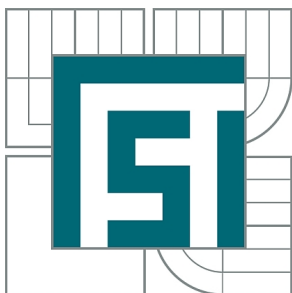


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

KONSTRUKČNÍ ÚPRAVY KOHERENCÍ ŘÍZENÉHO HOLOGRAFICKÉHO MIKROSKOPU

MODIFICATIONS IN MECHANICAL DESIGN OF THE COHERENCE CONTROLLED
HOLOGRAPHIC MICROSCOPE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MILAN MATELA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PAVEL KOLMAN, Ph.D.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav fyzikálního inženýrství

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Milan Matela

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Přesná mechanika a optika (2301T010)**

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

Konstrukční úpravy koherenci řízeného holografického mikroskopu

v anglickém jazyce:

Modifications in mechanical design of the coherence controlled holographic microscope

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhněte a proveďte konstrukční úpravy interferometru transmisního holografického mikroskopu, které odstraní nedostatky bránící snadnému seřizování mikroskopu při výměně objektivů. Doplňte příčné posuvy obou objektivů a nalezněte vhodnější technické řešení pro nastavování shodné délky větví interferometru.

Proveďte úpravy nebo doplnění dalších prvků, které budou prospěšné pro justáž mikroskopu, nebo pro rutinní pozorování živých biologických vzorků.

Cíle diplomové práce:

1. konstrukční návrh úprav ve 3D
2. tvorba výkresové dokumentace a zadání do výroby
3. kompletace zařízení
4. ověření funkčnosti

Seznam odborné literatury:

P. Kolman, Koherencí řízený holografický mikroskop. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010.

M. Born, E. Wolf, Principles of optics., 7th ed. Cambridge: Cambridge university press, 2002.

E. Keprt, Teorie optických přístrojů II: teorie a konstrukce mikroskopu. 1. vyd. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1966.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Kolman, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 4.12.2012

L.S.

prof. RNDr. Tomáš Šíkola, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

Abstrakt

Předmětem diplomové práce je konstrukční úprava koherencí řízeného holografického mikroskopu, která povede k odstranění některých nedostatků. V práci je stručně popsána historie interferenční mikroskopie a rozdíly mezi jednotlivými druhy interferenčních mikroskopů. Jsou také uvedeny konstrukční nedostatky současného stavu a navrhnutá řešení, která jsou stručně popsána. Následně je vybráno nejlepší řešení, které je upraveno do konečné podoby, je podrobně popsáno a následně je provedena i jeho realizace. V závěru práce je shrnuto, zda úpravy vyhovují a jestli splnily požadované podmínky.

Klíčová slova

Koherencí řízený holografický mikroskop, příčný a podélný posuv, paralelogram.

Abstract

The aim of diploma thesis are modifications in mechanical design of the coherence controlled holographic microscope which will lead to reduction of some deficiencies. In this thesis there is a brief description of the history interference microscopy and differences between each types of interference microscopes. In this work there are stated some design deficiencies of actual condition of the microscope and also several solutions are suggested and shortly described. Then the best solution is chosen which is adjusted to a final form. It is described in detail and then realized. There is a summary included in the conclusion whether the new solution is suitable and if it fulfills the required condition.

Key words

Coherence controlled holographic microscope, transversal and lateral shift, parallelogram.

Bibliografická citace této práce

MATELA, M. *Konstrukční úpravy koherencí řízeného holografického mikroskopu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 41 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Kolman, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně v celém rozsahu pod vedením Ing. Pavla Kolmana, Ph.D. a že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu literatury.

V Brně dne 24. 5. 2013

.....
Milan Matela

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Pavlu Kolmanovi Ph.D. za odborné vedení a připomínky. Dále bych rád poděkoval Ing. Zbyňku Dostálovi za jeho pomoc a konzultace. Nemalý dík patří také rodině, která mě podporovala po celou dobu studia.

Obsah

1. Úvod.....	10
2. Světelné mikroskopy	11
2.1 Off-axis holografie	11
2.2 In-line holografie	12
2.3 Achromatické holografické mikroskopy	12
3. Motivace	13
4. Koherenci řízený holografický mikroskop	14
4.1 Podmínka achromatičnosti mikroskopu	15
4.2 Zobrazení zdroje v pupile kondenzoru	15
5. Konstrukce holografického mikroskopu.....	17
5.1 Popis uložení optických prvků	18
5.2 Podrobné seznámení se současným stavem	20
6. Možné konstrukční úpravy	23
6.1 První konstrukční návrh	23
6.2 Druhý konstrukční návrh	24
6.3 Třetí konstrukční návrh	24
6.4 Čtvrtý návrh.....	25
7. Výsledný návrh.....	27
7.1 Posuv objektivů	27
7.2 Srdce objektivů	30
7.3 Změna rozdílu optických drah.....	31
7.4 Naklápění vnějších zrcátek.....	33
7.5 Základní deska.....	34
7.6 Elektoroerozivní řezání drátem	35
8. Model sestavy s novým konstrukčním řešením	36
9. Závěr.....	38
Seznam použitých zdrojů	40
Seznam použitých zkratk a symbolů	41
Seznam příloh	42

1. Úvod

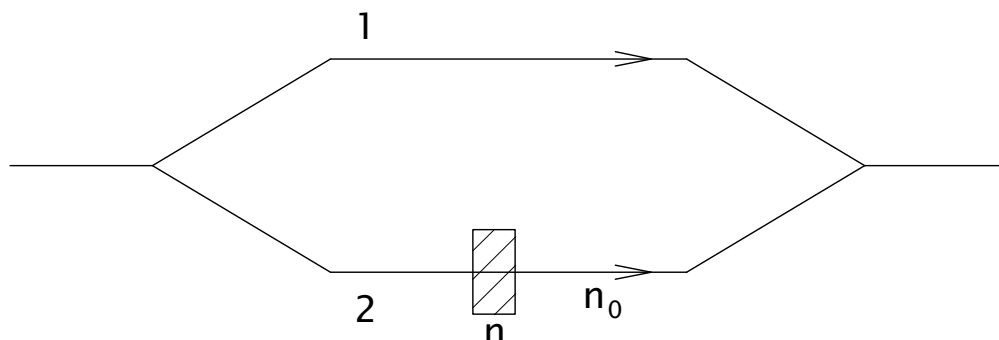
Na VUT v Brně byl navrhnut a zkonstruován koherencí řízený holografický mikroskop, který se používá pro měření vzorků v biologické laboratoři. Během používání se vyskytly některé nedostatky z hlediska jeho konstrukce. Kvůli těmto nedostatkům není možné mikroskop přesně seřídit a v některých částech není dosaženo požadované citlivosti. Proto byla motivace tyto nedostatky odstranit novou konstrukcí. Po všech provedených konstrukčních úpravách by měly být nedostatky odstraněny.

2. Světelné mikroskopy

Účelem mikroskopu je zobrazení detailů, které jsou bez použití optiky pod hranicí rozlišitelnosti lidského oka. První složený mikroskop, který obsahoval více než jednu čočku, byl sestaven Nizozemcem Zachariasem Janssenem (1588 - 1632) [1]. Ten dal základ k rozvoji mikroskopie. Světelné mikroskopy umožňují pozorování zvětšeného obrazu objektu, ale neumožňují kvantitativně zobrazit změnu fáze světla, kterou způsobí pozorovaný předmět. Kvantitativní vyhodnocení fáze bylo umožněno až pomocí interferenční mikroskopie s oddělenou předmětovou a referenční větví, kterou popsal v roce 1893 Sirks. V padesátých letech 20. století Horn zkonstruoval transmisní interferenční mikroskop, kde bylo umožněno kvantitativní měření rozdílu optických drah (OPD) mezi objektovou a referenční větví. Konstrukčně se jednalo o dva totožné mikroskopy umístěné ve větvích Machova-Zehnderova interferometru [2, 8]. V tehdejší době bylo měření OPD velice obtížné a také nákladné, takže se vyvíjely metody, které ale neumožňovaly kvantitativní vyhodnocení fáze [2, 3].

