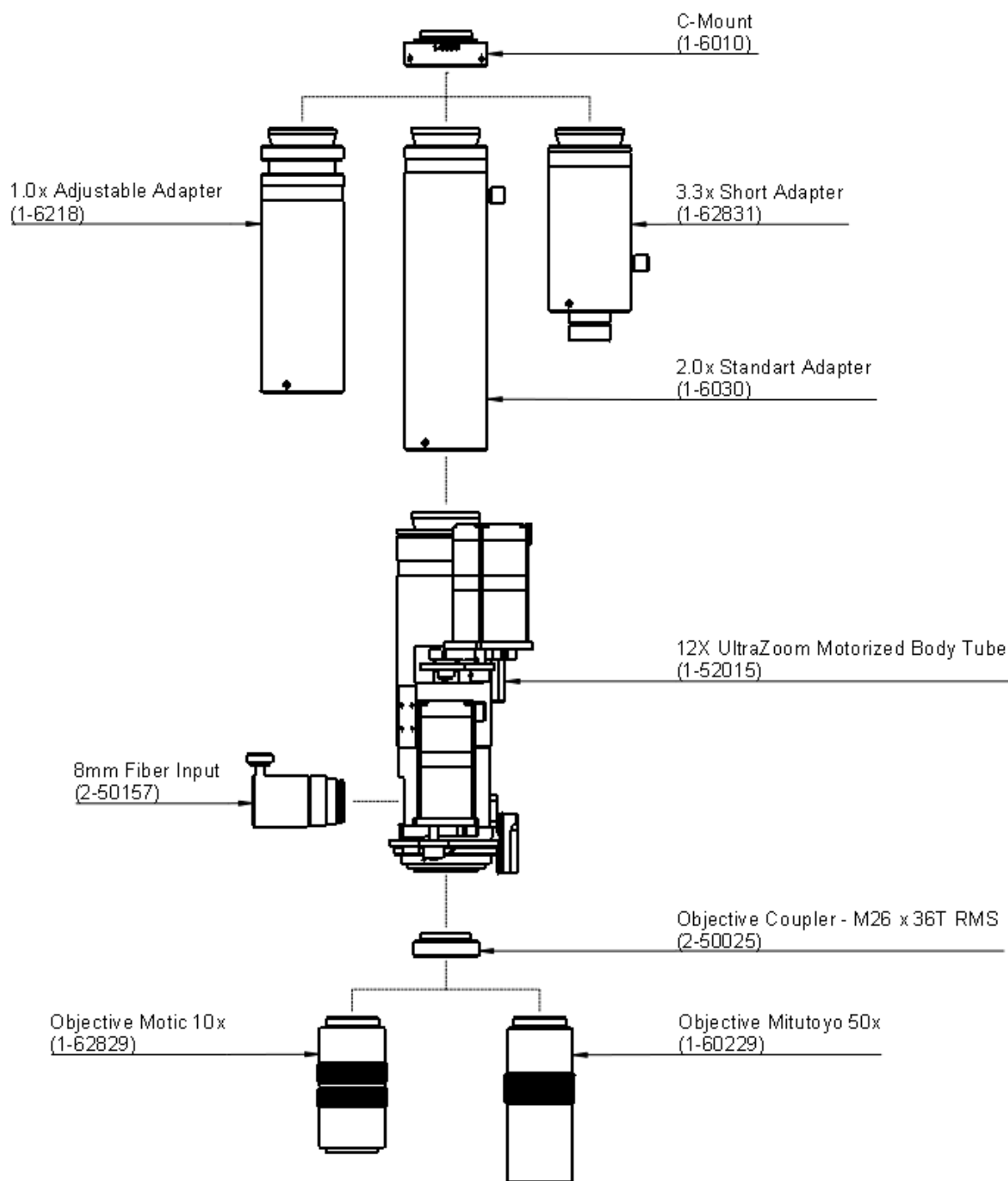
Průměr zorného pole jsem vypočítala z několika měření, jeho hodnota je přibližně $0,50 - 2,25$ mm v závislosti na zvětšení. Čím je zvětšení větší, tím je zorné pole menší.

Hloubku ostrosti jsem určila na základě pěti experimentálních měření. Výsledné průměry hodnot jsou v tabulce 6. Z tabulky je patrné, že s rostoucím zvětšením se hloubka ostrosti zmenšuje.

Zvětšení	$5,8\times$	$12,22\times$	$18,64\times$	$25,06\times$	$31,48\times$	$37,9\times$
Hloubka ostrosti [μm]	141,33	77,97	53,61	34,11	21,92	17,54
Zvětšení	$44,32\times$	$50,74\times$	$57,16\times$	$63,58\times$	$70\times$	
Hloubka ostrosti [μm]	16,08	14,62	13,65	13,18	11,21	

Tabulka 6 Změřená hloubka ostrosti Konfigurace 1 mikroskopu pro 11 zvětšení.

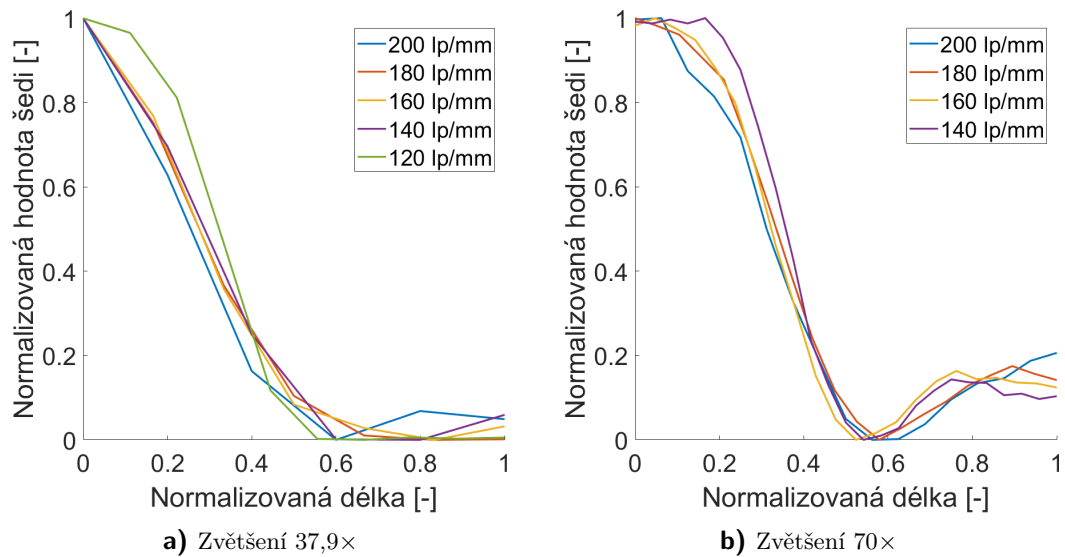
Rozlišovací schopnost konfigurace mikroskopu testuji na Ronchiho mřížce, která má od 10 lp/mm do 200 lp/mm. Ze snímků vytvořených pro jedenáct zvětšení vykresluji v programu FIJI graf hodnot šedi jednotlivých pixelů. Výběr pixelů provádím vodorovnou čarou přes střed snímku. Následně vyberu rozsah dat pro porovnání jednotlivých



Obrázek 17 Schéma Základní konfigurace mikroskopu.

snímků, na kterých jsou zachyceny rastry s různými hodnotami počtu čar na milimetr. Z těchto hodnot vyreslím normalizované křivky představující přechod mezi černými a bílými čarami Ronchiho mřížky. Tyto křivky poté spojím do společného grafu. Tento postup aplikuji pro všechny konfigurace.

Pro porovnání rozlišovací schopnosti jsem zvolila zvětšení $70\times$, tedy největší možné zvětšení konfigurace 1, a zvětšení $37,9\times$, které je přibližně poloviční. Z obrázku 18 vyplývá, že rozlišovací schopnost je s rostoucím zvětšením lepší. Je to dáno tím, že pro



Obrázek 18 Graf porovnání rozlišovací schopnosti konfigurace 1 pro dvě celková zvětšení.

přechod z černé do bílé je k dispozici více pixelů. Pro zvětšení $37,9\times$ nejlépe dopadla křivka zastupující rozlišení 120 čar na milimetr, tedy $8,33\ \mu\text{m}$. Ostatní křivky mají podobný průběh. Pro zvětšení $70\times$ nejlépe dopadla křivka 140 čar na milimetr, tedy $7,14\ \mu\text{m}$. Je také patrné, že díky většímu počtu pixelů je přechod mezi hranami čar plynulejší.

4.1.2 Konfigurace 2

Tato konfigurace se skládá z objektivu se zvětšením $10\times$ a adaptéru se zvětšením $2\times$. Soustava adaptéru a tubusu mikroskopu dává zvětšení $1,16\times - 14\times$. Celkové zvětšení této optické soustavy je $\Gamma = 11,6\times - 140\times$.

Numerická apertura je stejná jako objektivu, tj. $A = 0,28$.

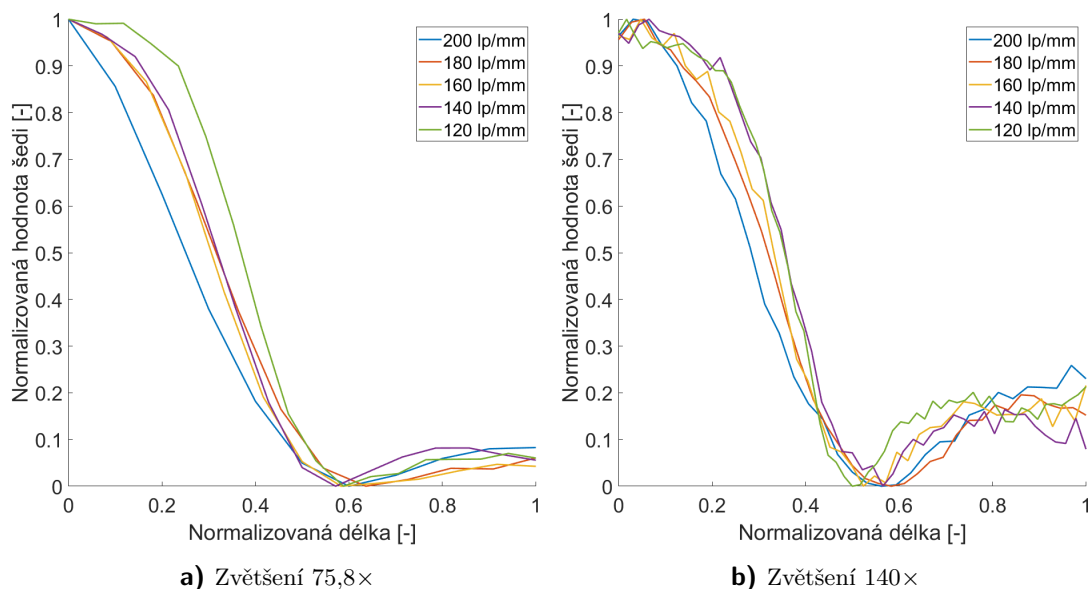
Průměr zorného pole vypočítaný z několika měření je přibližně $0,26 - 2,10\ \text{mm}$ v závislosti na zvětšení.

Hloubku ostrosti jsem určila na základě pěti experimentálních měření. Výsledné průměry hodnot jsou v tabulce 7.

Zvětšení	$11,6\times$	$24,44\times$	$37,28\times$	$50,12\times$	$62,96\times$	$75,8\times$
Hloubka ostrosti [μm]	126,79	58,52	34,14	26,82	19,5	17,07
Zvětšení	$88,64\times$	$101,48\times$	$114,32\times$	$127,16\times$	$140\times$	
Hloubka ostrosti [μm]	14,63	12,19	11,70	10,24	9,75	

Tabulka 7 Změřená hloubka ostrosti Konfigurace 2 mikroskopu pro 11 zvětšení.

Rozlišovací schopnost konfigurace mikroskopu testuji na Ronchiho mřížce se 120 lp/mm až 200 lp/mm. Pro porovnání rozlišovací schopnosti jsem zvolila zvětšení $140\times$, tedy největší možné zvětšení konfigurace 2, a zvětšení $75,8\times$, které je přibližně poloviční a větší než maximální zvětšení konfigurace 1. Z obrázku 19 vyplývá, že nejlepší rozlišovací schopnost mikroskopu se zvětšením $75,8\times$ je pro Ronchiho mřížku se 120 lp/mm, tj. $8,3\ \mu\text{m}$. Strmost křivky reprezentující rastr s 200 lp/mm je dána menší schopností rozlišit přechod mezi čarami. Pro zvětšení $140\times$ jsou křivky zašuměné. Nejlépe rozlišitelné jsou Ronchiho mřížky se 120 a 140 lp/mm.



Obrázek 19 Graf porovnání rozlišovací schopnosti konfigurace 2 pro dvě celková zvětšení.

4.1.3 Konfigurace 3

Tato konfigurace se skládá z objektivu se zvětšením $10\times$ a adaptéru se zvětšením $3,3\times$. Soustava adaptéru a tubusu mikroskopu dává zvětšení $1,91\times - 23,10\times$. Celkové zvětšení této optické soustavy je $\Gamma = 19,1\times - 231\times$.

Numerická apertura je stejná jako objektivu, tj. $A = 0,28$.

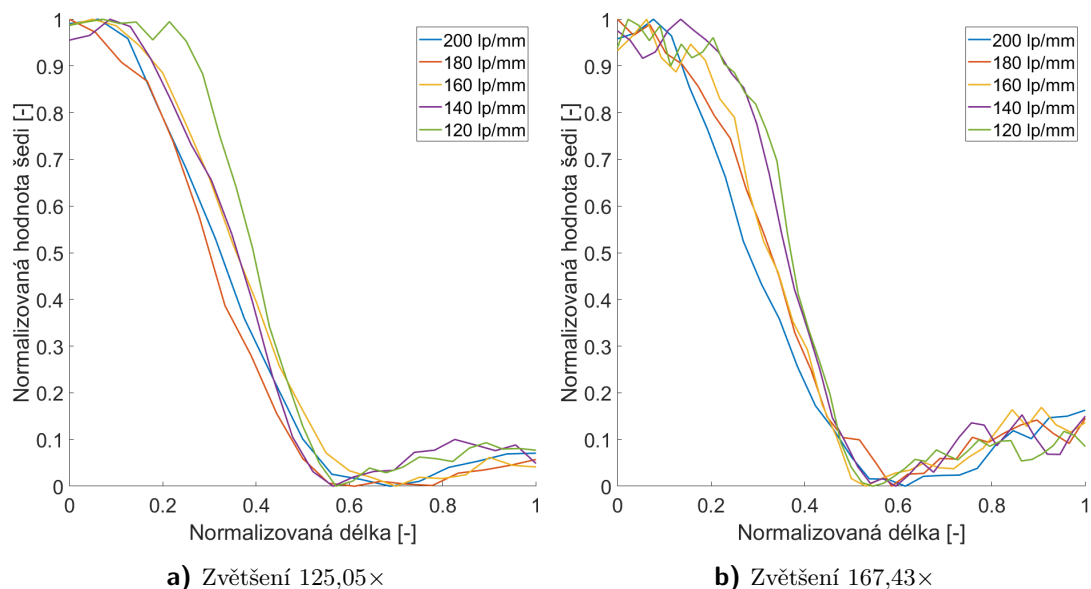
Průměr zorného pole jsem vypočítala z několika měření, jeho hodnota je přibližně $0,15 - 1,60$ mm v závislosti na zvětšení.

Hloubku ostrosti jsem určila na základě pěti experimentálních měření. Výsledné průměry hodnot jsou v tabulce 8. Tyto hloubky ostrosti jsou podobné jako v předešlých dvou konfiguracích.

Zvětšení	19,10×	40,29×	61,48×	82,67×	103,86×	125,05×
Hloubka ostrosti [μm]	97,53	58,52	34,14	29,26	22,43	20,48
Zvětšení	146,24×	167,43×	188,62×	209,81×	231×	
Hloubka ostrosti [μm]	17,07	16,09	14,63	12,19	9,75	

Tabulka 8 Změřená hloubka ostrosti Konfigurace 3 mikroskopu pro 11 zvětšení.

Rozlišovací schopnost konfigurace mikroskopu testuji na Ronchiho mřížce, která má od 120 lp/mm do 200 lp/mm. Pro porovnání rozlišovací schopnosti jsem zvolila zvětšení $167,43\times$, které je největší použitelné. Obraz pořízený ve vyšším zvětšení je příliš tmavý z důvodu nedostatku osvětlení. Z obrázku 20 vyplývá, že nejlepší rozlišení nastává při 120 lp/mm, tj. $8,3 \mu\text{m}$. Pro rastry s větším počtem čar jsou křivky rozlišitelnosti podobné. i zde si můžeme všimnout malé hodnoty šumu. Oproti tomu jsou křivky v grafu pro zvětšení $167,43\times$ více zašumělé. Nejlepší rozlišení je u Ronchiho mřížky se 140 lp/mm, tj. $7,14 \mu\text{m}$.



Obrázek 20 Graf porovnání rozlišovací schopnosti konfigurace 3 pro dvě celková zvětšení.

4.1.4 Konfigurace 4

Tato konfigurace se skládá z objektivu se zvětšením $50\times$ a adaptéru se zvětšením $1\times$. Soustava adaptéru a tubusu mikroskopu dává zvětšení $0,58\times - 7\times$. Celkové zvětšení této optické soustavy je $\Gamma = 29\times - 350\times$.

Numerická apertura je stejná jako objektivu, tj. $A = 0,55$.

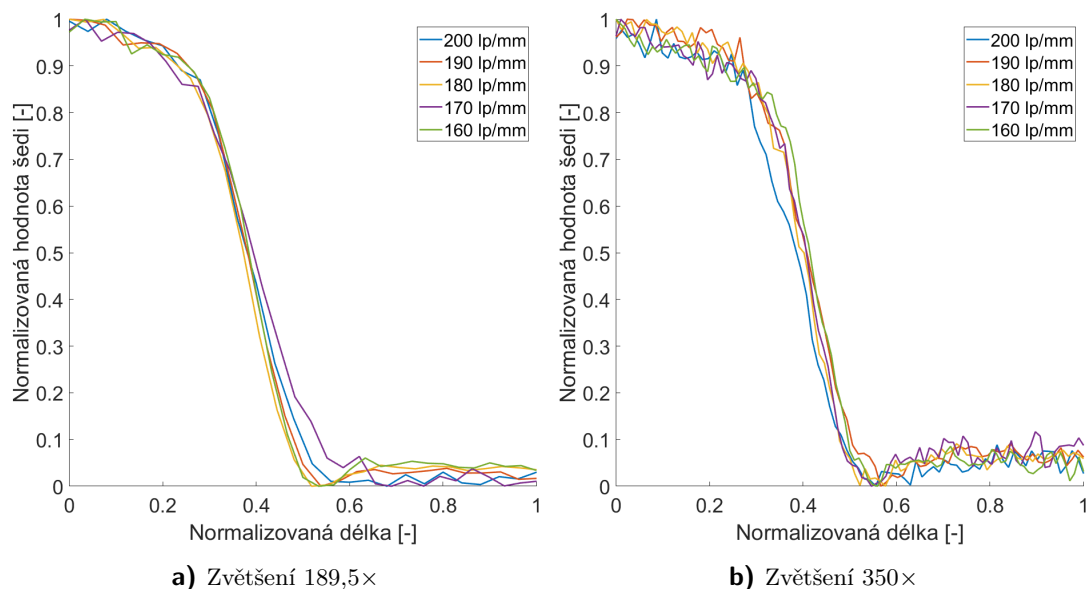
Průměr zorného pole jsem vypočítala z několika měření, jeho hodnota je přibližně $0,10 - 0,27$ mm v závislosti na zvětšení.

Hloubku ostrosti jsem určila na základě pěti experimentálních měření. Výsledné průměry hodnot jsou v tabulce 9. Je z nich patrné, že oproti objektivu s menším zvětšením je hloubka ostrosti v řádech mikrometrů. To je dáno menším vstupním úhlem objektivu. Výhodou ale je, že měření je přesnější. Kvůli malým hodnotám hloubky ostrosti jsem při měření byla omezena minimálním krokem, proto jsou výsledné hodnoty tak nepřesné.

Zvětšení	29,00×	61,10×	93,20×	125,30×	157,40 ×	189,50×
Hloubka ostrosti [μm]	4,87	3,41	2,92	2,44	2,44	2,92
Zvětšení	221,60×	253,70×	295,80×	317,90×	350,00×	
Hloubka ostrosti [μm]	2,44	2,92	2,44	1,95	1,95	

Tabulka 9 Změřená hloubka ostrosti Konfigurace 4 mikroskopu pro 11 zvětšení.

Rozlišovací schopnost konfigurace testuji na Ronchiho mřížce, která má od 160 lp/mm do 200 lp/mm. Pro porovnání rozlišovací schopnosti jsem zvolila zvětšení $350\times$, tedy největší možné zvětšení konfigurace 4, a zvětšení $189,5\times$, které je přibližně poloviční. Z obrázku 21 vyplývá, že pro obě zvětšení je rozlišení všech rastrů téměř stejné. Z toho plyne, že tato konfigurace má rozlišení lepší než $5 \mu\text{m}$.



Obrázek 21 Graf porovnání rozlišovací schopnosti konfigurace 4 pro dvě celková zvětšení.

4.1.5 Konfigurace 5

Tato konfigurace se skládá z objektivu se zvětšením $50\times$ a adaptéru se zvětšením $2\times$. Soustava adaptéru a tubusu mikroskopu dává zvětšení $1,16\times - 14\times$. Celkové zvětšení této optické soustavy je $\Gamma = 58\times - 700\times$.

Numerická apertura je stejná jako objektivu, tj. $A = 0,55$.

Průměr zorného pole vypočítaný z několika měření je přibližně $0,05 - 0,25$ mm v závislosti na zvětšení.

Hloubku ostrosti jsem určila na základě pěti experimentálních měření. Výsledné průměry hodnot jsou v tabulce 10. I zde je hloubka ostrosti v řádech mikrometrů. Hodnoty získané měřením jsou podobné jako v předešlé konfiguraci.

Zvětšení	$58\times$	$122,20\times$	$186,40\times$	$250,60\times$	$314,80\times$	$379,00\times$
Hloubka ostrosti [μm]	8,78	6,83	4,88	4,34	2,93	2,44
Zvětšení	$443,2\times$	$507,40\times$	$571,60\times$	$635,80\times$	$700,00\times$	
Hloubka ostrosti [μm]	2,44	1,95	2,44	1,95	1,95	

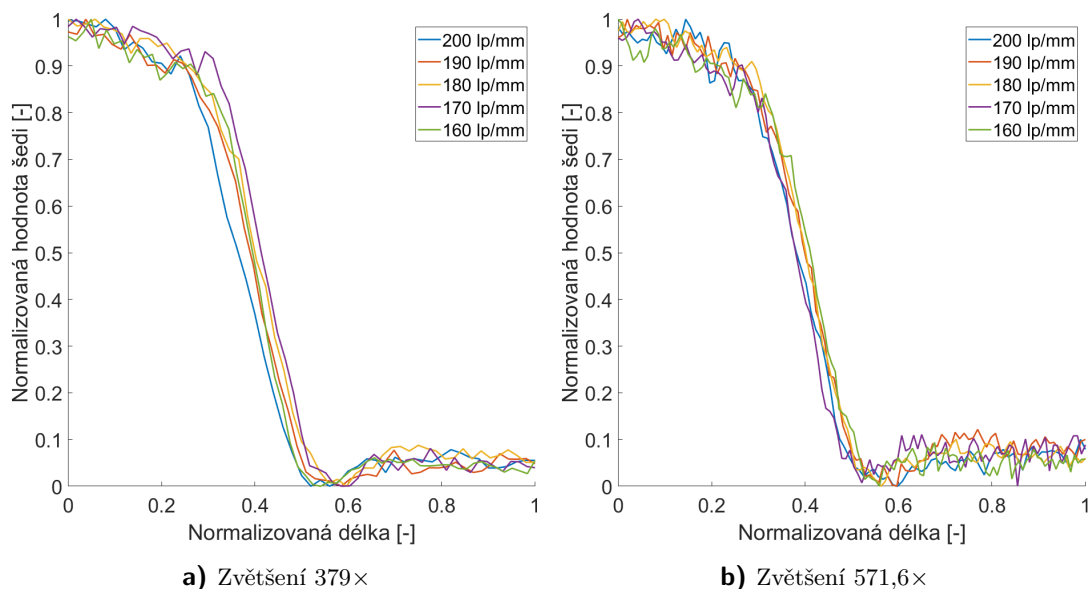
Tabulka 10 Změřená hloubka ostrosti Konfigurace 5 mikroskopu pro 11 zvětšení.

Rozlišovací schopnost konfigurace mikroskopu testuji na Ronchiho mřížce se 160 lp/mm až 200 lp/mm. Pro porovnání rozlišovací schopnosti jsem zvolila zvětšení $571,6\times$, tedy největší použitelné zvětšení konfigurace 5, a zvětšení $379\times$, které je přibližně poloviční oproti maximálnímu zvětšení. Z obrázku 22 vyplývá, že nejlepší rozlišení je pro 200 lp/mm tedy 5 μm .

4.1.6 Konfigurace 6

Tato konfigurace se skládá z objektivu se zvětšením $50\times$ a adaptéru se zvětšením $3,3\times$. Soustava adaptéru a tubusu mikroskopu dává zvětšení $1,91\times - 23,10\times$. Celkové zvětšení této optické soustavy je $\Gamma = 95,5\times - 1155\times$.

Numerická apertura je stejná jako objektivu, tj. $A = 0,55$.



Obrázek 22 Graf porovnání rozlišovací schopnosti konfigurace 5 pro dvě celková zvětšení.

Průměr zorného pole jsem vypočítala z několika měření, jeho hodnota je přibližně 0,03 - 0,25 mm v závislosti na zvětšení.

Hloubku ostrosti jsem určila na základě pěti experimentálních měření. Výsledné průměry hodnot jsou v tabulce 11. Výsledná hloubka ostrosti je v řádech mikrometrů a nepodařilo se mi tak naměřit dostatečně přesná data.

Zvětšení	95,50×	201,45×	307,40×	413,35×	519,30×	625,25×
Hloubka ostrosti [μm]	6,34	3,90	2,93	1,95	2,44	2,93
Zvětšení	731,20×	837,15×	943,10×	1049,05×	1155,00×	
Hloubka ostrosti [μm]	2,93	3,41	2,93	2,93	1,47	

Tabulka 11 Změřená hloubka ostrosti Konfigurace 6 mikroskopu pro 11 zvětšení.

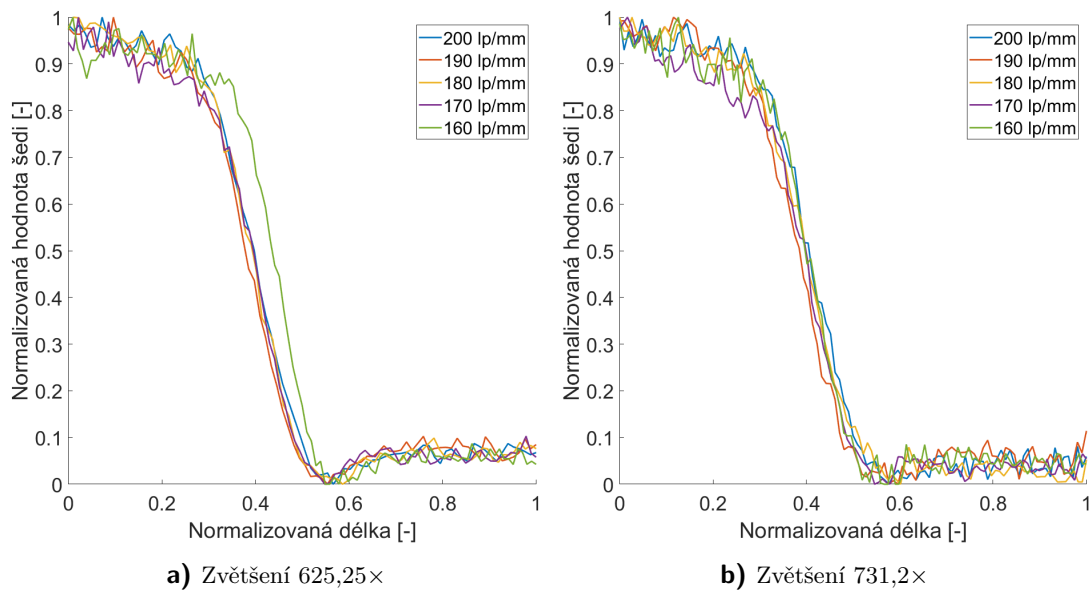
Rozlišovací schopnost konfigurace mikroskopu testuji na Ronchiho mřížce, která má od 160 lp/mm do 200 lp/mm. Pro porovnání rozlišovací schopnosti jsem zvolila zvětšení 731,2×, tedy největší použitelné zvětšení, a zvětšení 625,25×, které je přibližně poloviční hodnoty maximálního zvětšení. Pro zvětšení větší než 731,2× byli snímky tmavé z důvodu nedostatku osvětlení. Z obrázku 23 můžeme vidět, že rozlišení je lepší než 200 lp/mm, tedy 5 μm .

4.1.7 Výsledné zhodocení konfigurací 1 až 6

Na základě předešlých grafů je patrné, že u konfigurací tvořených objektivem se zvětšením 10 × lze dosáhnout nejlepšího rozlišení 3,6 μm . U konfigurací s objektivem se zvětšením 50 × lze dosáhnout maximální hodnoty rozlišení 2,5 μm . U konfigurací 3 a 6 se v důsledku nedostatečného osvětlení nedají používat nejvyšší hodnoty zvětšení.

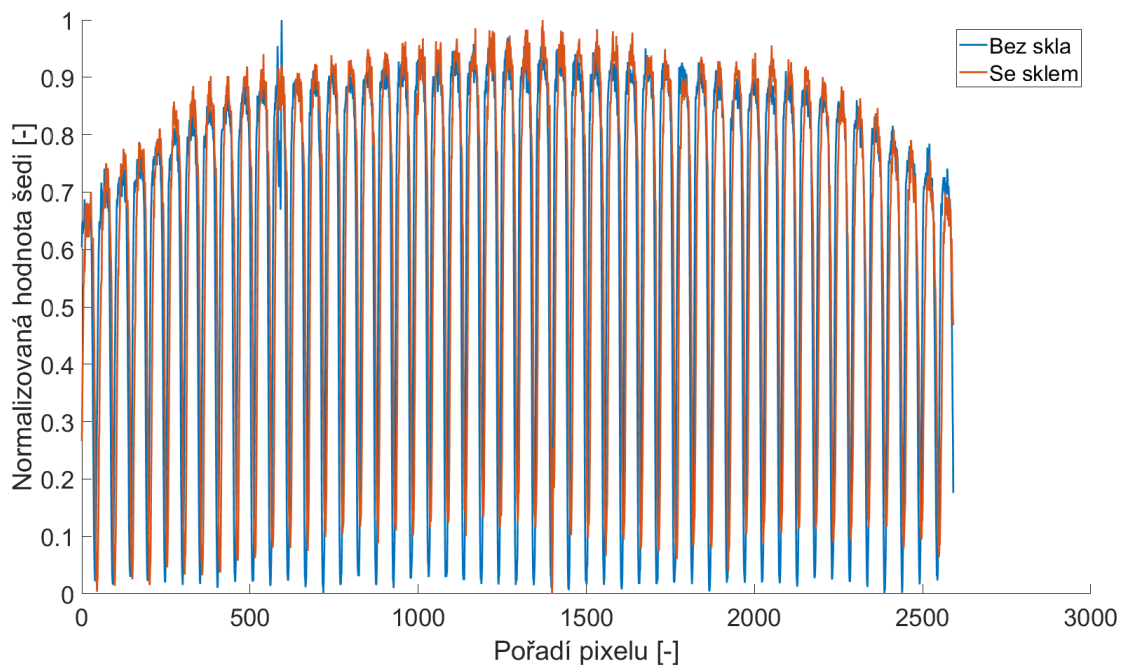
4.1.8 Vliv vloženého sklíčka na zobrazení standardních konfigurací

V rámci testování vlastností mikroskopu jsem testovala také vliv sklíčka o tloušťce 3 mm umístěného mezi předmět a objektiv. Na obrázcích 24 a 25 je znázorněn graf hodnot

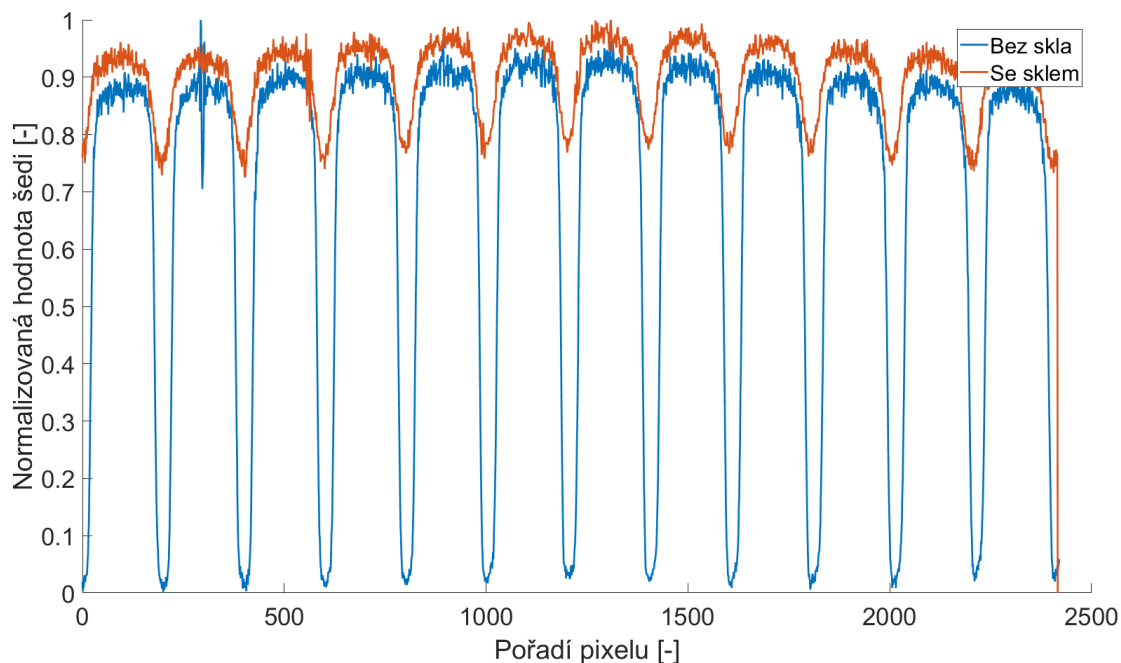


Obrázek 23 Graf porovnání rozlišovací schopnosti konfigurace 6 pro dvě celková zvětšení.

šedi jednotlivých pixelů. Z obrázku 24 je patrné, že sklo téměř nemá vliv na výsledný obraz. Dochází jen k jeho malému rozostření. Oproti tomu na obrázku 25 lze vidět, že dochází k výraznému úbytku kontrastu a částečnému rozostření.