S objevem holografie (1947) a laseru (1960) se začaly projevovat výhody interferenční mikroskopie. A s rozvojem výpočetní techniky bylo možné využít měření OPD, numerického přeostrévání a provádění optických řezů [3].

Vloží-li se zkoumaný objekt do interferometru, zobrazí se změna optických drah vlivem průchodu paprsků přes vzorek. Ta se na interferenčním obrazci projeví jako změna kontrastu nebo deformace interferenčních proužků [5].



Obr. 1 Interferometrický mikroskop.

Většina dvousvazkových interferenčních mikroskopů pracuje v tzv. „tmavém poli,“ to znamená, že pokud posuneme paprsky z první a druhé větve vzájemně o půl vlnové délky, tak se oba paprsky navzájem ruší a zorné pole se stává tmavým [5].

Interferenční mikroskopy rozdělujeme podle úhlu, který svírají paprsky ve výstupní rovině na off-axis a in-line interferometry (holografické a interferometrické mikroskopy) [4].

2.1 Off-axis holografie

Paprsky interferují pod nenulovým úhlem. Úhel má takovou hodnotu, že z jednoho snímku je možné rekonstruovat předmětovou vlnu. Kvůli tomu jsou vhodné k pozorování rychle se měnících procesů s vysokou snímkovací frekvencí [2].

Používají se běžné interferometry, kde jsou paprsky odkloněny tak, aby následnou interakcí obou paprsků vznikl hologram. Aby došlo k interferenci, musí být použito koherentní osvětlení, protože soustava není achromatická a nemusí být ani prostorově invariantní. Z důvodu koherentního osvětlení ale vzniká koherentní zrnitost a není možné pozorovat vzorky v difuzním prostředí [2].

2.2 In-line holografie

Paprsky interferují pod nulovým nebo skoro nulovým úhlem. Proto můžeme použít nekoherentního osvětlení (žárovka, výbojka), a tím se zbavíme koherentní zrnitosti, která se vyskytuje v off-axis holografii. Díky nekoherentnímu osvětlení můžeme také provádět optické řezy vzorkem. Nevýhodou je, že výsledný interferogram získáme až z více zaznamenaných snímků (obvykle 3 -7) [6]. Mezi záznamem jednotlivých snímků vzniká časová prodleva, proto není možné pozorovat rychle se měnící procesy. Navíc může docházet ke změně měřícího prostředí mezi jednotlivými snímky vlivem vibrací nebo proudění vzduchu a ve výsledném obrazu může vznikat šum [2].

Mezi interferenční mikroskopy patří například optická koherenční mikroskopie (OCM) nebo optická koherenční tomografie (OCT) [7].

2.3 Achromatické holografické mikroskopy

Achromatické mikroskopy spojují výhody in-line a off-axis mikroskopů. K interferenci dochází pod nenulovým úhlem a zároveň je použito nekoherentního zdroje záření. Mimoosový hologram není vytvářen klasickým interferometrem, ale mřížkovým. Mimoosová holografie umožňuje použití prostorově i spektrálně rozlehlý zdroj světla, protože počet interferenčních proužků není omezen nízkým stupněm časové ani prostorové koherence [2].

První achromatický holografický mikroskop pro mimoosové holografické zobrazení v odraženém světle byl zkonstruován R. Chmelíkem a Z. Harnou [9]. Není známo, že by tento princip byl popsán někým jiným než Chmelíkem a kolektivem na Ústavu fyzikálního inženýrství Vysokého učení technického v Brně.

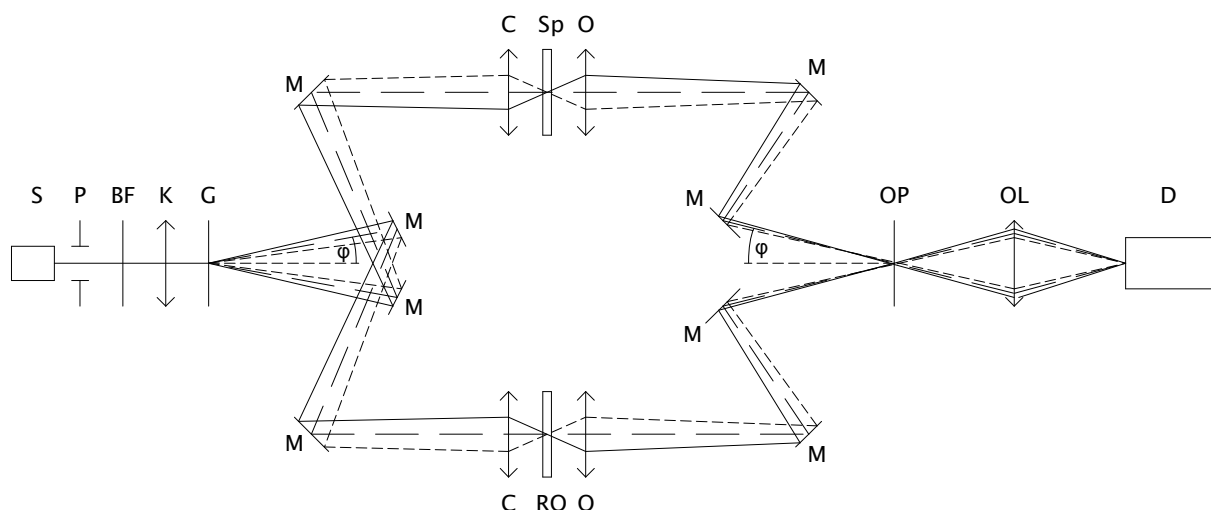
Transmisním achromatickým holografickým mikroskopem se v rámci diplomových prací zabývala I. Chytková [10] a M. Prokopová [11]. Na tuto práci navázal P. Kolman ve své disertační práci [2], ve které navrhl a zkonstruoval transmisní holografický mikroskop s mimoosovým achromatickým a prostorově invariantním interferometrem. Tento mikroskop bude dále podrobněji probrán, zvláště pak jeho konstrukční část.

3. Motivace

Na Ústavu fyzikálního inženýrství na VUT v Brně byl navržen a sestaven achromatický holografický mikroskop, který je v současné době využíván k pozorování biologických vzorků. Používáním mikroskopu se přišlo na některé nedostatky, které by bylo vhodné odstranit. Proto se v této práci budeme těmito nedostatky zabývat a budeme se snažit najít řešení. To znamená odstranit nedostatky pomocí nového konstrukčního návrhu určitých částí a návrh realizovat.

4. Koherencí řízený holografický mikroskop

Koherencí řízený holografický mikroskop (CCHM) byl zkonstruován na VUT v Brně. Jedná se o dva totožné mikroskopy, které dohromady tvoří interferometr Mach-Zehnderova typu upravený do off-axis uspořádání [6].



Obr. 2 Schéma CCHM. S - zdroj světla, P - clona, BF - interferenční filtr, K - kolektor, G - difrakční mřížka, M - zrcadla, C - kondenzory, RO - referenční objekt, Sp - pozorovaný objekt, O - objektivy, OP - výstupní rovina, OL - výstupní čočka, D - detektor.