Obrázek 24 Graf hodnot šedi snímku vytvořeného s použitím a bez použití sklíčka umístěného v prostoru objektivu se zvětšením 10×

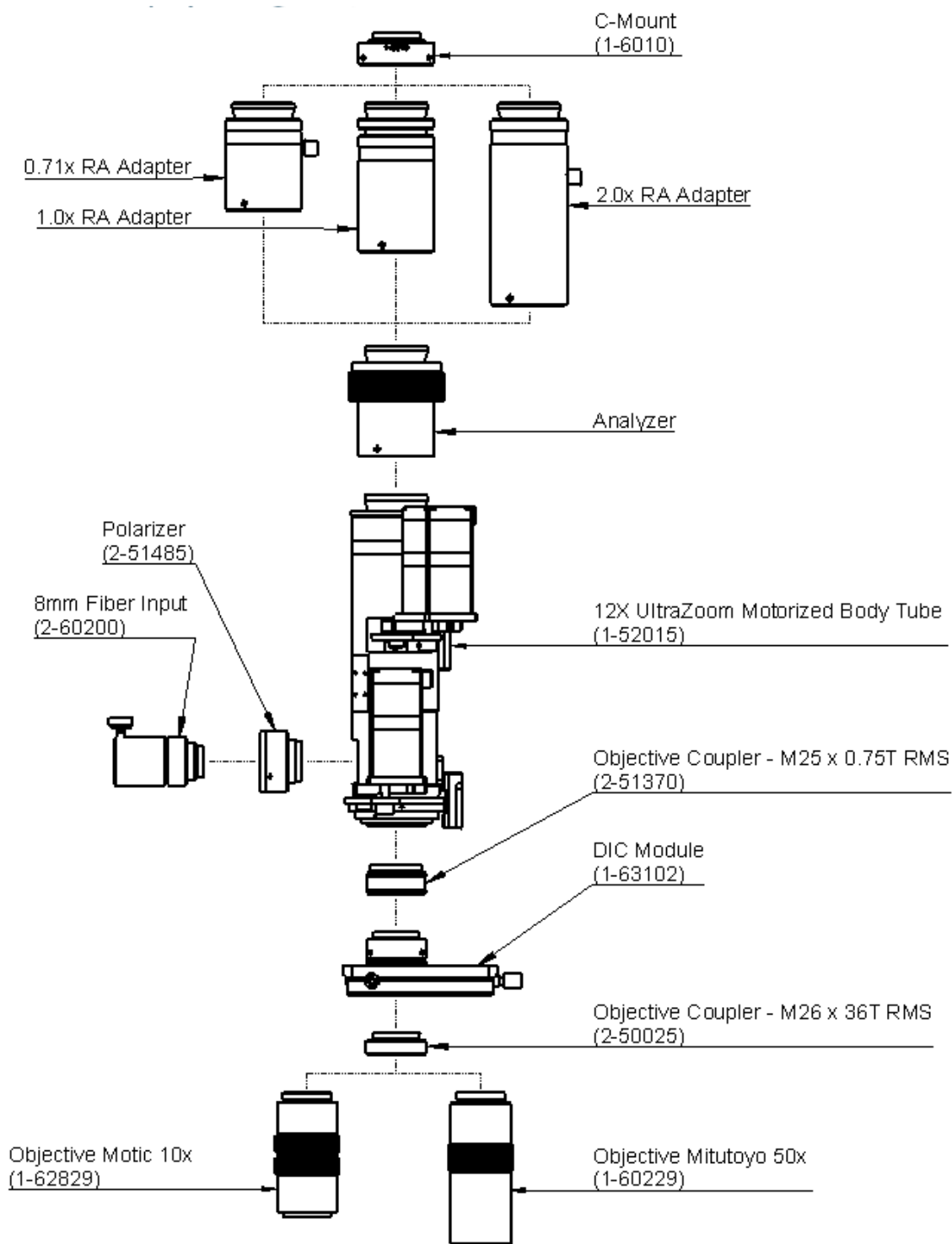


Obrázek 25 Graf hodnot šedi snímku vytvořeného s použitím a bez použití sklíčka umístěného v prostoru objektivu se zvětšením $50\times$

4.2 DIC konfigurace

Tato konfigurace je vytvořena na základní konfiguraci přidáním dílů pro použití metody diferenciálního interferenčního kontrastu podle Nomarského (DIC Nomarski). Principem této metody je interference dvou vlnových polí díky páru Wollastonových hranolů a páru zkřížených polarizátorů, z nichž první pole (předmětové) interaguje s předmětem a druhé pole je referenční. Referenčním polem je v tomto případě modifikované předmětové pole. Nomarského diferenciální interferenční kontrast tak umožňuje interferenci světelných příspěvků od sousedních míst na vzorku, které jsou od sebe vzdálené méně, než je rozlišovací schopnost mikroskopu. Wollastonův hranol tvoří dva křemenné klíny slepené kanadským balzámem. Osy klínů jsou kolmé navzájem i ke směru dopadajícího světla.

DIC konfigurace je na schématu 26. Je složena z kamery připevněné pomocí C-spojky k jednomu ze tří adaptérů. Ty se liší rozdílným zvětšením, která jsou $0,71\times$, $1,0\times$ a $2,0\times$. Všechny tři adaptéry zavádí v optické ose ohyb o 90° , takže výsledný obraz je zrcadlen (čte se z prava do leva) [11]. Takovéto adaptéry nesou označení RA z anglického výrazu Right Angle (Pravoúhlý). K jednomu z adaptérů je dále připevněn analyzátor, který zobrazuje rovinu polarizace. Analyzátor je připevněn k motorizovanému tubusu mikroskopu, ke kterému je z boku připevněn polarizátor. Z druhé koncové strany tubusu je pomocí objektivové spojky připevněn DIC modul, díky kterému dochází k jasnému rozlišení vyšších a nižších míst na vzorku. K DIC modulu je pomocí další objektivové spojky připevněn jeden z objektivů. Osvětlovací soustava je stejná jako u základní konfigurace, jen je použit vstup pro optické vlákno s průhlednou čočkou.

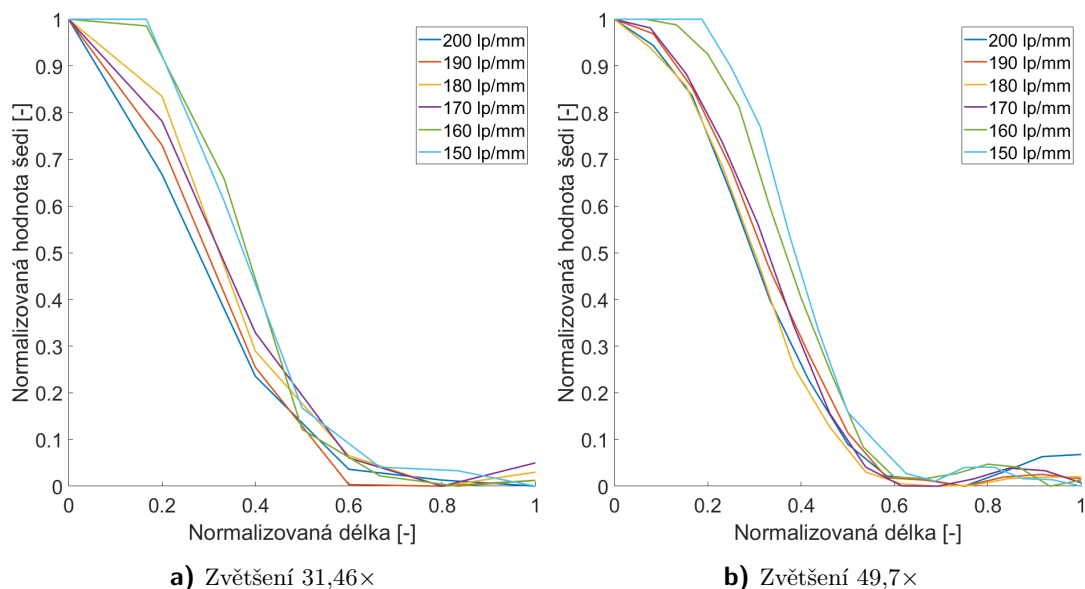


Obrázek 26 Schéma DIC konfigurace mikroskopu.

4.2.1 Konfigurace 7

Tato konfigurace se skládá z objektivu se zvětšením $50\times$ a adaptéru se zvětšením $3,3\times$. Soustava adaptéru a tubusu mikroskopu dává zvětšení $0,41\times - 4,97\times$. Celkové zvětšení této optické soustavy je $\Gamma = 4,1\times - 49,7\times$.

Numerická apertura je stejná jako objektivu, tj. $A = 0,28$.



Obrázek 27 Graf porovnání rozlišovací schopnosti konfigurace 7 pro dvě celková zvětšení.

Průměr zorného pole jsem vypočítala z několika měření, jeho hodnota je přibližně 0,67 - 0,98 mm v závislosti na zvětšení.

Hloubku ostrosti jsem určila na základě pěti experimentálních měření. Výsledné průměry hodnot jsou v tabulce 12.

Zvětšení	4,1×	8,66×	13,22×	17,78×	22,34×	26,9×
Hloubka ostrosti [μm]	190,06	73,10	48,73	38,99	34,11	21,93
Zvětšení	31,46×	36,02×	40,58×	45,14×	49,70×	
Hloubka ostrosti [μm]	19,49	18,52	18,03	18,03	17,06	

Tabulka 12 Změřená hloubka ostrosti Konfigurace 7 mikroskopu pro 11 zvětšení.

Rozlišovací schopnost konfigurace mikroskopu testuji na Ronchiho mřížce, která má od 150 lp/mm do 200 lp/mm. Pro porovnání rozlišovací schopnosti jsem zvolila zvětšení 49,7 \times , tedy největší možné zvětšení konfigurace, a zvětšení 31,46 \times . Z obrázku 27 vyplývá, že rozlišovací schopnost obou zvětšení je nejlepší u rastru se 150 lp/mm, tj. 6,67 μm .

4.2.2 Konfigurace 8

Tato konfigurace se skládá z objektivu se zvětšením 10 \times a adaptéru se zvětšením 1 \times . Soustava adaptéru a tubusu mikroskopu dává zvětšení 0,58 \times - 7 \times . Celkové zvětšení této optické soustavy je $\Gamma = 5,8\times - 70\times$.

Numerická apertura je stejná jako objektivu, tj. $A = 0,28$.

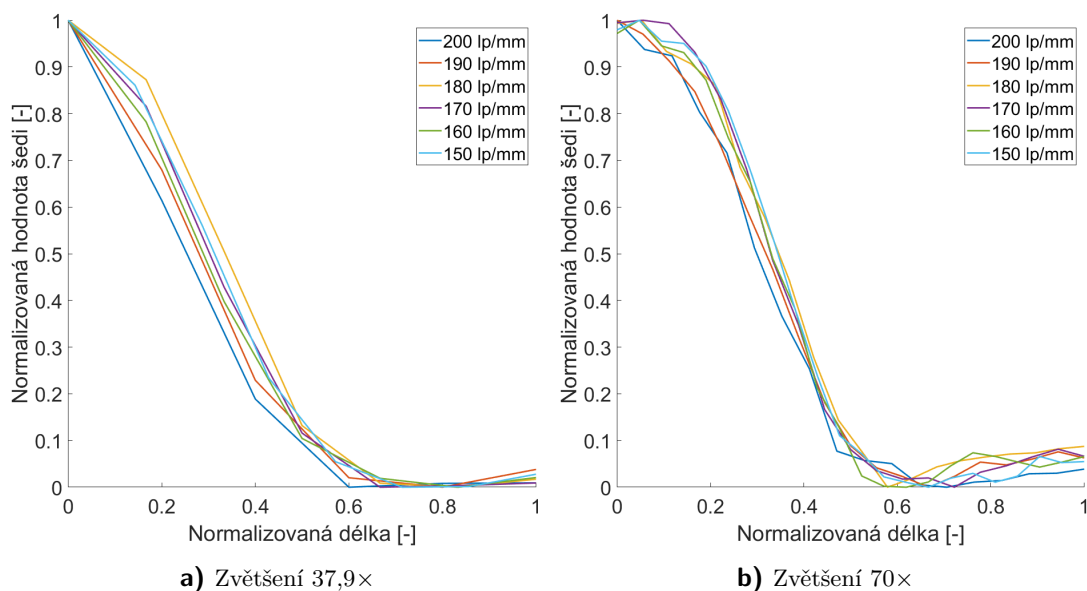
Průměr zorného pole jsem vypočítala z několika měření, jeho hodnota je přibližně 0,50 - 1,03 mm v závislosti na zvětšení. Čím je zvětšení větší, tím je zorné pole menší.

Hloubku ostrosti jsem určila na základě pěti experimentálních měření. Výsledné průměry hodnot jsou v tabulce 13.

Rozlišovací schopnost konfigurace mikroskopu testuji na Ronchiho mřížce, která má od 150 lp/mm do 200 lp/mm. Pro porovnání rozlišovací schopnosti jsem zvolila zvětšení

Zvětšení	5,8×	12,22×	18,64×	25,06×	31,48×	37,9×
Hloubka ostrosti [μm]	195,06	92,65	53,64	48,76	39,01	34,14
Zvětšení	44,32×	50,74×	57,16×	63,58×	70×	
Hloubka ostrosti [μm]	26,82	20,97	17,07	16,09	9,27	

Tabulka 13 Změřená hloubka ostrosti Konfigurace 8 mikroskopu pro 11 zvětšení.



Obrázek 28 Graf porovnání rozlišovací schopnosti konfigurace 8 pro dvě celková zvětšení.

70×, tedy největší možné zvětšení, a zvětšení 37,9×, které je přibližně poloviční. Z obrázku 28 vyplývá, že nejlepší rozlišovací schopnost je pro Ronchiho mřížkuse 180 lp/mm, tj. 5,55 μm .

4.2.3 Konfigurace 9

Tato konfigurace se skládá z objektivu se zvětšením 10× a adaptéru se zvětšením 2×. Soustava adaptéru a tubusu mikroskopu dává zvětšení 1,16× - 14×. Celkové zvětšení této optické soustavy je $\Gamma = 11,6\times - 140\times$.

Numerická apertura je stejná jako objektivu, tj. $A = 0,28$.

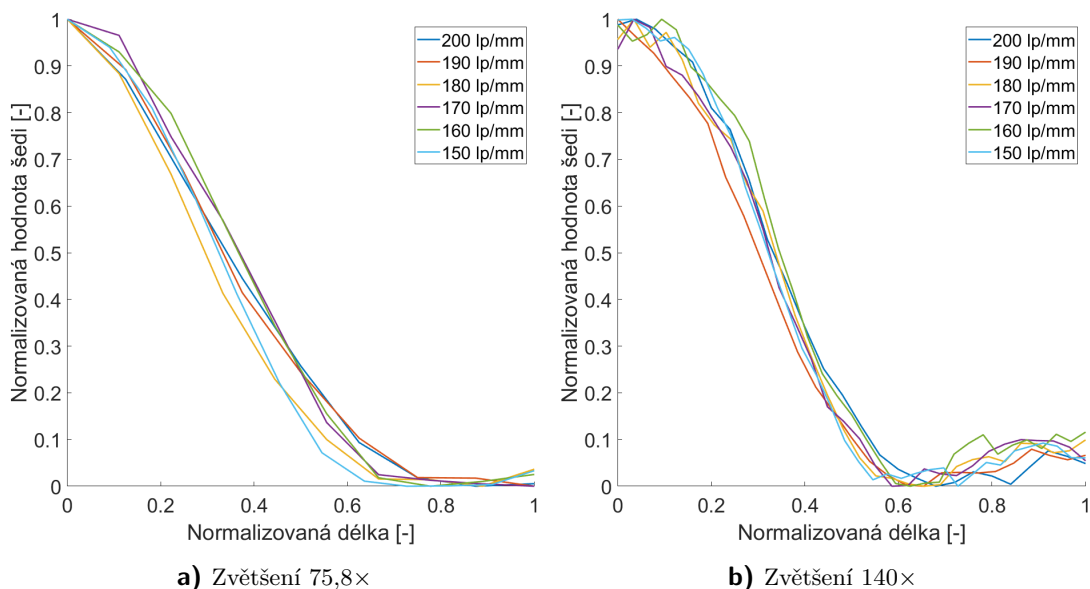
Průměr zorného pole vypočítaný z několika měření je přibližně 0,25 - 0,98 mm v závislosti na zvětšení.

Hloubku ostrosti jsem určila na základě pěti experimentálních měření. Výsledné průměry hodnot jsou v tabulce 14.

Zvětšení	11,6×	24,44×	37,28×	50,12×	62,96×	75,8×
Hloubka ostrosti [μm]	151,17	97,53	53,64	40,96	36,57	31,70
Zvětšení	88,64×	101,48×	114,32×	127,16×	140×	
Hloubka ostrosti [μm]	23,41	19,51	17,07	13,65	12,19	

Tabulka 14 Změřená hloubka ostrosti Konfigurace 9 mikroskopu pro 11 zvětšení.

Rozlišovací schopnost konfigurace mikroskopu testuji na Ronchiho mřížce se 150 lp/mm až 200 lp/mm. Pro porovnání rozlišovací schopnosti jsem zvolila zvětšení 140×,



Obrázek 29 Graf porovnání rozlišovací schopnosti konfigurace 9 pro dvě celková zvětšení.

tedy největší možné zvětšení konfigurace 2, a zvětšení 75,8×, které je přibližně poloviční. Z obrázku 29 vyplývá, že nejlepší rozlišení je pro rastr se 160 lp/mm, tj. $6,25\mu\text{m}$.

4.2.4 Konfigurace 10

Tato konfigurace se skládá z objektivu se zvětšením $50\times$ a adaptéru se zvětšením $3,3\times$. Soustava adaptéru a tubusu mikroskopu dává zvětšení $0,41\times - 4,97\times$. Celkové zvětšení této optické soustavy je $\Gamma = 20,5\times - 248,5\times$.

Numerická apertura je stejná jako objektivu, tj. $A = 0,55$.

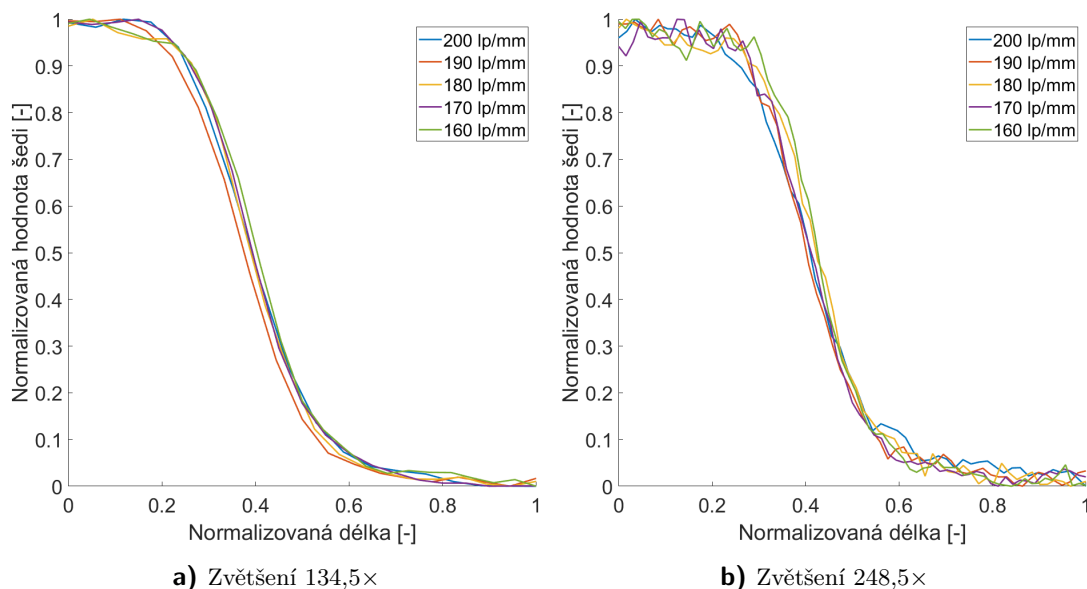
Průměr zorného pole jsem vypočetala z několika měření, jeho hodnota je přibližně $0,14 - 0,18\text{ mm}$ v závislosti na zvětšení.

Hloubku ostrosti jsem určila na základě pěti experimentálních měření. Výsledné průměry hodnot jsou v tabulce 15. výsledky měření jsou podobné jako výsledky základních konfigurací s objektivem se zvětšením $50\times$.

Zvětšení	20,50×	43,30×	66,10×	88,90×	111,70×	134,50×
Hloubka ostrosti [μm]	5,35	4,38	3,89	3,89	3,89	4,38
Zvětšení	157,30×	180,10×	202,90×	225,70×	248,50×	
Hloubka ostrosti [μm]	3,41	3,41	3,89	4,38	3,89	

Tabulka 15 Změřená hloubka ostrosti Konfigurace 10 mikroskopu pro 11 zvětšení.

Rozlišovací schopnost konfigurace mikroskopu testuji na Ronchiho mřížce, která má od 160 lp/mm do 200 lp/mm. Pro porovnání rozlišovací schopnosti jsem zvolila zvětšení 248,5×, tedy největší možné zvětšení konfigurace, a zvětšení 134,5×, které je přibližně poloviční. Z obrázku 30 vyplývá, rozlišovací schopnost je nejlepší u u křivky rastru s 200 lp/mm, tj. $5\mu\text{m}$. U větších zvětšení dochází k zašumění obrazu.



Obrazek 30 Graf porovnání rozlišovací schopnosti konfigurace 10 pro dvě celková zvětšení.

4.2.5 Konfigurace 11

Tato konfigurace se skládá z objektivu se zvětšením $50\times$ a adaptéru se zvětšením $1\times$. Soustava adaptéru a tubusu mikroskopu dává zvětšení $0,58\times - 7\times$. Celkové zvětšení této optické soustavy je $\Gamma = 29\times - 350\times$.

Numerická apertura je stejná jako objektivu, tj. $A = 0,55$.

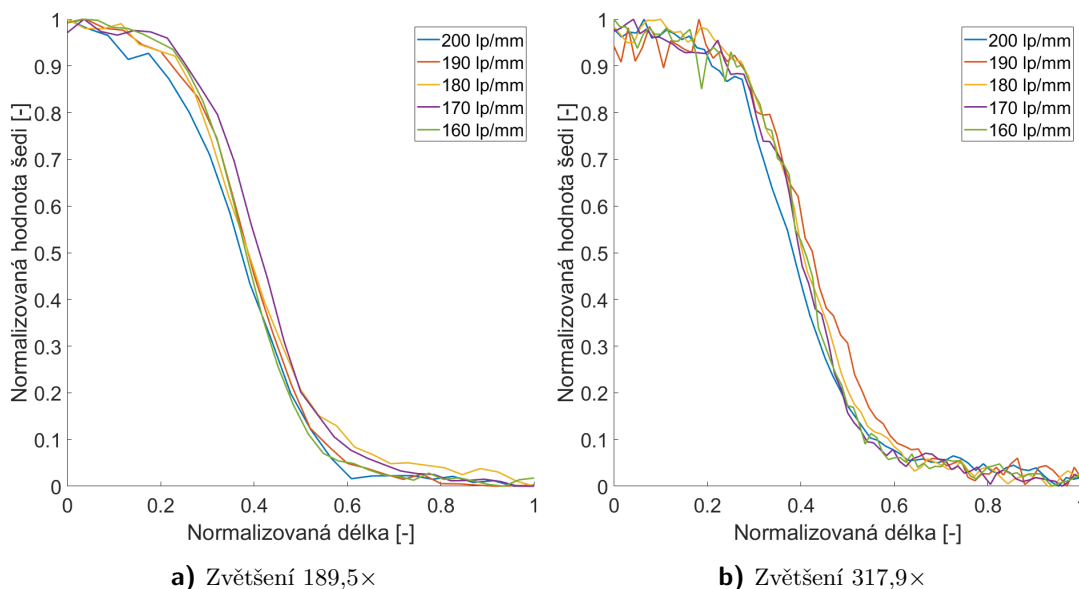
Průměr zorného pole jsem vypočítala z několika měření, jeho hodnota je přibližně $0,10 - 0,19$ mm v závislosti na zvětšení.

Hloubku ostrosti jsem určila na základě pěti experimentálních měření. Výsledné průměry hodnot jsou v tabulce 16. Je z nich patrné, že oproti objektivu s menším zvětšením je hloubka ostrosti v řádech mikrometrů. To je dáno menším vstupním úhlem objektivu. Výhodou ale je, že měření je přesnější. Kvůli malým hodnotám hloubky ostrosti jsem při měření byla omezena minimálním krokem, proto jsou výsledné hodnoty tak nepřesné.

Zvětšení	29,00×	61,10×	93,20×	125,30×	157,40 ×	189,50×
Hloubka ostrosti [μm]	5,35	4,86	3,89	3,89	4,38	3,90
Zvětšení	221,60×	253,70×	295,80×	317,90×	350,00×	
Hloubka ostrosti [μm]	3,41	3,41	2,82	3,41	4,38	

Tabulka 16 Změřená hloubka ostrosti Konfigurace 11 mikroskopu pro 11 zvětšení.

Rozlišovací schopnost konfigurace mikroskopu testuji na Ronchiho mřížce, která má od 160 lp/mm do 200 lp/mm. Pro porovnání rozlišovací schopnosti jsem zvolila zvětšení $317,9\times$, tedy největší použitelné zvětšení konfigurac, a zvětšení $189,5\times$. Z obrázku 31 je patrné, jak jsou čáry podobné a tak mohu usoudit, že nejlepším zvětšením je opět 5 μm .



Obrázek 31 Graf porovnání rozlišovací schopnosti konfigurace 11 pro dvě celková zvětšení.

4.2.6 Konfigurace 12

Tato konfigurace se skládá z objektivu se zvětšením $50\times$ a adaptéru se zvětšením $2\times$. Soustava adaptéru a tubusu mikroskopu dává zvětšení $1,16\times - 14\times$. Celkové zvětšení této optické soustavy je $\Gamma = 58\times - 700\times$.

Numerická apertura je stejná jako objektivu, tj. $A = 0,55$.

Průměr zorného pole vypočítaný z několika měření je přibližně $0,05 - 0,19$ mm v závislosti na zvětšení.

Hloubku ostrosti jsem určila na základě pěti experimentálních měření. Výsledné průměry hodnot jsou v tabulce 17. I zde je vidět, že hloubka ostrosti této konfigurace je v řádech mikrometrů.

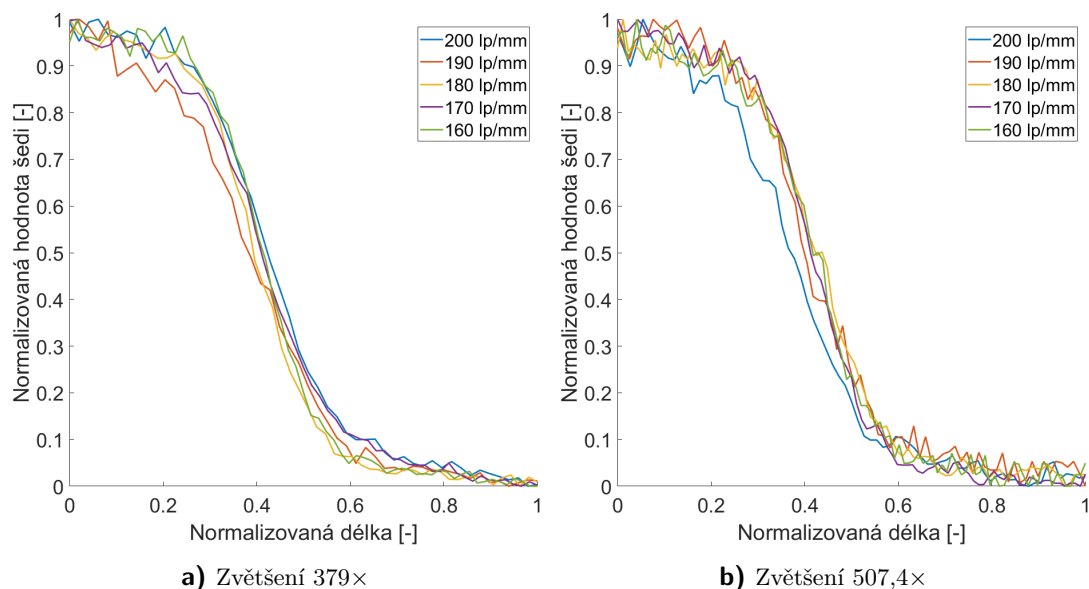
Zvětšení	$58\times$	$122,20\times$	$186,40\times$	$250,60\times$	$314,80\times$	$379,00\times$
Hloubka ostrosti [μm]	4,86	4,38	3,89	3,89	2,92	2,92
Zvětšení	$443,2\times$	$507,40\times$	$571,60\times$	$635,80\times$	$700,00\times$	
Hloubka ostrosti [μm]	3,41	3,89	2,92	2,43	2,43	

Tabulka 17 Změřená hloubka ostrosti Konfigurace 12 mikroskopu pro 11 zvětšení.

Rozlišovací schopnost konfigurace mikroskopu testuji na Ronchiho mřížce se 160 lp/mm až 200 lp/mm. Pro porovnání rozlišovací schopnosti jsem zvolila zvětšení $507,4\times$, tedy největší použitelné zvětšení konfigurace, a zvětšení $379\times$. Z obrázku 32 vyplývá, že nejlepší rozlišení je u rastru s 200 lp/mm, tj. $5 \mu\text{m}$.

4.2.7 Zhodnocení konfigurací 7 až 12

Na základě předešlých grafů je patrné, že vlastnosti všech DIC konfigurací jsou podobné jako vlastnosti standardních konfigurací. Pro konfigurace s objektivem se zvětšením $10\times$ se nedosáhlo nejlepšího rozlišení 200 lp/mm. Naopak tohoto rozlišení vždy dosáhnou konfigurace s objektivem se zvětšením $50\times$. Na základě několika mnou vytvořených obrázků mohu konstatovat, že rozlišení těchto konfigurací je lepší než $1 \mu\text{m}$. U konfigurací

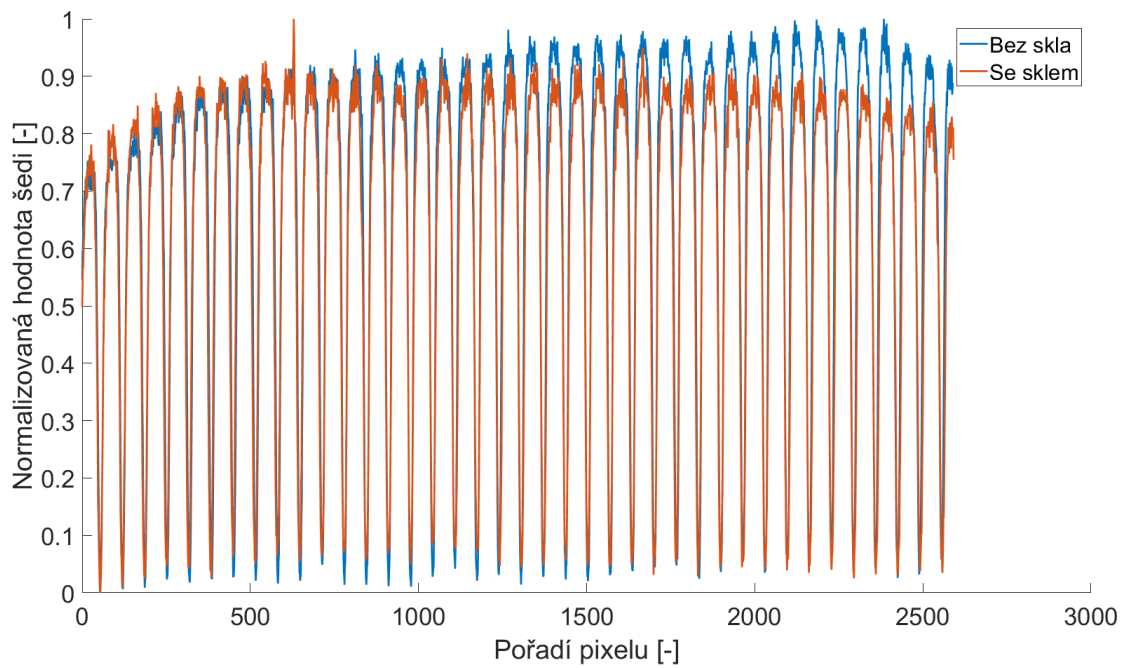


Obrázek 32 Graf porovnání rozlišovací schopnosti konfigurace 5 pro dvě celková zvětšení.

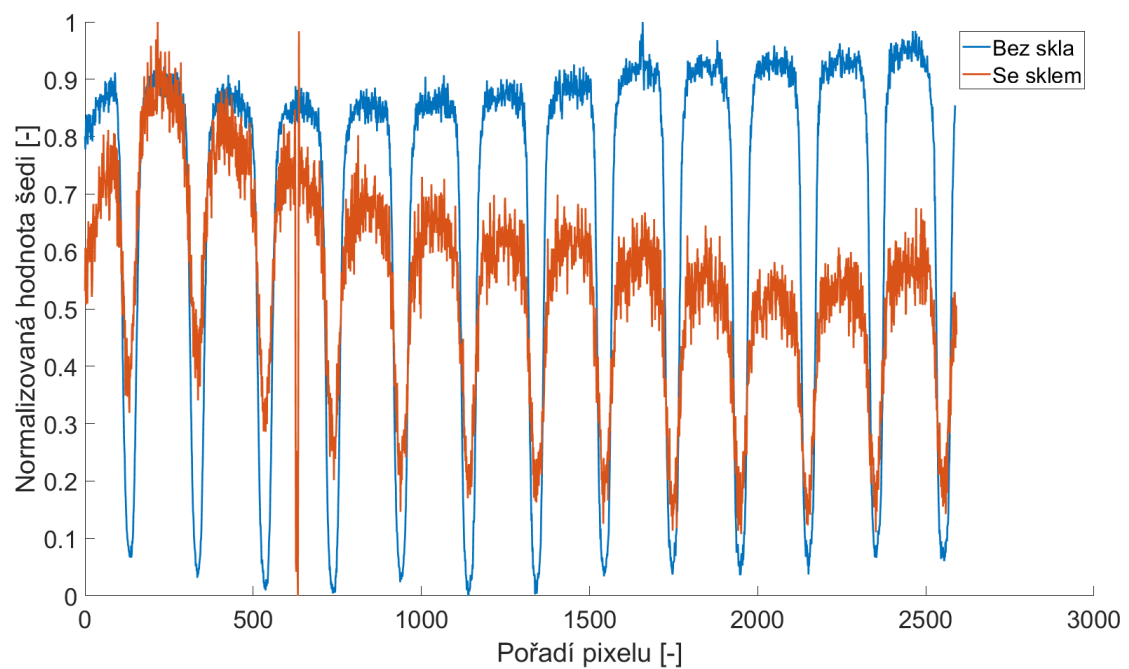
7, 11 a 12 dochází pro velká zvětšení k nedostatku osvětlení vzorku a z tohoto důvodu se nedají používat.

4.2.8 Vliv vloženého sklíčka na zobrazení DIC konfigurací

V rámci testování vlastností DIC konfigurací jsem testovala také vliv sklíčka o tloušťce 3 mm umístěného mezi předmět a objektiv. Na obrázcích 33 a 34 je znázorněn graf hodnot šedi jednotlivých pixelů. Z obrázku 33 lze vidět, že i v tomto případě nemá sklo výrazný vliv na výsledný obraz. Dochází jen k jeho částečnému rozostření. Zatímco na obrázku 34 je možné vidět, že dochází k výraznému úbytku kontrastu z důvodu vypouklosti sklíčka. Především pak dochází k soudkovitému zklenutí obrazu.



Obrázek 33 Graf hodnot šedi snímku vytvořeného s použitím a bez použití sklíčka umístěného v prostoru objektivu se zvětšením $10\times$



Obrázek 34 Graf hodnot šedi snímku vytvořeného s použitím a bez použití sklíčka umístěného v prostoru objektivu se zvětšením $50\times$

5 Návrh konstrukce manipulátoru

Konstrukční část projektu AbloCAM se skládá z několika částí. Těmi jsou: návrh manipulátoru, návrh vakuové komory a návrh uchycení mikroskopu. Manipulátor je zařízení, které umožňuje veškerý pohyb terče. Návrh vakuové komory není součástí této práce. Pro bližší představu nyní popíšu konstrukci AbloCAMu.

Vakuová komora bude připevněna na horní přírubu CF200 hlavní interakční komory. Tyto dvě komory budou odděleny pneumatickým vakuovým ventilem DN200. Ke komoře bude z jedné boční strany připevněna turbomolekulární vývěva, která bude v komoře vytvářet vakuum o hodnotě přibližně 10^{-7} mbar. K víku vakuové komory bude připevněn mikroskop, kterým lze pozorovat povrch terče skrz vakuové okénko. Vedle mikroskopu bude na přírubu připevněn vakuový Z-manipulátor, který zajišťuje lineární posuv. Součástí komory budou také konektory pro připojení kabelů elektricky ovládaných dílů uvnitř komory. V neposlední řadě bude komora vybavena napouštěcím ventilem a otevíratelným portem, který umožní výměnu vzorků bez narušení vakua v hlavní interakční komoře, tedy při uzavřeném oddělovacím pneumatickém ventilu. Komora tedy bude fungovat jako přechodová (anglicky airlock).

Manipulátor bude používán in-situ i ex-situ. Jelikož jsou stolky primárně určeny pro použití ve vakuu, posílají je firmy rovnou vakuově kompatibilní a vakuově zabalené. Rozbalení stolků se provede až v místnosti, kde je vakuová komora. Tato místnost je bezprašná se stálou teplotou a vlhkostí. Proto zde mohou být pohybové stolky používány jak in-situ, tak ex-situ, aniž by došlo k jejich znečištění.

Pokud jsou nějaké díly, které přijdou do vakua, vystaveny běžným podmínkám, musí se provést jejich rozebrání a vyčištění. Postup čištění má tři fáze. V první fázi se díl umístí do ultrazvukové myčky, která je naplněna acetonem. Ten se rychle vypařuje a tak neodstraní všechna rezidua. Proto následuje druhá fáze, kdy se díl ponoří do izopropanolu v ultrazvukové myčce. Výhodnou vlastností izopropanolu je, že se vypařuje beze zbytku. Třetí fází je omytí dílu ponořením do deionizované nebo destilované vody. Takto vyčištěné díly se už mohou opět použít ve vakuu. Pokud se rozebral například pohybový stolek, před složením se znovu promaže.

5.1 Manipulátor vzorků

V této sekci popíšu návrh konstrukce manipulátoru vzorků. Manipulátor bude používán na konkrétním laserovém zařízení, z čehož plynou určité požadavky. Prvním z nich je rozsah pohybů, kterým jsme se zabývali v kapitole 3.1. Dalším požadavkem je průchod manipulátoru skrz přírubu CF200. Jelikož bude manipulátor pracovat ve vakuu o maximální hodnotě 10^{-7} mbar, jsou kladeny požadavky i na materiál, ze kterého bude vyroben. Připomeňme, že materiály nevhodné do vakua jsou zinek, plasty a organické materiály. Posledním požadavkem je sestavení manipulátoru z cenově dostupných pohybových stolků.