Na obr. 2 vidíme schéma CCHM. Schéma je navrženo tak, že umožňuje použití nekoherentního zdroje osvětlení. To znamená, že jde o achromatický interferometr, který je zároveň v off-axis uspořádání, takže v sobě slučuje výhody in-line a off-axis systémů. Rekonstrukce obrazové vlny je umožněna pouze z jednoho snímku (možnost pozorování dynamických procesů). Rychlost pozorování je tedy limitována pouze záznamovým zařízením (CCD kamerou) a rychlostí zpracování obrazu v počítači. Je také umožněna hloubková diskriminace ve vzorku (možnost tvorby optických řezů) [2,6].

Obě větve CCHM jsou identické a zrcadlově symetrické z důvodu použití nekoherentního zdroje záření. Jedna větev je nazývána předmětovou a druhá referenční.

Zdroj světla (S), který může být časově a prostorově nekoherentní (možnost regulace koherence pomocí clony (P) a interferenčního filtru (BF)), je zobrazen přes kolektorovou čočku (K) a difrakční mřížku (G) do předmětových ohniskových rovin obou kondenzorů, tím je zajištěno Köhlerovo osvětlení předmětu. Poté je předmět pomocí objektivu (O) zobrazený do výstupní roviny (OP) a výstupní čočkou (OL) na detektor (D).

Difrakční mřížka (G) je transmisní fázová, pro osvětlení předmětové a referenční větve se používá +1. a -1. difrakčního řádu. Difrakční mřížka (G) a výstupní rovina interferometru (OP) jsou navzájem sdružené se společnou předmětovou rovinou objektivu (O) a kondenzoru (K). Povrch difrakční mřížky je tedy promítán do předmětových rovin objektivů, ale vzhledem k tomu, že je vytvářen pouze jedním z difrakčních řádů a struktura mřížky je pod mezí rozlišení kondenzorů, tak struktura mřížky viditelná není. Výsledná interferenční struktura vzniká až ve výstupní rovině (OL) [2].

4.1 Podmínka achromatickosti mikroskopu

Aby vzniklý holografický interferenční obrazec ve výstupní rovině byl achromatický, musí být nezávislý na vlnové délce. To znamená, že svazky o stejné vlnové délce se musí ve výstupní rovině sbíhat pod stejným úhlem, pod kterým vystupují z difrakční mřížky [6].

Fázová difrakční mřížka (G) má určitou prostorovou frekvenci f_G a paprsek po průchodu mřížkou je odkloněn pod úhlem φ , pro který platí vztah:

$$\sin \varphi = n\lambda f_G, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1)$$

kde λ je vlnová délka osvětlení a n difrakční řád.

Vlivem rozkladu světla na mřížce je odkloněný paprsek i barevně rozložený. Z rovnice (1) je patrné, že čím je větší vlnová délka λ , tím je větší i úhel odklonu φ . Interferometr je navržen pro vlnovou délku $\lambda_0 = 650 \text{ nm}$. To znamená, že světlo o této centrální vlnové délce vytváří obraz zdroje v zadních ohniskových rovinách kondenzoru (C) se středem na optické ose kondenzoru. Pro jiné vlnové délky než λ_0 je obraz příčně posunutý vůči ose [6].

Za objektivu (O) dochází k stranovému přetočení barev kolem optické osy. Pořadí barev je přesně opačné, než je tomu v ohniskových rovinách kondenzorů (C). Aby se přetočení vykompenzovalo a paprsky stejných vlnových délek interferovaly pod stejným úhlem, jsou paprsky překříženy za objektivu pomocí zrcátek (M) (viz. obr. 2). Přetočení může být také v části před kondenzory, ale nesmí být v obou částech interferometru navzájem. Kdyby k přetočení paprsků v jedné z částí nedošlo, tak by paprsky stejných vlnových délek interferovaly pod různými úhly a nebyla by splněna podmínka achromatickosti, to znamená, že by v holografickém obrazci nevznikaly proužky stejné prostorové frekvence.

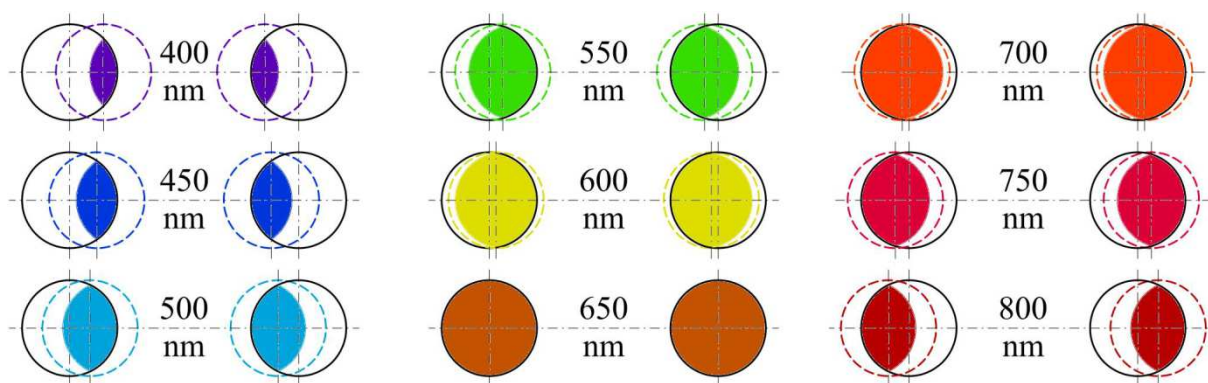
Ve výstupní rovině (OP) interferometru vzniká interferogram s prostorovou frekvencí f_{OP} , která je rovna dvojnásobku vzhledem k prostorové frekvenci f_G difrakční mřížky. To je způsobeno vznikem interference prvního a mínus prvního difrakčního řádu mřížky (G). Jestliže je prostorová frekvence f_{OP} stejná pro všechny vlnové délky λ , tak můžeme říci, že interferometr je achromatický.

4.2 Zobrazení zdroje v pupile kondenzoru

Jak již bylo řečeno v kapitole 4.1, hlavní prvkem holografického mikroskopu je difrakční mřížka, která rozděluje svazek. Protože každá vlnová délka je odkloněna pod jiným úhlem, tak i střed zdroje (S) je úhlově posunut od středu pupily kondenzoru (C). Toto posunutí je vyjádřeno vektorem, který má význam směrových kosinů. Je zapsán ve tvaru:

$$\mathbf{A}(\lambda, n) = n(\lambda - \lambda_0/|n|)\mathbf{f}_G, \quad (2)$$

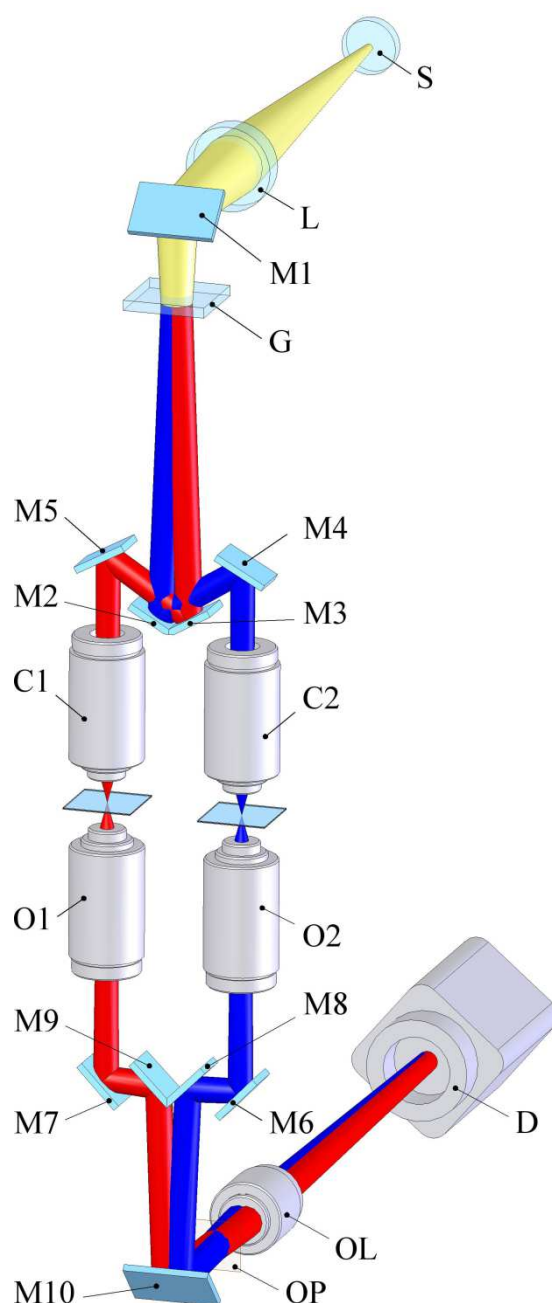
kde n je difrakční řád, λ je daná vlnová délka, λ_0 je střední vlnová délka a $\mathbf{f}_G$ je prostorová frekvence mřížky [2]. Posunutí primárního zdroje ve výstupní pupile pro různé vlnové délky je na obr. 3.



Obr. 3 Zobrazení zdroje současně do dvou pupil (referenční a objektové rameno). Černé kružnice značí vstupní pupilu kondenzorů, čárkované barevné čáry jsou zobrazení primárního obrazu plošného zdroje prvního difrakčního řádu pro danou vlnovou délku a vybarvené oblasti jsou účinné plochy zdroje. Převzato z [2].

5. Konstrukce holografického mikroskopu

Veškeré výpočty holografického mikroskopu jsou provedeny v disertační práci Pavla Kolmana [2]. Konstrukce vychází z dané polohy optických částí mikroskopu, jako je zdroj, zrcadla, difrakční mřížka, kondenzory, objektivy a detektor, jejichž poloha musí být zachována. Model optických částí sestaveného interferometru je na obr. 4.



Obr. 4 Optické schéma CCHM. S - zdroj, L - kolektorová čočka, M1 - M10 - zrcátka, G - difrakční mřížka, C1, C2 - kondenzory, O1, O2 - objektivy, OL - výstupní objektiv, D - detektor. Převzato z [2].

Poloha jednotlivých optických součástí musí být přesně nastavena, proto je možné optické prvky nastavovat pomocí posuvů. Většina optických prvků se nastaví pouze při justáži a dále se s nimi již nesmí pohybovat, protože by došlo k rozladění mikroskopu.

5.1 Popis uložení optických prvků

Jako zdroj světla je použitý běžně dostupný halogenový zdroj s regulací intenzity. Světlo je přivedeno optickým kabelem do konektoru a může být zacloněno clonami o průměru 0,2; 0,4; 0,6; 1; 2; 3; 4 a 5 mm. Těmito clonami se nastavuje velikost zdroje a tedy prostorová koherence osvětlení. Součástí osvětlení je také bariérový filtr, který odstiňuje dlouhovlnné záření, neutrální filtr, kterým se po vložení do soustavy redukuje intenzita osvětlení a interferenční filtr, jenž reguluje časovou koherenci osvětlení [2].

Musí být zajištěna přímota svazku (v horizontálním i vertikálním směru) jdoucího do mikroskopu. Nastavení je provedeno uložení vlákna a jeho postupným naklápěním, dokud není dosaženo přímoty svazku. Je zajištěna i přesná poloha revolveru se clonami, a to pomocí příčného a podélného posuvu, který zajišťují dva šrouby tlačící na paralelogram. Model mikroskopu s uloženými optickými prvky je na obr. 5.

U kolektorové čočky (L), která je uložena za osvětlovací částí (UL), je zajištěn podélný posuv, aby byla zajištěna přesná vzdálenost od zdroje, a je také umožněn její příčný posuv vůči ose, aby paprsek procházel přesně středem čočky.

Zrcadlo jedna (M1), je uloženo tak, že je umožněn jeho posuv v optické ose, jeho rotace a natáčení (NZ1).

Difrakční mřížka je umístěna společně se zrcadly (M4, M5) na nosiči mřížky (NM). Mřížka je uchycena pevně na nosiči mřížky (NM). Zrcadla M4 a M5, jsou k nosiči přidělena držákem, který umožňuje jejich naklápění. Do nosiče mřížky je vyřezán paralelogram, pomocí něhož lze posouvat jedním zrcátkem v podélném směru, a tím se mění rozdíl optických drah (OPD).

Zrcátka M2 a M3 jsou pevně umístěna v hlavě držáku kondenzorů (HDK) a není možné jejich dodatečné doladění. Na hlavě je fixován ještě paralelogram (PK), na kterém jsou umístěny kondenzory. Paralelogram zajišťuje příčný posuv kondenzorů.

Dalším optickým prvkem jsou objektivy (O1, O2), které jsou umístěny na srdci objektivů (SO). Jsou zde pevně a je umožněn pouze posuv jednoho z objektivů v optické ose. Tento posuv dovoluje doostření objektivu, kdy se jeden objektiv zaostří pohybem stolku a druhý právě tímto posuvem. Tento posuv je zajištěn paralelogramem, který je vyřezán do srdce objektivů (SO). Na srdci jsou rovněž pevně usazena zrcadla M8 a M9.

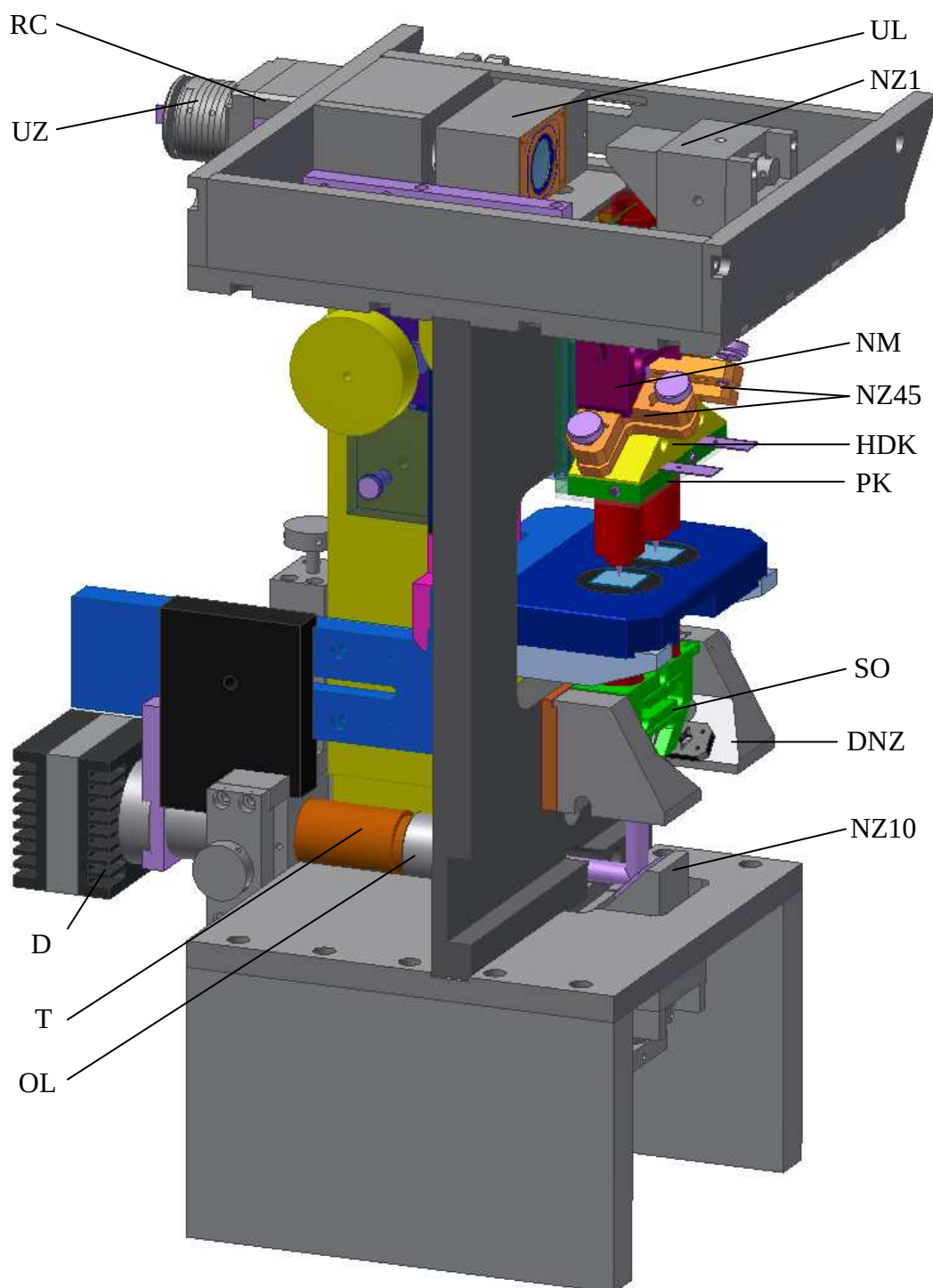
Zrcátka M6 a M7 jsou umístěna obdobně jako zrcátka M4 a M5, a je také možnost jejich naklápění.