Na základě mé rešerše jsem se rozhodla použít výrobky firmy Smaract nebo Xeryon, protože obě tyto firmy nabízí pohybové stolky i do ultra-vysokého vakua. Výrobky obou firem jsou podobné, avšak výrobky firmy Xeryon jsou cenově přijatelnější a jejich

pohybové stolky jsou modulárnější. Na základě pohybových rozsahů a přesnosti jsem zvolila následující stolky: lineární stolky XLS-1-40-1250, XLS-1-80-1250 a rotační stolek XRT-U-30-109. Pohyb všech těchto tří stolků je dán ultrazvukovým piezomotorem [10]. Přesné parametry stolků jsou v tabulkách 18 a 19. Z nich můžeme vyčíst, že nosnost pohybových stolků v základní horizontální pozici je 500 g. Nosnost ve vertikální poloze je sice nižší, ale pro naše účely stále dostačující.

Pojďme se tedy postupně podívat na celý návrh manipulátoru. Směry os jsou stejné jako na obrázku 5, tedy osa z je ve směru paprsku, osa x je na tuto osu horizontálně kolmá a osa y je vertikálně kolmá. Nejprve je nutné začít od samotného držáku vzorků. Jeho velikost a tvar se odvíjí od počtu a rozměru vzorků. Pro můj návrh je použit konkrétní držák ve tvaru U, který má na každé straně připevněnu destičku o rozměru 10x20 mm a CCD snímač pro pomocné určení polohy manipulátoru a nastavení autokolimace. Materiálem držáku je dural. Tento držák je připevněn k lineárnímu pohybovému stolku XLS-1-40-1250 (obrázek 36), který zaručuje přesný pohyb v ose y v rozsahu 27 mm. Pohybem stolku lze umístit vzorky do pracovní vzdálenosti mikroskopu. Lineární stolek je připevněn ke druhému shodnému stolku XLS-1-40-1250 pootočeném o 90° kolem osy y . Pohyb tohoto stolku je použit pro změnu pozice laserového svazku na vzorku. Lineární stolek je připevněn k rotačnímu stolku pomocí spojovací desky. Rotační stolek (obrázek 37) se otáčí v rozsahu 360° a umožňuje tak změnu pozice držáku vzorků a úhlovou kompenzaci ve směru osy x . Výkres spojovací desky je na obrázku 38, deska je z duralu a váží přibližně 10g.

Parametry	XLS-1-40-1250	XLS-1-80-1250
Rozměr [mm]	40 × 34 × 13	80 × 34 × 13
Posuv [mm]	27	50
Hmotnost [g]	50	105
Nosnost [kg]	<0,5	
Maximální únosná síla vertikální [N]	396	792
Maximální únosná síla laterální [N]	396	792
Přidrzná síla [N]	1	
Hnací síla [N]	1	
Typ enkodéru	induktivní, inkrementální	
Rozlišení enkodéru [μm]	1,25	
Rozlišení polohy (= min. velikost kroku) [μm]	1,25	
Obousměrná opakovatelnost [μm]	2,5	
Maximální rychlost [mm/s]	200	
Minimální rychlost [$\mu\text{m/s}$]	2/5	
Stabilita rychlosti	$\pm 1\%$	

Tabulka 18 Tabulka parametrů lineárních stolků XLS-1-40-1250 a XLS-1-80-1250 [10].

Umístění rotačního stolku za lineárními je dáno jeho vyšší nosností ve vertikální pozici.

Pro zajištění hlavního posuvu ve směru osy x a z byl vybrán lineární stolek XLS-1-80-1250 (viz obrázek 35) s posuvem 50 mm. Výhodou těchto stolků je jejich snadné spojení do XY manipulátoru. Toto spojení je patrné z výkresů na obrázcích 35 a 36, kde jsou na vrchní posuvné části každého lineárního stolku vyvrtány čtyři závitové díry M1,6. Pro spojení jsou na spodní posuvné části též každého lineárního stolku vyrobeny čtyři díry pro šrouby se zápustnou hlavou, které jsou od sebe vzdáleny stejně jako závitové díry horní části. Chceme-li stolky spojit, stačí je na sebe postavit s kolmým

Parametry	XRT-U-30-109
Rozměr [mm]	40 × 35 × 21
průměr rotační části [mm]	32
Apertura [mm]	7
Hmotnost [g]	82
Nosnost [kg]	0,5
Maximální zatížení v axiálním směru [N]	25
Maximální zatížení v radiálním směru [N]	25
Přídržný moment [mNm]	7
Hnací moment [mNm]	14
Typ enkodéru	optický, inkrementální
Rozlišení enkodéru [μ rad]	109
Rozlišení polohy (= min. velikost kroku) [μ rad]	125
Obousměrná opakovatelnost [μ rad]	250
Maximální rychlost [/s]	720
Minimální rychlost [μ m/s]	0,008
Stabilita rychlosti	1%
Radiální chyba pohybu [μ m]	± 1 "point to point,,
Axiální chyba pohybu [μ m]	$\pm 0,5$ "point to point,,

Tabulka 19 Tabulka parametrů rotačního pohybového stolku XRT-U-30-109 [10].

pootočením a odsunutím vrchní posuvné části horního stolku se dostaneme k příslušným dírám pro šroub.

Jedním z požadavků pro návrh manipulátoru je možnost průchodu skrz přírubu CF200 s otvorem o průměru 200 mm. Vybrané lineární stolky XLS-1-80-1250 po kolmém spojení zabírají prostor o průměru 87 mm. Díky tomu je k dispozici dostatek prostoru na návrh jejich uchycení k hlavnímu lineárnímu posuvu.

Jak jsem již zmínila, nosnost lineárních stolků je největší, pokud jsou v základní horizontální pozici. Předešlou část manipulátoru (rotační stůl, lineární stolky, držák vzorků) tak umístíme nad spojené lineární stolky XLS-1-80-1250. Pro spojení těchto dvou částí jsem navrhla L profil, jehož výkres je na obrázku 39.

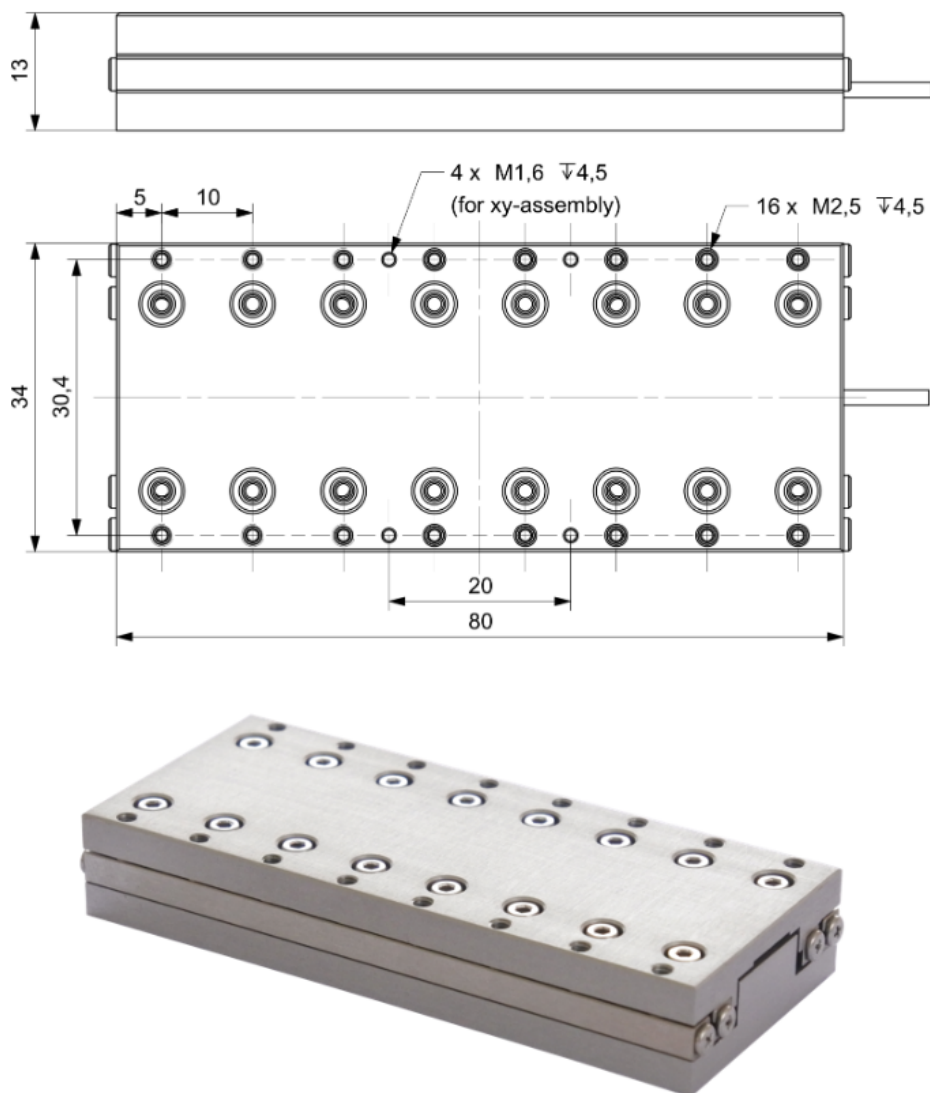
Výška L profilu 65 mm byla navržena tak, aby bylo možné otáčet lineárním stolkem s držákem vzorků v celém rozsahu 360° . Šířka 45 mm byla navržena vzhledem ke spojení L profilu s rotačním a lineárním stolkem. Tloušťka L profilu byla vypočítána na základě znalosti maximálního dovoleného ohybu. Vzorec pro jeho výpočet je určen z diferenciální rovnice průhybové čáry [14]:

$$\vartheta(x)'' = -\frac{M_O(x)}{EJ} \quad (15)$$

kde $M_O(x)$ je ohybový moment v místě x , E je Youngův modul pružnosti, J je kvadratický modul průřezu.

Pro zjednodušení výpočtu je L profil namáhán pouze momentem vzniklým působením váhy rotačního stolku, spojovací desky, lineárních stolků a maximálním zatížením lineárního stolku. Ohybový moment $M_O(x)$ se tedy rovná momentu M ($M_O(x) = M$). Dosadím-li ho do rovnice 15, můžu ji postupně zintegrovat:

$$\vartheta(x)' = -\frac{M}{EJ}x + C_1 \quad (16)$$



Obrázek 35 Lineární pohybový stolek s ultrazvukovým piezomotorem XLS-1-80-1250. Nahoře je výkres stolku, dole je jeho skutečná podoba [10].

$$\vartheta(x) = -\frac{M}{EJ} \cdot \frac{x^2}{2} + C_1x + C_2 \quad (17)$$

Derivace průhybové čáry (rovnice 16) je úhel natočení $\varphi(x)$ v místě x . Konstanty C_1 a C_2 určíme z okrajových podmínek:

1. Průhyb v místě $x = 0$ je nulový, tedy $\vartheta(0) = 0$.
2. Úhel natočení v místě $x = 0$ je nulový, tedy $\vartheta(0)' = 0$.

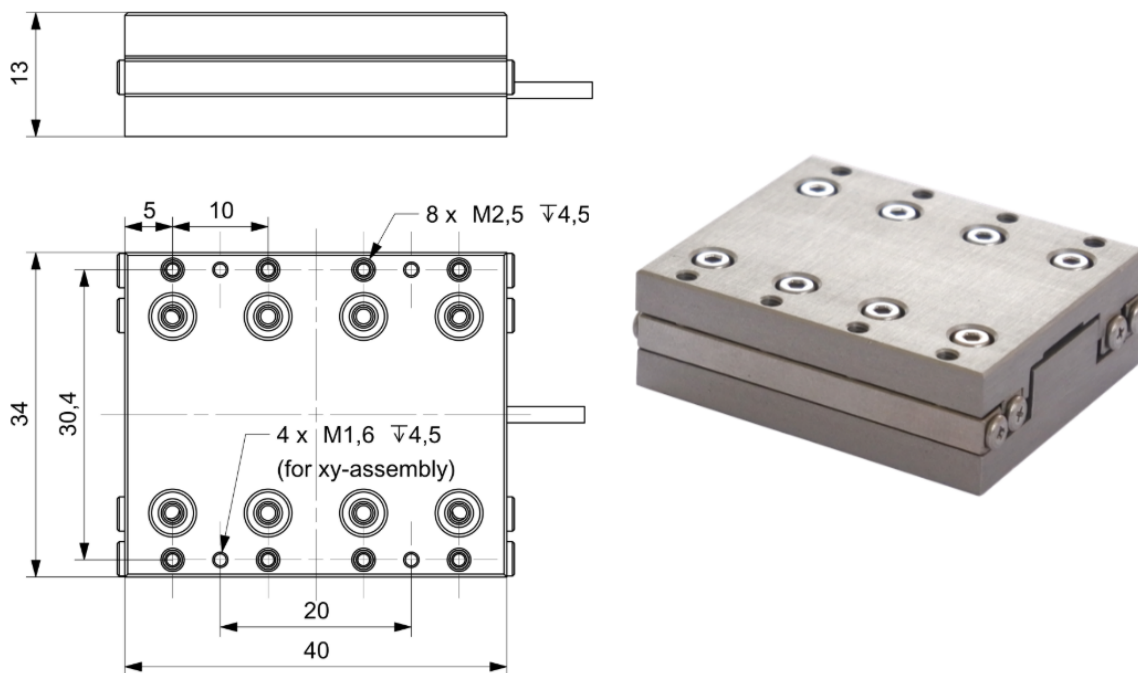
Z první podmínky plyne $C_2 = 0$. Z druhé podmínky plyne $C_1 = 0$.

Výslednou rovnicí je tedy:

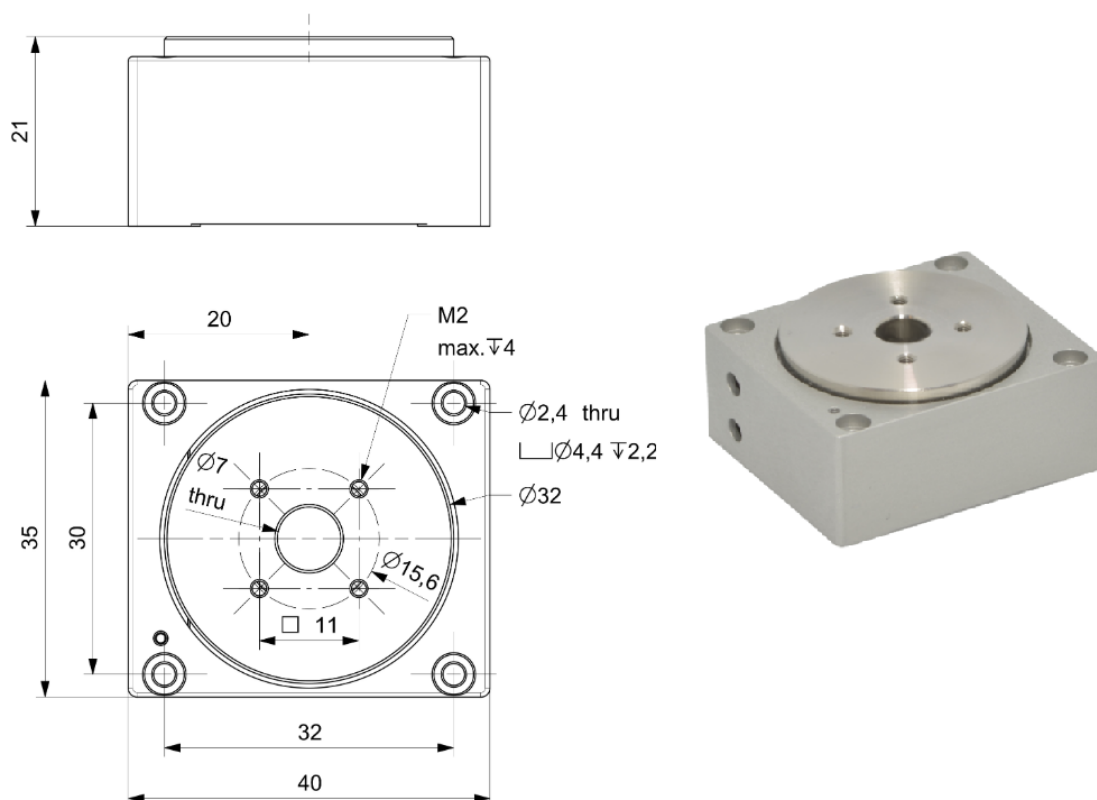
$$\vartheta(x) = -\frac{M}{EJ} \frac{x^2}{2} \quad (18)$$

Kvadratický modul J obdélníkového průřezu se vypočítá [14]:

$$J = \frac{1}{12}bt^3 \quad (19)$$



Obrázek 36 Lineární pohybový stolek s ultrazvukovým piezomotorem XLS-1-40-1250. Nalevo je výkres stolku, napravo je jeho skutečná podoba [10].



Obrázek 37 Rotační pohybový stolek s ultrazvukovým piezomotorem XRT-U-30-109. Nalevo je výkres stolku, napravo je jeho skutečná podoba [10].

kde b a t jsou strany obdélníkového průřezu.

Chci-li vypočítat tloušťku L profilu, dosadím rovnici (19) do rovnice (18) a za x dosadím výšku h L profilu. Nyní si mohu vyjádřit veličinu t , tedy tloušťku profilu jako:

$$t = \sqrt[3]{\frac{6Mh^2}{Eb\vartheta(h)}}. \quad (20)$$

Moment M se vypočítá:

$$M = G_{v1} \times x_{T_{v1}}. \quad (21)$$

kde G_{v1} je výsledná tíhová síla těžiště těles (držák vzorků, lineární stolky, spojovací deska, rotační stolek) a $x_{T_{v1}}$ je vzdálenost této síly od L profilu v ose x .

Obecné rovnice pro výpočet těžiště jsou [14]:

$$\begin{aligned} x_T \cdot G_v &= \sum x_i \cdot G_i \\ y_T \cdot G_v &= \sum y_i \cdot G_i \end{aligned} \quad (22)$$

kde x_T a y_T jsou souřadnice polohy těžiště, x_i a y_i jsou souřadnice polohy těžiště i -tého dílu, G_v je výsledná tíhová síla, G_i je tíhová síla i -tého dílu.

Dosazením hodnot z tabulky 20 mi vyjde tíhová síla $G_{v1} = 2,37$ N, vzdálenost od L profilu $x_{T_{v1}} = 33,60$ mm a výsledný moment $M = 0,079$ Nm.

Po dosazení hodnot $M = 0,079$ Nm; $E = 72$ GPa [15]; $h = 65$ mm; $b = 45$ mm; $\vartheta(h) = 1 \mu\text{m}$ do rovnice (20) mi vyjde tloušťka L profilu $t = 8,85$ mm. Velikost tloušťky volím pro menší ohyb $t = 10$ mm a zpětným dopočítáním je průhyb $\vartheta(h) = 0,69 \mu\text{m}$.

Díl	Tíhová síla dílu	x souřadnice polohy
Držák vzorků	$G_1 = 0,49$ N	$y_1 = 61,77$ mm
Lineární stolek XLS-1-40-1250	$G_2 = 0,49$ N	$y_2 = 44,50$ mm
Lineární stolek XLS-1-40-1250	$G_3 = 0,49$ N	$y_3 = 31,50$ mm
Spojovací deska	$G_4 = 0,098$ N	$y_4 = 23,00$ mm
Rotační stolek XRT-U-30-109	$G_5 = 0,80$ N	$y_5 = 11,00$ mm

Tabulka 20 Parametry pro výpočet výsledného těžiště G_{v1} dílů držák vzorků, lineární stolek, spojovací deska a rotačního stolek.

Délka L profilu 45 mm jsem navrhla vzhledem k dostatečnému prostoru pro připevnění k lineárnímu stolku a vzhledem k umístění těžiště do stejné osy jako je těžiště nevysunutých lineárních stolků XLS-1-80-1250. Výpočet přibližné polohy výsledného těžiště dílů držák vzorků, lineární stolek, spojovací deska, rotačního stolek a L profil vychází z rovnic (22). Souřadnice v tomto případě vztahují k vnějšímu dolnímu rohu L profilu. Dosazením parametrů z tabulky 21 vyjde výsledná tíhová síla $G_{v2} = 3,46$ N, vzdálenost $y_{T_{v2}} = 38,10$ mm a vzdálenost $x_{T_{v2}} = 33,60$ mm. Důležitá je především hodnota x_T , která rozhoduje o poloze děr pro šrouby v L profilu.

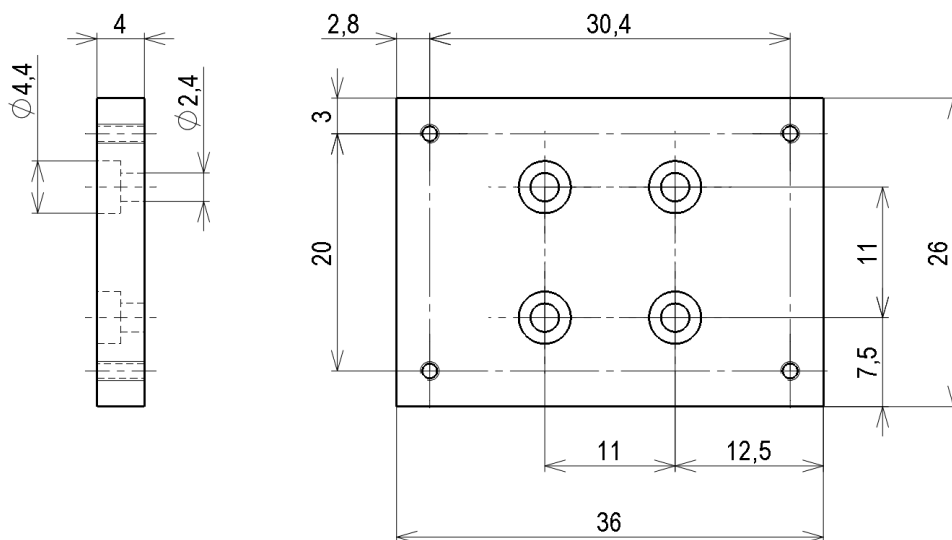
Hmotnost L profilu jsem vypočítala z rovnice pro výpočet hmotnosti $m = \rho \cdot V$, kde ρ je hustota materiálu a V je objem dílu. Po dosazení hodnot $\rho = 2,8$ g/cm³ a $V = 39,48$ cm³ vyjde hmotnost L profilu $m = 110,54$ g.

Lineární stolek XLS-1-80-1250 má maximální nosnost 500 g. Po sečtení hmotnosti všech dílů, jejichž váhu stolek nese, mi vyjde celková hmotnost 457,6 g, což nepřesahuje mezní hodnotu.

Jak tedy vypadá složený manipulátor zajišťující přesný pohyb vzorkem je vidět na obrázku 40. Tento manipulátor se může používat buď samostatně v laboratořích nebo ve vakuové komoře. Již bylo zmíněno, že hodnota vakua v hlavní interakční komoře je

Díl	Tíhová síla dílu	y souřadnice	x souřadnice
Držák vzorků	$G_1 = 0,49 \text{ N}$	$y_1 = 54,75 \text{ mm}$	$x_1 = 54,75 \text{ mm}$
Lineární stolek XLS-1-40-1250	$G_2 = 0,49 \text{ N}$	$y_2 = 38,50 \text{ mm}$	$x_2 = 42 \text{ mm}$
Lineární stolek XLS-1-40-1250	$G_3 = 0,49 \text{ N}$	$y_2 = 38,50 \text{ mm}$	$x_2 = 42 \text{ mm}$
Spojovací deska	$G_4 = 0,098 \text{ N}$	$y_3 = 30,00 \text{ mm}$	$x_3 = 42 \text{ mm}$
Rotační stolek XRT-U-30-109	$G_5 = 0,80 \text{ N}$	$y_4 = 18,00 \text{ mm}$	$x_4 = 42 \text{ mm}$
L profil	$G_6 = 1,08 \text{ N}$	$y_5 = 11,08 \text{ mm}$	$x_5 = 21,08 \text{ mm}$

Tabulka 21 Parametry pro výpočet výsledného těžiště $G_{v,2}$ dílů držák vzorků, lineární stolek, spojovací deska, rotačního stolu a L profil.



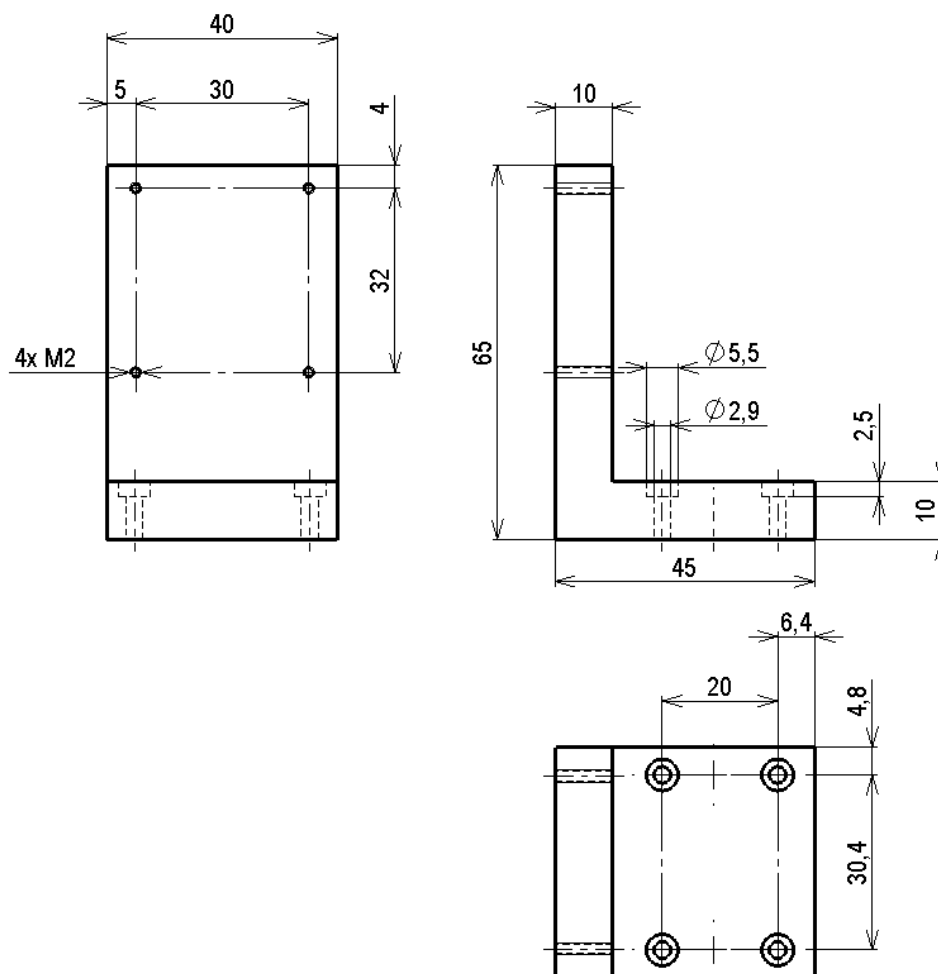
Obrázek 38 Technický výkres navrhované desky spojující lineární stolek XLS-1-40-1250 a rotační stolek XRT-U-30-109.

maximálně 10^{-7} mbar. Aplikace pohybových stolků od firmy Xeryon je však možná i pro vyšší vakua, je ale nutné všechny pohybové stolky přemazat vakuovým mazadlem. Tento proces zajišťuje sama firma, která stolky vyrábí. Ta daný stolek rozebere, odstraní nevhodné mazadlo, namaže vakuovým mazadlem TorrLube a stolek opět složí.

Pro ovládání piezo motorů pohybových stolků nabízí firma Xeryon několik ovladačů. Pro náš případ se použije pro každý pohybový stolek jeden ovladač XD-C, kterým se může řídit jen jeden piezomotor [10]. Řídící jednotka tohoto ovladače čte integrovaný enkodér piezo stoku, generuje a zesiluje řídicí signály a pomocí ASCII protokolu (americký standardní kód pro výměnu informací) komunikuje s počítačem. Ovladač je možné konfigurovat v uživatelském rozhraní spustitelném v operačním systému Windows i v programu LabVIEW. Připojení ovladače k počítači je pomocí USB-B 2.0. Ovladač je napájen 15V stejnosměrného napětí.

5.2 Uchycení manipulátoru

Pro použití manipulátoru v hlavní interakční komoře je potřeba uchytit ho na držák. Jeho konstrukce je částečně ovlivněna polohou příruby DN40CF vůči poloze průhledového okénka. Příruba DN40CF slouží pro Z-manipulátor, který zajišťuje translační pohyb v rozsahu 400 mm ve směru osy y a rotační pohyb 360° kolem této osy. Důvo-



Obrázek 39 Technický výkres navrhovaného L profilu.

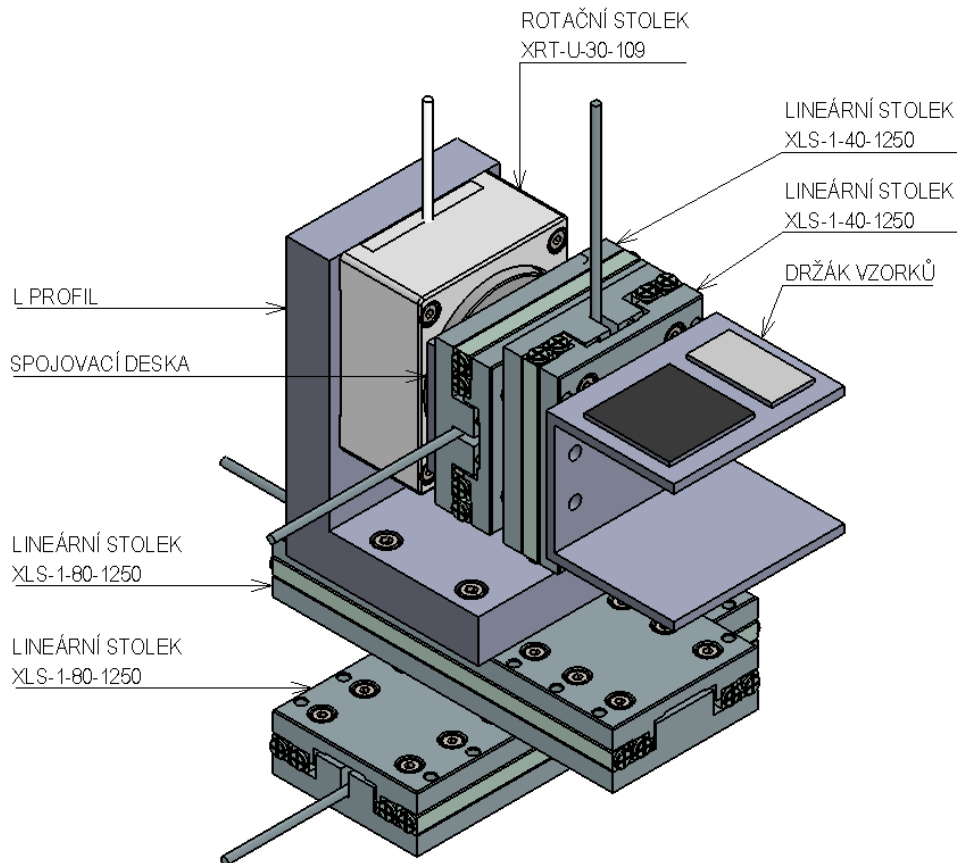
dem umístění průhledového okénka vedle příruby lineárního posuvu je požadavek na vertikální polohu mikroskopu. Vzdálenost středu příruby od středu okénka je minimálně 96 mm. Dále je konstrukce navržena tak, aby prošla 200 mm otvorem příruby CF200 vakuového ventilu. Ohyb kolem osy x a y je kompenzován rotací Z -manipulátoru a rotačním stolkem. Tyto ohyby jsou nežádoucí, jelikož pro správný průběh experimentu je zapotřebí kolmosti terče na laserový svazek. Oproti tomu ohyb kolem osy z je do určité míry povolen, protože terč zůstane ke svazku kolmý a pouze se pootočí. Mezní hodnotou průhybu v ose y je na základě zkušeností 20 μm .

Vzhledem ke konstrukci manipulátoru jsem navrhla umístit ho na L profil, ke kterému je připevněna tyč spojená se Z -manipulátorem.

Rozměry L profilu jsou ovlivněny hodnotou dovoleného průhybu, rozsahovým pohybem manipulátoru a také tloušťkou tyče. Proto jsem nejprve navrhla výchozí rozměrové hodnoty a po určení tloušťky tyče jsem je upravila. Jako materiál jsem pro jeho lehkost zvolila dural.

Lineární stolek XLS-1-80-1250 se k L profilu přišroubuje osmi šrouby M2 stejně, jako tomu bylo popsáno v předešlé kapitole. Tyč se k L profilu přišroubuje dvěma šrouby M6.

Šířku L profilu jsem navrhla 130 mm, tato hodnota je výsledkem sečtení potřebné prostoru pro manipulátor, tloušťky L profilu a prostoru pro tyč. Výšku L profilu jsem



Obrázek 40 Složený manipulátor s popisem dílů.

navrhla 65 mm, tato hodnota je dána součtem prostoru pro uchytení tyče a tloušťky L profilu. Délku L profilu jsem navrhla 80 mm, tedy stejnou jako stolku XLS-1-80-1250.

Pro výpočet tloušťky L profilu jsem vycházela z diferenciální rovnice průhybové čáry (15). V tomto případě je deska namáhána silou, ohybový moment se tedy rovná $M_O(x) = F \cdot x$, kde F je působící síla a x je poloha této síly. Po dosazení do rovnice (15) vyjde:

$$\vartheta(x)'' = -\frac{F \cdot x}{EJ}, \quad (23)$$

kde E je Youngův modul pružnosti a J je kvadratický modul průřezu. Integrací této rovnice získám rovnici úhlu natočení a její integrací rovnici průhybu:

$$\vartheta(x)' = -\frac{F}{EJ} \cdot \frac{x^2}{2} + C_1 \quad (24)$$

$$\vartheta(x) = -\frac{F}{EJ} \cdot \frac{x^3}{6} + C_1x + C_2 \quad (25)$$

Konstanty C_1 a C_2 určím z okrajových podmínek:

1. Průhyb v místě $x = 0$ je nulový, tedy $\vartheta(0) = 0$.
2. Úhel natočení v místě $x = 0$ je nulový, tedy $\vartheta(0)' = 0$.

Z první podmínky vyplývá $C_2 = 0$ a z druhé $C_1 = 0$. Po dosazení konstant je tvar výsledné rovnice:

$$\vartheta(x) = -\frac{F}{EJ} \cdot \frac{x^3}{6}. \quad (26)$$

V tomto případě se jedná o kvadratický modul J obdélníkového průřezu, který se vypočítá z rovnice (19). Dosazením této rovnice do rovnice (26) mohu vyjádřit tloušťku L profilu t :

$$t = \sqrt[3]{\frac{2Fx^3}{Eb\vartheta(l)}}. \quad (27)$$

Za sílu F dosadím celkovou tíhovou sílu dílů držák vzorků, lineární stolky, spojovací deska, rotační stolek a L profil $G_{v3} = 5,52$ N. Poloha této síly je závislá na výsuvu lineárních stolků XLS-1-80-1250, krajním případem je maximální vysunutí obou stolků, kdy dolní stolek je vysunut směrem od tyče. Počátek souřadného systému použitého pro určení polohy jsem umístila do levého horního rohu spodní desky L profilu dle obrázku 41.

V krajním případě je poloha síly G_{v3} : $x_{T_{v3}} = 113,34$ mm, $z_{T_{v3}} = 65$ mm. Pro výpočet tloušťky se vzdálenost působící síly rozdělí na složky ve směru osy x a z . Pro výpočet tloušťky t_x dosadím do rovnice (27) $F = G_{v3} = 5,52$ N, $x = x_{T_{v3}} = 113,34$ mm, $E = 72$ GPa, $b = 80$ mm, $\vartheta(l) = 1$ μ m a vyjde velikost minimální potřebné tloušťky $t_x = 14,08$ mm. Pro výpočet tloušťky t_z dosadím do rovnice (27) předešlé hodnoty parametrů a $x = z_{T_{v3}} = 65$ mm, $b = 110$ mm a vyjde velikost minimální potřebné tloušťky $t_z = 7,3$ mm.

Pro návrh desky volím tloušťku $t = 20$ mm. Po zpětném dopočítání velikosti průhybu ve směru osy x a z mi vyjde $\vartheta_x = 0,35$ μ m a $\vartheta_z = 0,05$ μ m. Celkový průhyb způsobený tíhovou silou G_{v3} vypočítám z Pythagorovy věty $\vartheta^2 = \vartheta_x^2 + \vartheta_z^2$, ze které vyjde $\vartheta = 0,35$ μ m. Hmotnost takto navržené desky je $m = 776$ g.