Uložení zrcátka M10 je totožné s uložení zrcátka M1.

Výstupní objektiv OL je standardní mikroskopový objektiv. Je umístěn před detektorem, který je na tubusu (T). Detektor i čočka se pohybují v příčném i podélném směru.

Uvedli jsme si zde stručně rozložení všech optických prvků. Jejich uložení bylo navrženo tak, aby se mikroskop dal co nejpřesněji seřídit, proto je téměř u každé součásti zajištěn její posuv, naklápění, atd.

Používáním mikroskopu se ukázaly některé nedostatky, které nemohly být patrné v původním návrhu, proto se pokusíme podrobněji popsat část, kde zmíněné nedostatky jsou a navrhujeme jejich řešení.

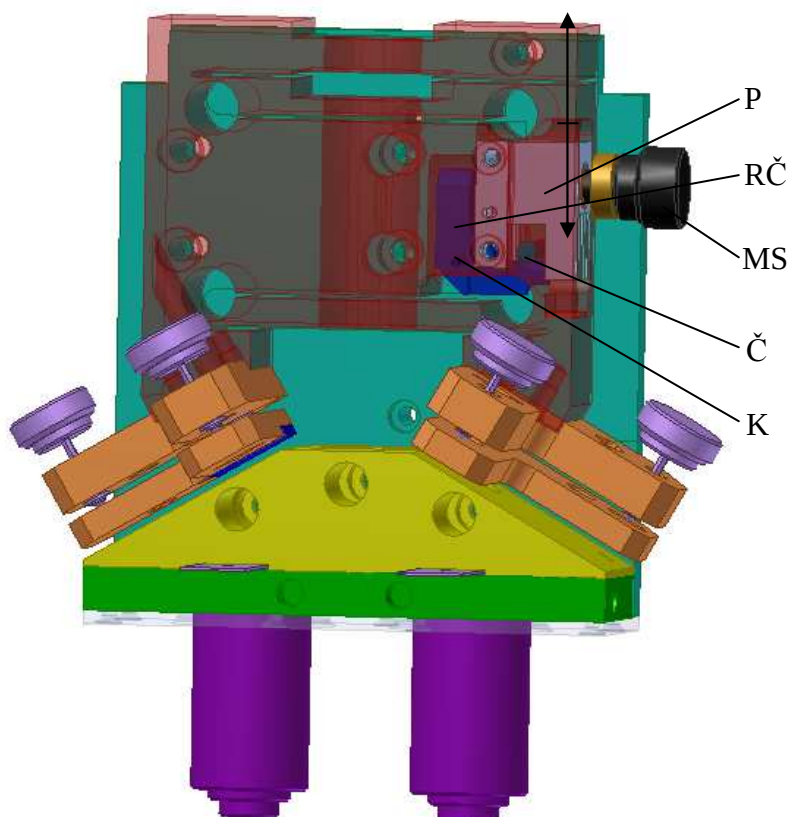


Obr. 5 UZ - uložení zdroje, RC - revolver se clonami, UL - kolektorová čočka, NZ1 - umístění zrcátka M1, NM - nosič mřížky, NZ45 - umístění zrcátek M4 a M5, HDK - hlava držáku kondenzorů, PK - paralelogram pro kondenzory, SO - srdce objektivů, DNZ - držák na naklápění zrcátek, NZ10 - umístění zrcátka M10, D - detektor, T - tubus, OL - výstupní objektiv.

5.2 Podrobné seznámení se současným stavem

Změna OPD je v současné době prováděna v části před kondenzory, kde se pomocí paralelogramu jedno ze zrcátek posouvá v podélném směru, a tím dochází ke změně délky větve. Protože se změna OPD provádí ještě v osvětlovací části před kondenzorem, tak dochází při změně OPD k příčnému posunutí odraženého paprsku, a tím se svazek dostane mimo optickou osu soustavy kondenzor - objektiv. Kvůli tomu je v novém návrhu provedena změna OPD v části za objektivy, kdy k vyosení svazku nedochází.

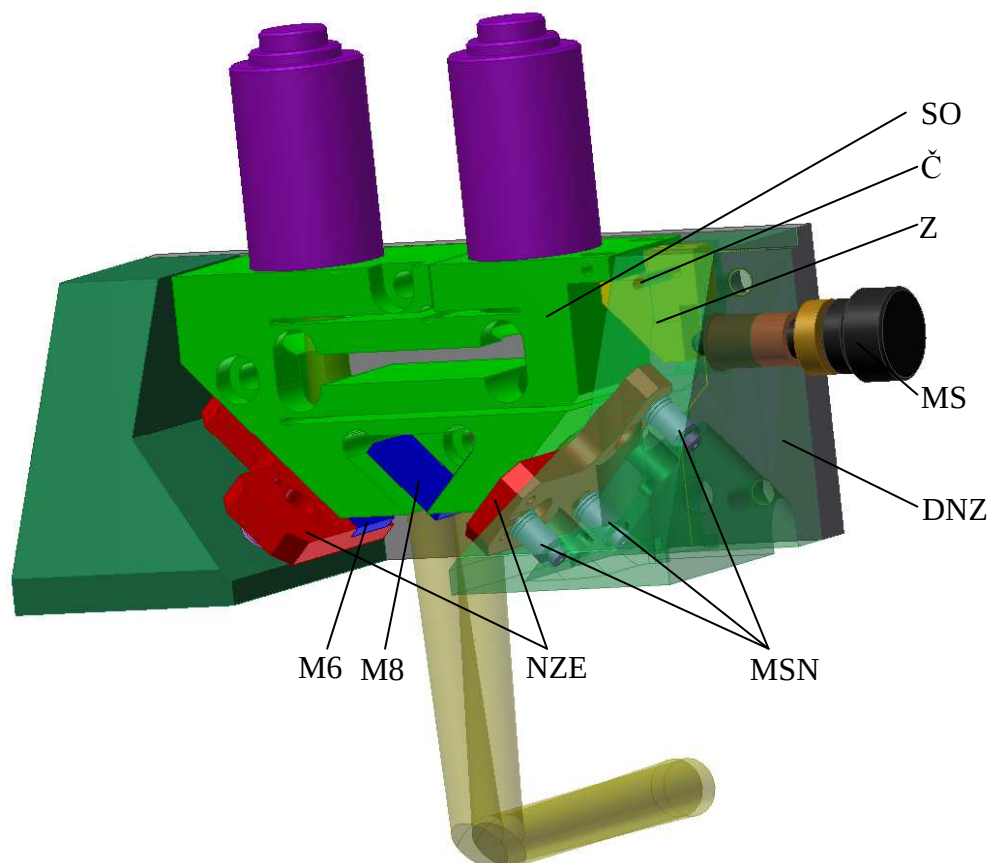
K posuvu zrcátka dochází tak, že k paralelogramu je pevně umístěný přípravek (P) s mikrometrickým šroubem (MS). Tento šroub tlačí na rotační člen (RČ), který se otáčí kolem středu kolíku (K) a působí na čep (Č). Čep je umístěn ve vnější volné části interferometru a zapříčiní ohyb kloubů v paralelogramu, a tím i posuv zrcátka nahoru nebo dolů (změna OPD).



Obr. 6 Část mikroskopu nad kondenzory. P - přípravek, RČ - rotační člen, Č - čep, K - kolík.

Jako další kritická část mikroskopu se ukázala ta, kde jsou umístěny objektivy a zrcátka M6 až M9. Objektivy a kondenzory musí být umístěny přesně proti sobě (osa objektivu a kondenzoru musí být totožná), aby paprsek procházel jejich středem. Příčný posuv je zajištěn u kondenzorů, ale ne u objektivů. Ladění polohy vůči sobě probíhá v současné době pouze pomocí kondenzorů, což je teoreticky dostačující, v praxi se ale ukázalo, že je zapotřebí zajistit i příčný posuv objektivů proto, aby paprsek procházel středem objektivů i kondenzorů a zároveň byly obrazy ve výstupní rovině přesně sesazeny na sebe.

Na obr. 7 je vidět současný stav. Řekneme, že pravá část je referenční (RA) a levá část objektová (OA). Objektivy jsou umístěny na srdci (SO), zajištěný je posuv pouze jednoho objektivu, a to v referenční větvi ve směru optické osy. Tento posuv slouží k doostření objektivu. Objektiv v nepohyblivé části se zaostřuje posuvem stolku, na kterém je umístěn vzorek. Posuv je umožněn paralelogramem, na který tlačí ve spodní části přes kuličku zobáček (Z). Zobáček vykonává rotační pohyb kolem čepu (Č). Tento pohyb zobáčku dovoluje mikrometrický šroub (MS), umístěný v držáku na naklápění zrcátek (DNZ). V tomto držáku se nachází i čep (Č) se zobáčkem (Z).



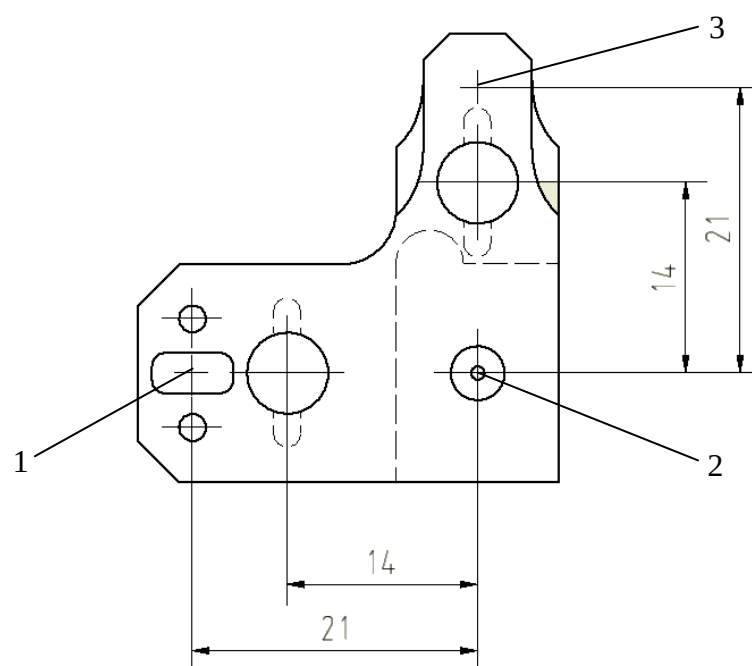
Obr. 7 Současný stav mikroskopu za objektivů. SO - srdce objektivů, Č - čep, Z - zobáček, MS - mikrometrický šroub, DNZ - držák na naklápění zrcátek, MSN - mikrometrické šrouby na naklápění, M - zrcátka, NZE - naklápění vnějších zrcátek.

Další optické prvky jsou zrcátka M6 - M9. Vnější zrcátka (M6, M7) se mohou naklápět vůči svému středu díky mikrometrickým šroubům (MSN), které působí na rameni dlouhém 21 mm. To se při používání ukázalo jako nedostačující, protože citlivost naklápění je při této délce ramene malá. Vnitřní zrcátka (M8, M9) jsou spojena se srdcem pevně a nemohou se posouvat ani naklápět.

Na obr. 8 již můžeme vidět součást (NZE), ve které je umístěno vnější zrcátko, pomocí níž je zajištěno jeho naklápění. Naklápění je prováděno mikrometrickými šrouby, které působí v místech 1, 2 a 3. Vzhledem k tomu, že mikrometrické šrouby působí ve třech místech, je možné zrcátko výškově stavět. Správná výška se však nastavuje pouze při justáži, a to

mikrometrickým šroubem působícím v místě 2. Po justáži se již s tímto šroubem nesmí otáčet. V místě 2 je středící důlek, který zajišťuje zamezení příčného posuvu zrcátka. V místě 1 je drážka, která slouží jako vodící pro pohyb mikrometrického šroubu. V místě 3 působí mikrometrický šroub pouze na rovinnou plochu součásti.

Na šrouby je tažnými pružinami vyvíjen protitlak, což umožňuje pohyb součásti (NZE), i když se šrouby povolují. Protitlak od pružin je rozložený rovnoměrně mezi tři šrouby. Aby bylo dosaženo stejného přítlaku na všechny tři šrouby, tak pružiny působí v těžišti, což odpovídá vzdálenosti $2/3$ od středu otáčení (bod 2). V našem případě je tato vzdálenost 14 mm.



Obr. 8 Součást na naklápění vnějších zrcátek (NZE).