K L profilu je dvěma šrouby M6 upevněna tyč, která zajišťuje lineární posuv ve směru osy y a rotaci kolem této osy. Volná délka této tyče 450 mm je určena na základě rozměrů hlavní interakční komory, do které bude manipulátor umístěn. Pro lineární posuv se tyč přichytí k Z -manipulátoru, ve kterém je průchozí otvor o velikosti 37 mm. Průměr tyče vypočítám z maximálního dovoleného průhybu 20 μ . Jako materiál tyče navrhuji leštěnou nerezovou ocel.

Výpočet průměru tyče vychází z rovnice (18), do které jsem dosadila rovnici kvadratického modulu J kruhového průřezu [14]:

$$J = \frac{1}{64}\pi d^4. \quad (28)$$

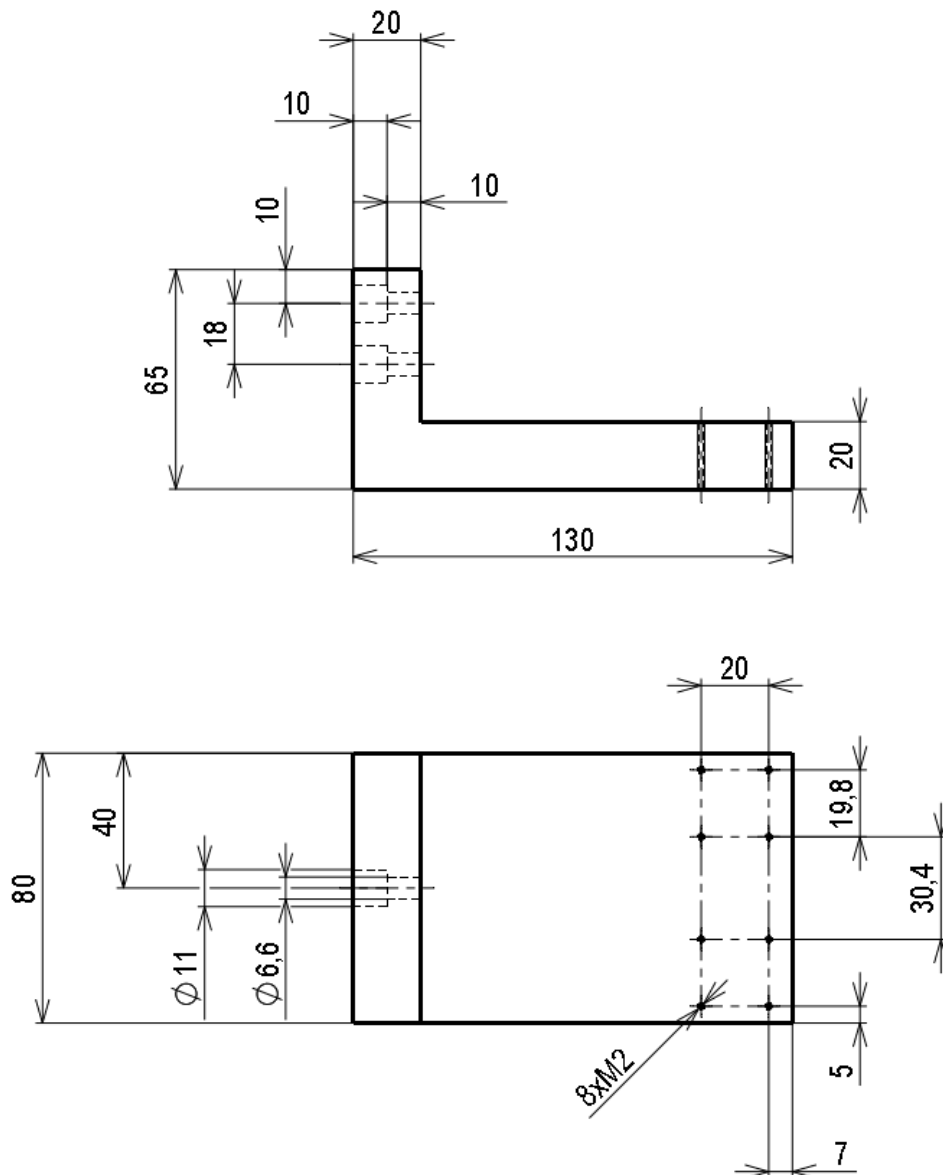
Výsledná rovnice průhybu je:

$$\vartheta(x) = -\frac{32Mx^2}{E\pi d^4}. \quad (29)$$

Z této rovnice vyjádřím průměr d jako:

$$d = \sqrt[4]{\frac{32Mx^2}{E\pi\vartheta}}. \quad (30)$$

Tyč je namáhána ohybovým momentem vzniklým působením tíhové síly všech předešlých součástí mimo osu tyče. Pro krajní případ popsany výše je poloha síly $G_{v4} = 13,13$ N v ose x : $x_{T_{v4}} = 65,71$ mm a v ose z : $z_{T_{v4}} = 50,51$ mm.



Obrázek 41 Výkres navrženého L profilu pro uchycení manipulátoru.

Moment působící na tyč se rozdělí na složku ve směru osy x : $M_x = G_{v4} \cdot (x_{T_{v4}} - x_{T_{t1}})$ a složku ve směru osy z : $M_z = G_{v4} \cdot (z_{T_{v4}} - z_{T_{t1}})$, kde $x_{T_{v4}}$ a $z_{T_{v4}}$ je poloha působící síly a $x_{T_{t1}}$ a $z_{T_{t1}}$ je poloha středu tyče v souřadném systému desky. Poloha těžiště tyče v předešlém souřadném systému je $x_{T_t} = 5$ mm a $z_{T_t} = 40$ mm. Pro výpočet průměru dle rovnice (30) s působícím momentem $M_x = 0,80$ Nm dosadím za x délku tyče $l = 450$ mm, Youngův modul pružnosti $E = 210$ GPa, průhyb $\vartheta = 20$ μ m a vyjde mi průměr $d_x = 25,01$ mm. Pro výpočet průměru s působícím momentem $M_z = 0,14$ Nm dosadím stejné hodnoty parametrů E , l , ϑ a vyjde mi hodnota $d_z = 16,13$ mm.

Velikost průměru tyče volím $d = 30$ mm, aby byl výsledný ohyb co nejmenší. Hmotnost tyče je $m = \rho \cdot V = 7500$ [kg/m³] \cdot $0,0032$ [m³] = $2,39$ kg.

Na konci tyče je vytvořena plocha pro zarovnání s L profilem, ke kterému je tyč přišroubovaná dvěma šrouby M6 (viz. obrázek 42). Pro tyto šrouby následující rovnici

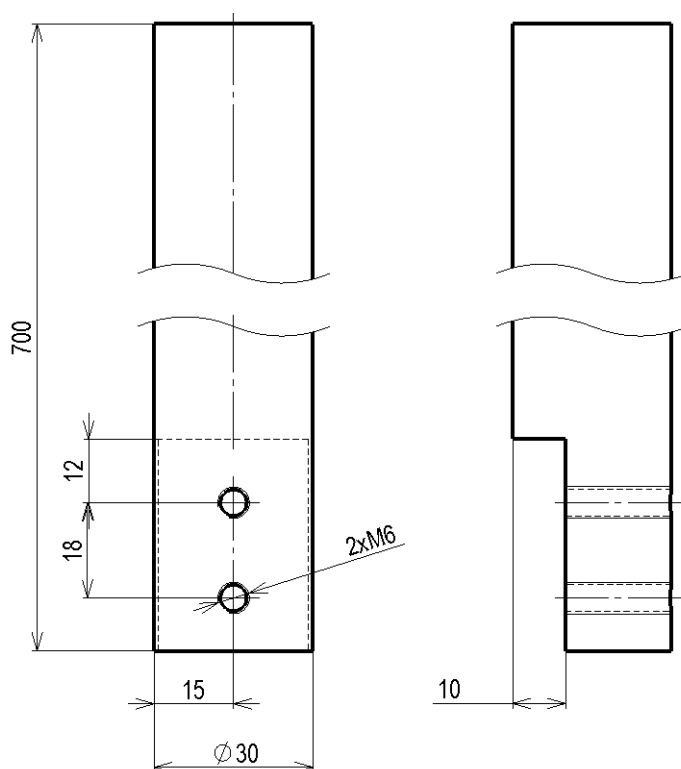
ověřím jejich únosnost ve stříhu [17]:

$$F_{v,Rd} = n \cdot \frac{0,5f_{ub}A_s}{\gamma_{M2}}, \quad (31)$$

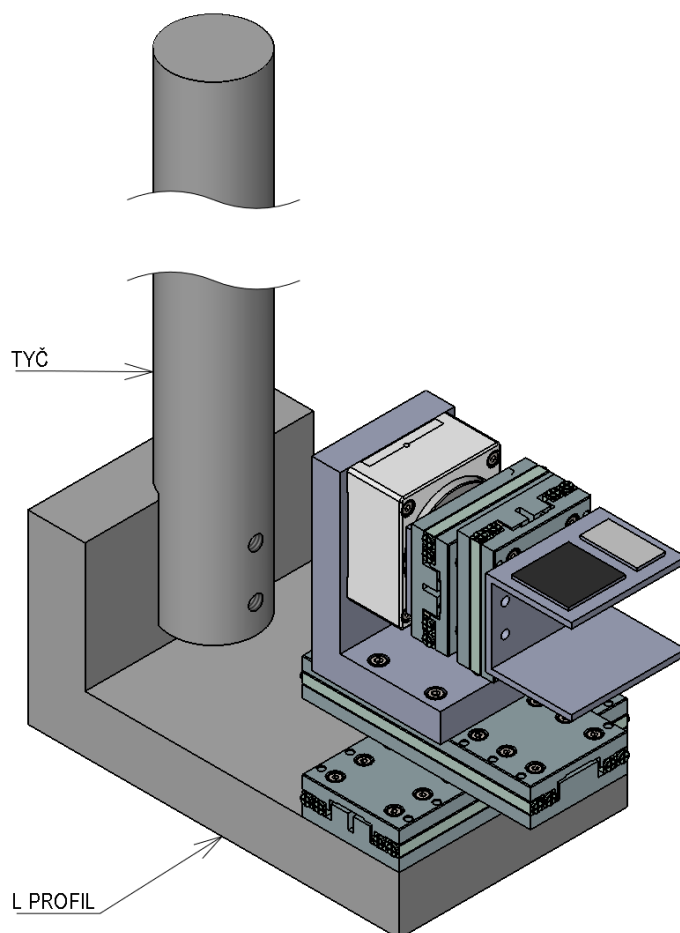
kde n je počet šroubů, f_{ub} je mez pevnosti šroubů, A_s je plocha jádra šroubu a γ_{M2} je součinitel materiálu.

Dosazením hodnot $n = 2$, $f_{ub} = 500$ MPa, $A_s = 28,27$ mm², $\gamma_{M2} = 1,25$ mi vyjde únosnost ve stříhu $F_{v,Rd} = 11,31$ kN.

Složený držák manipulátoru je vidět na obrázku 43. Nejdelší vzdálenost krajních bodů je 163 mm, takže tato konstrukce projde přírubou DN200CF.



Obrázek 42 Výkres navržené tyče pro lineární posuv ve směru y a rotaci kolem této osy.



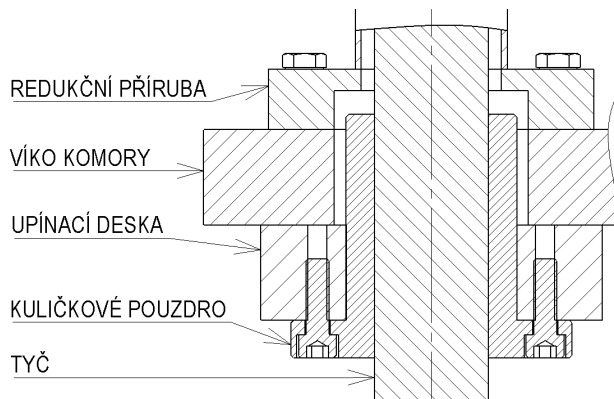
Obrázek 43 3D model navrženého držáku manipulátoru s popisem jeho dílů.

5.3 Uchycení držáku manipulátoru a mikroskopu k vakuové komoře

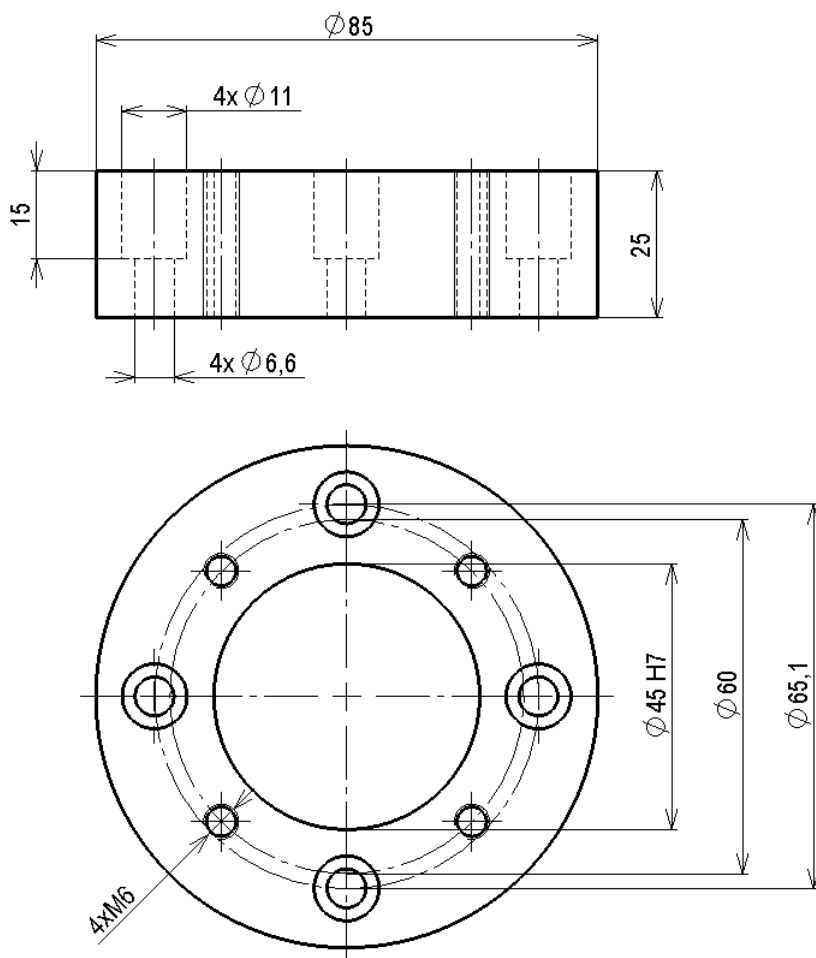
Návrh držáku manipulátoru a jeho rozměrů je částečně ovlivněn způsobem jeho připevnění k vakuové komoře. Aby došlo k lineárnímu posuvu ve směru osy y a rotace kolem této osy, je držák spojen se Z-manipulátorem a rotačním stolem. Pro návrh konstrukce jsem vycházela z parametrů Z-manipulátoru LD 40-400 S a rotačního stolku DDF 40 PLS firmy Demaco [7]. Tento Z-manipulátor je připevněn k víku vakuové komory pomocí příruby DN40CF. Jeho horní část je ukončena otevřenou přírubou taktéž DN40CF, na kterou se připevní rotační stolek. Ten je také ukončen otevřenou přírubou DN40CF. Pro spojení tohoto pohybového systému s tyčí držáku manipulátoru použiji slepou přírubu DN40CF, na kterou se daná tyč přivaří nebo přišroubuje. Jelikož je tyč dlouhá 700 mm a namáhaná na ohyb, je její pohyb zajištěn kuličkovým pouzdem připevněným k víku komory. Pro návrh jsem použila posuvně rotační kuličkové pouzdro od firmy Nippon Bearing [16], které má čtvercovou přírubu o délce 58 mm a shora čtyři díry s válcovým zahloubením pro šrouby M6. Délka pouzdra je 64 mm, a jeho vnější průměr je 45 mm.

Vzhledem k délce pouzdra jsem se rozhodla ho připevnit k víku komory s přírubou směrem dolů, čímž nedojde ke ztrátě prostoru mezi vzorkem a průhledovým okénkem. Protože je průměr pouzdra 45 mm, směřuje skrz víko do příruby CF50 s otvorem

o průměru 51,1 mm. Jelikož se manipulátor připevňuje na přírubu CF40, použije se redukční příruba. Výška prostoru v této redukci je menší než je délka pouzdra, proto se pouzdro připevní na desku (obrázek 44). Výkres této navrhované desky je na obrázku 45, pro otvor desky určený k uložení pouzdra je výrobcem dána tolerance H7. Deska má tloušťku 25 mm a průměr 85 mm. K víku vakuové komory se připevní čtyřmi šrouby M6.



Obrázek 44 Řez spojením posuvně rotačního kuličkového pouzdra s víkem vakuové komory.



Obrázek 45 Výkres desky spojující posuvně rotační kuličkové pouzdro s víkem vakuové komory.

K pozorování povrchu vzorku mikroskopem se použije průhledové okénko o průměru 40 mm a toušce 5 mm, které je přitavené do víka vakuové komory. Důvodem této volby je, že pracovní vzdálenost objektivu se zvětšením 50x je 13 mm a velikost lineárního posuvu použitelná ve směru osy y je 10 mm. Při použití přírubového průhledového okénka by se vzorky nedostali do pracovní vzdálenosti mikroskopu. Vzdálenost středu průhledového okénka od osy tyče držáku manipulátoru je 130 mm. Tato vzdálenost je dána vzdáleností středu vzorku na držáku vzorků od osy tyče při nevysunutém spodním stolku XLS-1-80-1250.

Mikroskop je připevněn motorizovaným tubusem k držáku od firmy Navitar. Tento držák je připevněn k desce, která je pomocí svěrných držáků přichycena ke dvěma sloupkům. Pro návrh jsem zvolila tlumící sloupky o průměru 1,5" a délce 14" od firmy Thorlabs, které mají uvnitř zavěšené závaží pohybující se nezávisle na tělu stojanu a tak dochází k absorpci a rozptylu vibrací [17]. Tyto sloupky jsou šrouby M6 připevněny k víku vakuové komory v takové vzdálenosti od průhledového okénka, že osa mikroskopu prochází středem tohoto okénka. Toto uchycení je od víka odmontovatelné a dá se tak použít i při ex-situ vyhodnocování v laboratořích.

Jelikož sloupky drží celou váhu mikroskopu, jsou namáhány na ohyb. Ten vypočítám z rovnice 29, do které dosadím $M = 1,95 \text{ Nm}$, $x = 355,6 \text{ mm}$, $E = 210 \text{ GPa}$ a $d = 38,1 \text{ mm}$. Výsledný ohyb $\vartheta = 5,76 \text{ } \mu\text{m}$.