6. Možné konstrukční úpravy

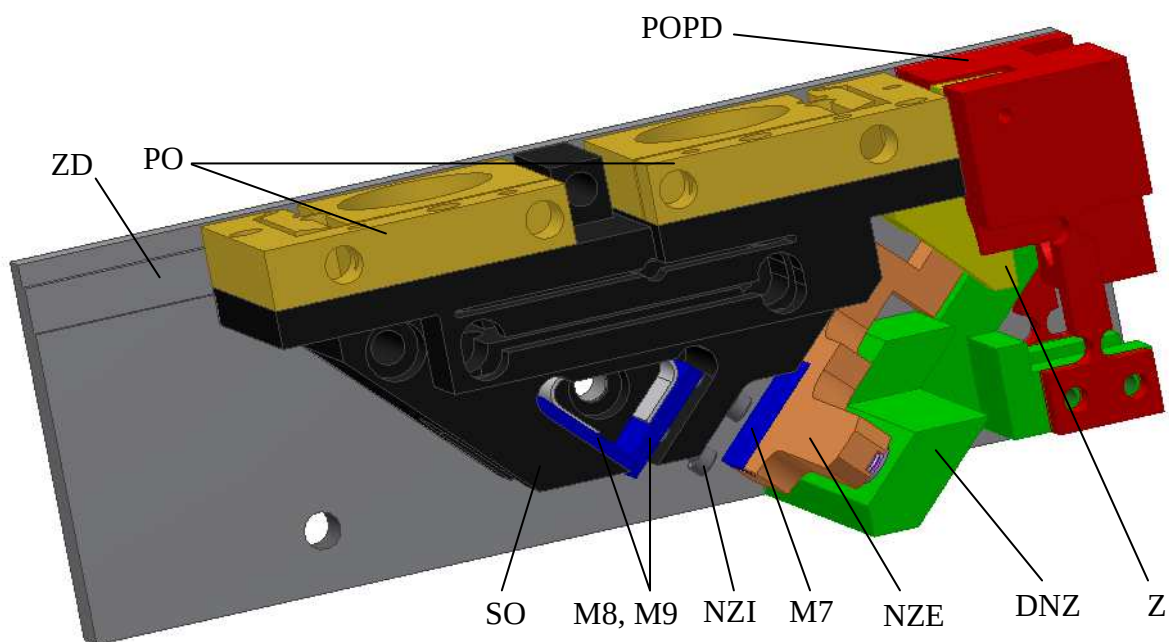
V předchozí kapitole jsou popsány nedostatky současného sestavení mikroskopu a teď se budeme věnovat návrhům řešení a výběru nejvhodnějšího z nich. Ten je pak podrobně popsán a je realizováno jeho řešení.

Shrnutí hlavních požadavků:

- zajistit posuv objektivů v příčném směru
- umožnit změnu OPD v části za objektivy
- zajistit větší citlivost naklápění zrcátek M6 a M7
- zachovat pozici všech optických prvků
- umožnit jednoduchou montáž nového návrhu do stávajícího mikroskopu

6.1 První konstrukční návrh

Protože se jedná pouze o návrh, nejsou vyřešeny všechny detaily, a také je navrhnutá pouze jedna strana (nejsou zde párové součásti).

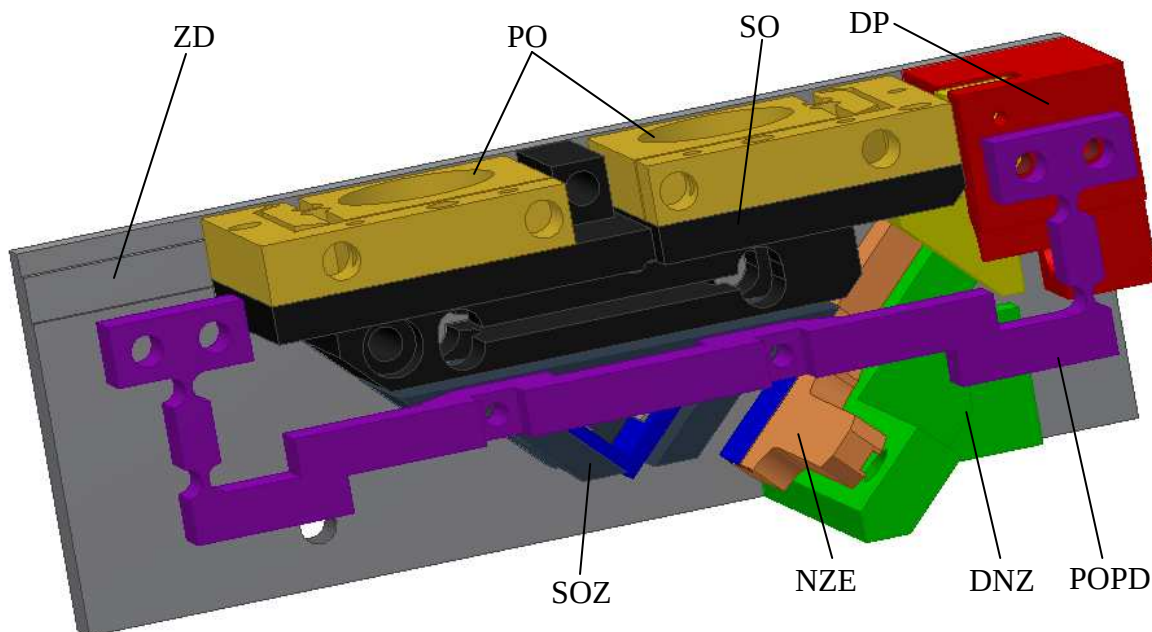


Obr. 9 První návrh. PO - posuv objektivů, SO - srdce, M7 - 9 - zrcátka, ZD - základní deska, POPD - změna OPD, NZE - naklápění vnějších zrcátek, DNZ - držák naklápění zrcátek, NZI - naklápění zrcátek vnitřních, Z - zobáček.

V tomto návrhu dochází k posuvu objektivů pomocí paralelogramu (PO) v příčném směru. Díky šroubům v srdci (SO) je také umožněno naklápění vnitřních zrcátek (NZI). OPD je umožněno posuvem vnějších zrcátek. Zrcátka se posouvají společně s naklápěním zrcátek (NZV) a držáku na naklápění zrcátek (DNZ), který je k paralelogramu (POPD) připevněn. Je zajištěna i větší citlivost naklápění vnějších zrcátek, kdy šrouby působí na rameni 42 mm, což je dvojnásobek oproti současnému stavu. Zachována byla i pozice všech optických prvků a je také možná snadná montáž do mikroskopu, protože byla zachována pozice děr se závity na základní desce, které pasují přesně k protikusu na mikroskopu.

6.2 Druhý konstrukční návrh

Na obr. 10 můžeme vidět další návrh, který je obdobný jako první, jedinou změnou je, že změna OPD není zajištěna posuvem vnějších zrcátek, nýbrž zrcátek vnitřních. Srdce (SO) je zde rozděleno na dvě části. U části, kde jsou uložena zrcátka, je zajištěný posuv přes paralelogram, který je uchycen na držáku (DP). DNZ je pevně přichycený k základní desce (ZD).