Desku i svěrné držáky jsem navrhla, jejich výkresy jsou na obrázku 46 a 47.

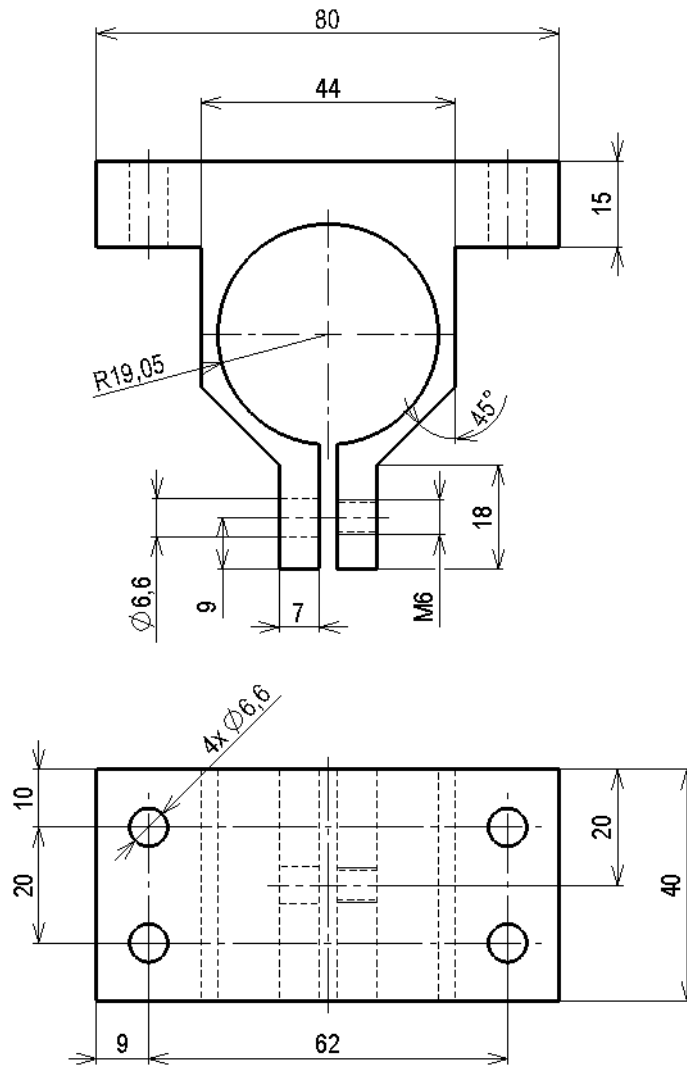
Pro svěrný spoj jsem zvolila šroub M6, tuto volbu jsem následně ověřila. Aby nedošlo k prokluzu, musí být tečná třecí síla minimálně stejná, jako je tíhová síla. Zjednodušíme-li si polovinu svěrného srážáku na prut o proměnném průřezu, pak je tento prut ve vzdálenosti $l_1 = 45,2 \text{ mm}$ namáhán osovou silou šroubu F_0 a ve vzdálenosti $l_2 = 30,1 \text{ mm}$ je namáhán opačně orientovanou normálovou třecí silou F_N . Aby byl spoj svěrný, musí dojít k ohybu směrem k tyči, tedy výsledný ohybový moment musí být kladný. Tečná třecí síla $F_t = F_G = m \cdot g = 2 \cdot 9,81 = 19,62 \text{ N}$, kde F_G je tíhová síla, m je hmotnost a g je tíhové zrychlení. Z této síly vypočítám třecí sílu $F_N = F_t / f = 19,62 / 0,15 = 130,8$, kde f je součinitel smykového tření. Pro kladný ohybový moment platí podmínka $F_0 \cdot l_1 - F_N \cdot l_2 > 0$. Z toho plyne, že $F_0 > 87,1 \text{ N}$. Osová síla šroubu M6 = 5448 N.

Utahovací moment šroubu se spočítá z rovnice [18]:

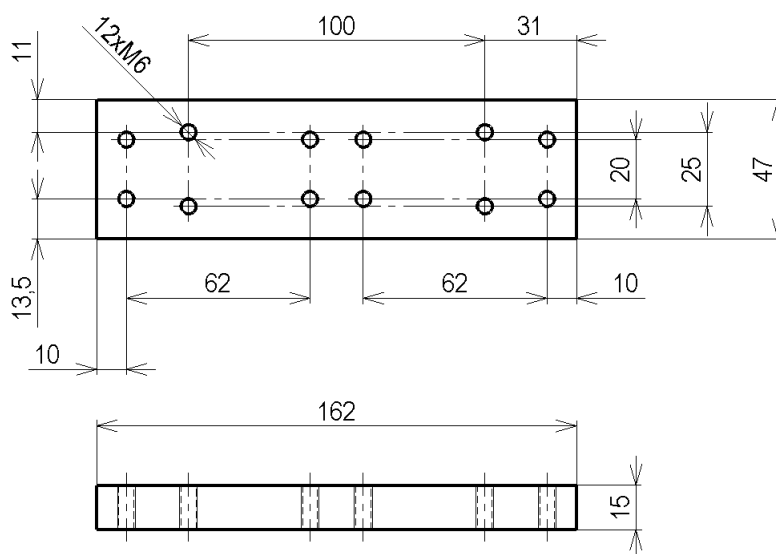
$$M_u = \frac{F_0 \cdot d_2}{2} \text{tg}(\varphi + \gamma'), \quad (32)$$

kde d_2 je střední průměr závitu, φ je úhel stoupání závitu a γ' je třecí úhel. Po dosazení hodnot $F_0 = 5448 \text{ N}$, $d_2 = 5,35$, $\varphi = 3,4^\circ$, $\gamma' = 7,4^\circ$ mi vyjde utahovací moment $M_u = 2,78 \text{ Nm}$.

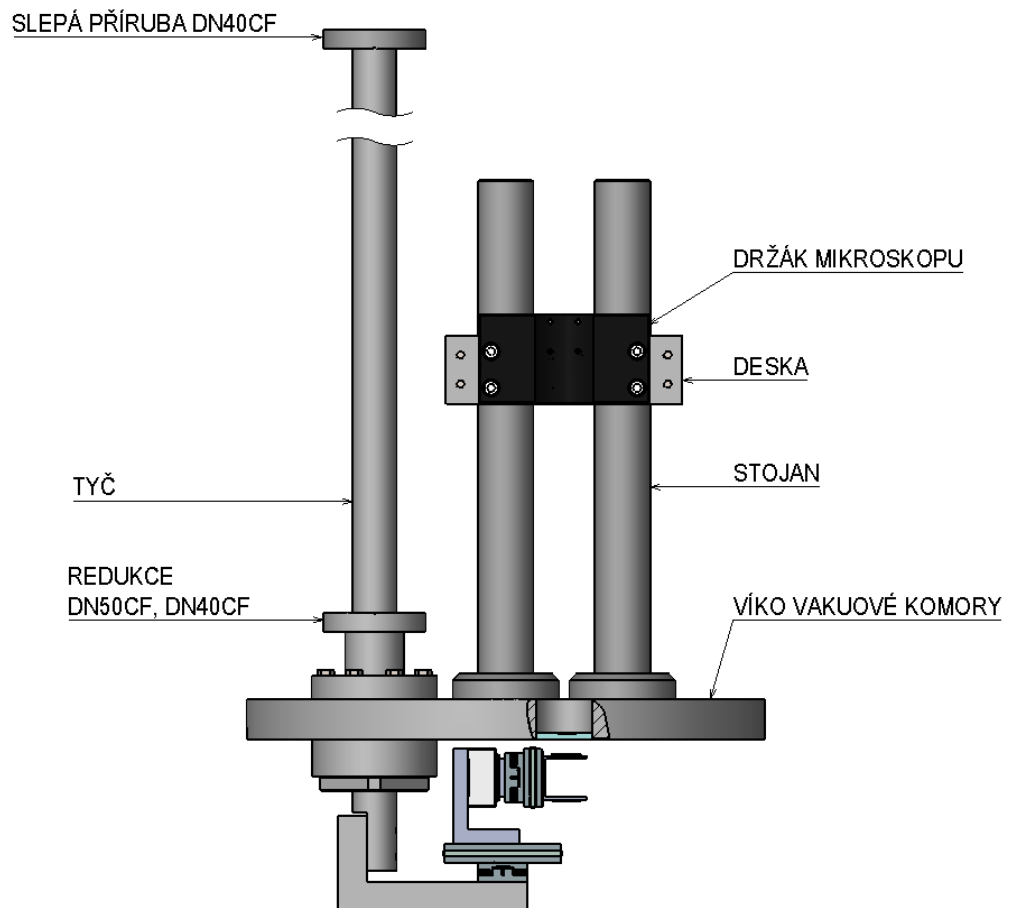
Výsledný konstrukční návrh uchycení manipulátoru a mikroskopu k víku vakuové komory je na obrázku 48.



Obrázek 46 Výkres svěrného sržáku spojovacího mikroskop se stojanem.



Obrázek 47 Výkres desky spojující držák mikroskopu se svěrnými držáky.



Obrázek 48 Výsledný konstrukční návrh uchycení manipulátoru a mikroskopu k víku vakuové komory.

6 Závěr

Na začátku této práce jsem provedla rešerši metod používaných pro charakterizaci laserových svazků o krátké vlnové délce (tj. extrémní ultrafialové záření, měkké rentgenové a rentgenové záření). Tyto metody vychází z ablačního a desorpčního poškození materiálu, ke kterému dochází přímo v ohnisku svazku. Na základě rešerše těchto metod jsem stanovila potřebné pracovní pohyby manipulátoru vzorků. Pro návrh manipulátoru bylo stanoveno několik požadavků jako je kompatibilita do vysokého vakua, sestavení manipulátoru z dostupných pohybových stolků a jeho průchodnost skrz přírubu DN200CF.

Na základě těchto požadavků jsem navrhla konstrukci vhodnou i do ultra-vysokého vakua, která pro splnění pohybového rozsahu používá lineární stolky a rotační stolek od firmy Xeryon. Pro hlavní lineární posuv ve směru osy y a rotaci kolem této osy bude použit Z-manipulátor a rotační stolek od firmy Demaco. Konstrukci manipulátoru a jeho držáku jsem také navrhla tak, že po spojení projdou skrz pneumatický vakuový ventil DN200CF.

Dále jsem otestovala dvanáct konfigurací mikroskopu od firmy Navitar. Pro jejich testování jsem použila dvě měřítka. Vlastnosti základních konfigurací 1-6 jsou podobné vlastnostem DIC konfigurací 7-12. Největšího rozlišení lze dosáhnout u konfigurací s objektivem se zvětšením $50\times$. Rozlišitelná vzdálenost je $2,5\ \mu\text{m}$. Na základě obrázků však konstatuji, že rozlišení je lepší než $1\ \mu\text{m}$.

Konfigurace s objektivem se zvětšením $10\mu\text{m}$ mají sice rozlišení menší, mají však větší hloubku ostrosti a průměr zorného pole. Proto se hodí pro pozorování větších otisků a pro jejich nalezení na terči.

U konfigurací 3, 5, 6 a 12 dochází pro velká zvětšení k nedostatečnému osvětlení předmětu a proto nejsou vhodná pro používání.

Literatura

- [1] CHALUPSKÝ, Jaromír. *Charakterizace svazků rentgenových laserů různých typů*. Praha, 2012. Disertační práce. ČVUT. Vedoucí práce Doc. Ing. Ladislav Pína, DrSc.
- [2] CHALUPSKÝ, J., a kol. Characteristics of focused soft X-ray free-electron laser beam determined by ablation of organic molecular solids. *Optics Express*, 2007, 15.10: 6036-6043.
- [3] CHALUPSKÝ, J., a kol. Spot size characterization of focused non-Gaussian X-ray laser beams. *Optics Express*, 2010, 18.26: 27836-27845.
- [4] CHALUPSKÝ, J., a kol. Comparing different approaches to characterization of focused X-ray laser beams. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2011, 631.1: 130-133.
- [5] SOBIERAJSKI, R., a kol. Experimental set-up and procedures for the investigation of XUV free electron laser interactions with solids. *Journal of instrumentation*, 2013, 8.02: P02010.
- [6] Linear motion and alignment - UHV Vacuum Components | UHV Design. *Home - UHV Vacuum Components | UHV Design* [online]. Copyright © 2019 UHV Design [cit. 9.8.2019]. Dostupné z: <https://www.uhvdesign.com/products/linear-motion-and-alignment>
- [7] Vacuum Manipulators. *Demaco | Alles draait om 'Cryogenius'* [online]. [cit. 5.12.2019] Dostupné z: <https://webshop.demaco.nl/vacuum-manipulators.html?p=3>
- [8] Positioning Stages - SmarAct. *High Precision Positioning and Metrology Solutions - SmarAct* [online]. Copyright © 2019 SmarAct GmbH. All rights reserved. [cit. 9.8.2019]. Dostupné z: <https://www.smaract.com/high-precision-positioning>
- [9] Motion Technology | Positioning Systems | High Precision. *Physik Instrumente* [online]. Copyright © 1996 [cit. 9.8.2019]. Dostupné z: <https://www.pi-usa.us/en/>
- [10] Products - Xeryon. Xeryon: Compact & Precise Piezo Stages [online]. Copyright © 2019 Xeryon. Copyright. All rights reserved. [cit. 10.12.2019]. Dostupné z: <https://xeryon.com/products/>
- [11] Imaging Solutions | Navitar Optical Solutions. *Navitar Imaging and Projection Optics | Navitar Optical Solutions* [online]. Copyright © Copyright 2019 Navitar. All Rights Reserved. [cit. 8.12.2019]. Dostupné z: <https://navitar.com/products/imaging-optics/>
- [12] Cameras | Basler. *Basler AG - Industrial Camera Manufacturer* [online]. Copyright © 2019 Basler AG [cit. 8.12.2019]. Dostupné z: <https://www.baslerweb.com/en/products/cameras/>

- [13] BUMBÁLEK, Jaroslav. Základy technické optiky. Vyd. 3. Praha: ČVUT, 1995. ISBN 80-01-01352-9.
- [14] MICHALEC, Jiří. Pružnost a pevnost I. Vyd. 3. Praha: ČVUT, 2009. ISBN 978-80-01-04224-3.
- [15] LEINVEBER, Ing. Jiří a Ing. Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky. 5. Úvaly: Albra - pedagogické nakladatelství, 2011. ISBN 978-80-7361-081-4.
- [16] Products Lineup | Products | NIPPON BEARING CO., LTD.. *NIPPON BEARING CO., LTD.* [online]. [cit. 19.1.2020]. Dostupné z: <http://www.nippon-bearing.co.jp/english/product/lineup/index.html#03>
- [17] Optomechanical Components - Thorlabs. *Thorlabs, Inc. - Your Source for Fiber Optics, Laser Diodes, Optical Instrumentation and Polarization Measurement & Control* [online]. Copyright © 1999 [cit. 21.01.2020]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/navigation.cfm?guide_id=50
- [18] BOLEK, Alfred a Josef KOCHMAN. Části strojů. 5. přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1989. ISBN 80-03-00046-7.

Příloha A

Zdrojový kód pro vyhodnocení rozlišení mikroskopu

Tato příloha obsahuje zdrojový kód skriptu napsaného v programu Matlab, který jsem použila pro vyhodnocení rozlišení mikroskopu Navitar v kapitole 4. Zdrojový kód je následující:

```
function vysledek = Mapuj(puvodniMin, puvodniMax, noveMin, noveMax, hodnota)
    % Inspirovano odpovedi na:
    % https://stackoverflow.com/questions/929103/convert-a-number-range-to-another-range-maintaining-ratio
    puvodniRozsah = puvodniMax - puvodniMin;
    novyRozsah = noveMax - noveMin;
    vysledek = (((hodnota - puvodniMin) * novyRozsah) / puvodniRozsah) +
    noveMin;
end

% Vstupem je matice hodnot sedi y nactena ze souboru Data.mat. Kazdy sloupec
% matice obsahuje hodnoty sedi pro vybranou oblast obrazu snimaneho mikroskopem.
% Z hodnot kazde oblasti vykreslime krivku popisujici prechod z bile do cerne barvy.
load('Data.mat');

dimenze = size(y); % dimenze matice y
nKrivek = dimenze(2); % pocet vybranych oblasti, tj. pocet krivek

% Spocitej pocet hodnot sedi v kazde oblasti (pocet pixelu oblasti). Pocet hodnot
% sedi kazde oblasti je rozdilny a Matlab pri jejich zapisu do matice doplňuje nuly
% na konec kvuli zarovnani.
pocetyDat = [];
for i = 1 : nKrivek
    pocetyDat = [pocetyDat nnz(y(:, i))];
end

% Vytvor pocet hodnot na ose x odpovidajici pocetu hodnot na ose y pro kazdou
% vybranou oblast. Hodnoty x zacinaji nulou, pozdeji budou normalizovany.
x = zeros(dimenze);
for i = 1 : nKrivek
    sloupec = 0:(pocetyDat(i) - 1);
    x(1:pocetyDat(i), i) = sloupec';
end
```

```
% Normalizuj hodnoty na ose x pro každou oblast zvlášť.
for i = 1 : nKrivek
    x(:, i) = x(:, i) / (poctyDat(i) - 1);
end

% Normalizuj hodnoty na ose y (hodnoty šedi) pro každou oblast zvlášť.
for i = 1 : nKrivek
    yMax = max(y(1:poctyDat(i), i));
    y(1:poctyDat(i), i) = y(1:poctyDat(i), i) / yMax;
end

% Mapuj původní rozsah normalizovaných hodnot šedi do rozsahu <0, 1> pro každou
% oblast zvlášť.
for i = 1 : nKrivek
    yMax = max(y(1:poctyDat(i), i));
    yMin = min(y(1:poctyDat(i), i));
    if yMax == yMin
        y(1:poctyDat(i), i) = Mapuj(yMin, yMax, 0, 1, y(1:poctyDat(i), i));
    end
end

% Vykreslíme normalizované hodnoty šedi do grafu.
nazvyKrivek = ["150 lp/mm" "160 lp/mm"]; % nazvy krivek
velikostPisma = 18; % velikost pisma v obrazcich
tloustkaCary = 2; % tloustka krivek

% Vykreslí postupně všechny křivky.
figure
hold on;
for i = 1 : nKrivek
    plot(x(1:poctyDat(i), i), y(1:poctyDat(i), i), 'LineWidth', tloustkaCary, 'Display-
yName', nazvyKrivek(i));
end
hold off;

% nastav velikost písma, popisky os a zobraz legendu
set(gca, 'FontSize', velikostPisma);
xlabel('Normalizovaná délka [-]');
ylabel('Normalizovaná hodnota šedi [-]');
legend('show');
```