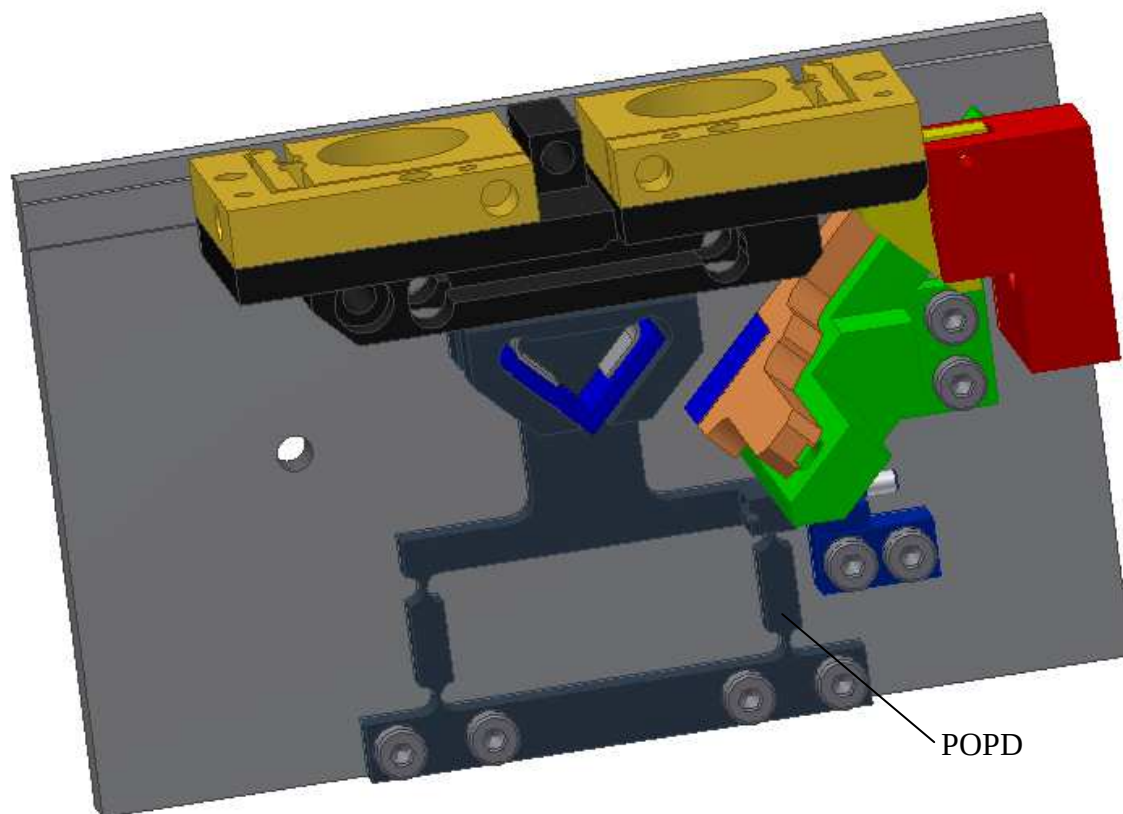
Obr. 10 Druhý návrh. ZD - základní deska, PO - posuv objektivů, SO - srdce objektivů, DP -držák POPD, POPD - změna OPD, DNZ - držák naklápění zrcátek, NZE - naklápění vnějších zrcátek, SOZ - drdce objektivů se zrcátky.

6.3 Třetí konstrukční návrh

Třetí návrh (obr. 11) je pouze úprava druhého návrhu, kdy některé prvky byly zjednodušeny a základní deska byla prodloužena směrem dolů, aby se paralelogram mohl umístit na spodní část základní desky a vnitřní zrcátka mohla být umístěna přímo na něm. Tím se odstraní jedna část (PODP viz. obr. 10), která by mohla vnášet do soustavy nepřesnosti. Byly také odstraněny šrouby na naklápění vnitřních zrcátek, protože pro umístění šroubů je zde málo místa.

U návrhů je zachována poloha všech optických prvků, umožňujících příčný a podélný posuv objektivů, zvětšena citlivost naklápění vnějších zrcátek (rameno naklápění je u všech návrhů zvětšeno dvojnásobně z 21 mm na 42 mm). Dále je umožněna změna OPD posuvem vnitřních nebo vnějších zrcátek. Je zachována i poloha závitových děr v základní desce, pomocí nichž bude nový návrh připevněn k tělu mikroskopu.

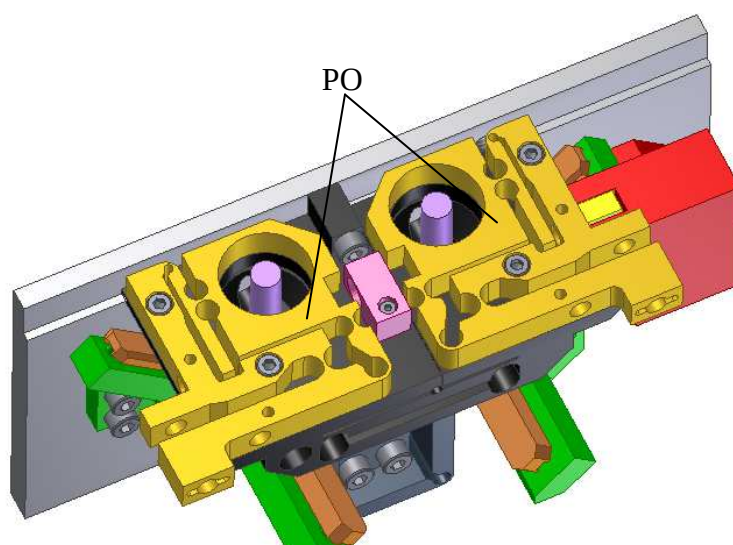
Jako hlavní kritérium, podle kterého se určovalo jaký návrh vybrat, a který dále upravovat, byla možnost změny OPD. Ta lze provádět párovým posuvem vnitřních nebo vnějších zrcátek. Vybrán je posuv vnitřních zrcátek, a to hlavně z toho důvodu, že nemusíme složité spojovat dvě oddělené části, na kterých jsou umístěna vnější zrcátka. Navíc při posuvu vnitřních zrcátek se posouvá méně součástí a celkové řešení je o mnoho jednodušší. Proto je dále rozvíjen posuv vnitřních zrcátek.



Obr. 11 Třetí návrh. POPDP - změna OPD.

Bylo také provedeno několik úprav, ale ty se od sebe nelišily principem, pouze úpravou jednotlivých prvků, proto je zde uveden už jen jeden mezinávrh, který nakonec vedl ke konečné podobě.

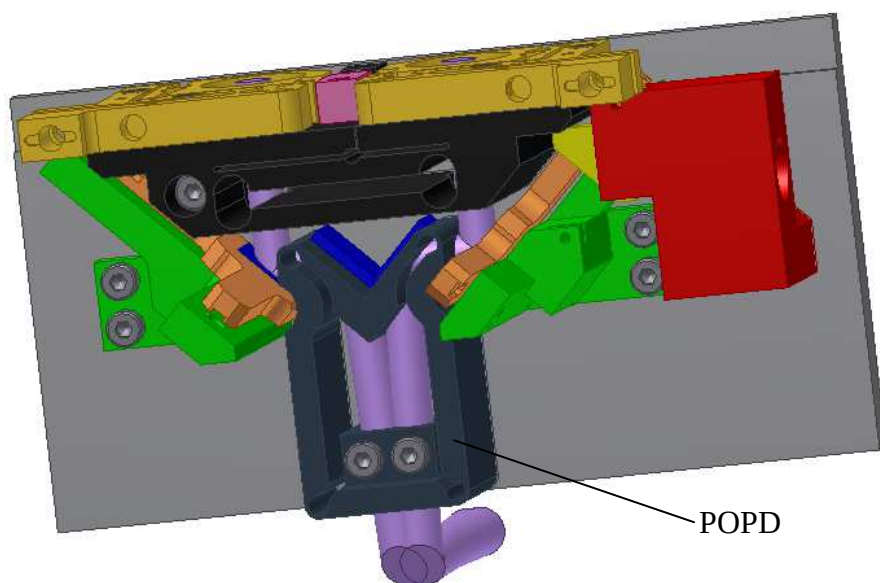
6.4 Čtvrtý návrh



Obr. 12 Čtvrtý návrh - paralelogramy. PO - posuv objektivů.

V tomto návrhu je již ujasněn směr, jakým budou úpravy probíhat. Je zajištěna větší citlivost posuvu objektivů, díky paralelogramům, které dovolují příčný posuv přes páku (obr. 12). Dále je ujasněn způsob změny OPD, který se bude provádět párovým posuvem vnitřních zrcátek přes paralelogram. Ten je umístěn ve spodní části základní desky. Základní deska byla prodloužena na maximální možnou hodnotu, aby měl paralelogram co největší ramena a aby se otáčivý pohyb, který paralelogram při posuvu vykonává, konal na co největším rameni, tudíž by se dal otáčivý pohyb považovat za rovinný (obr 13).

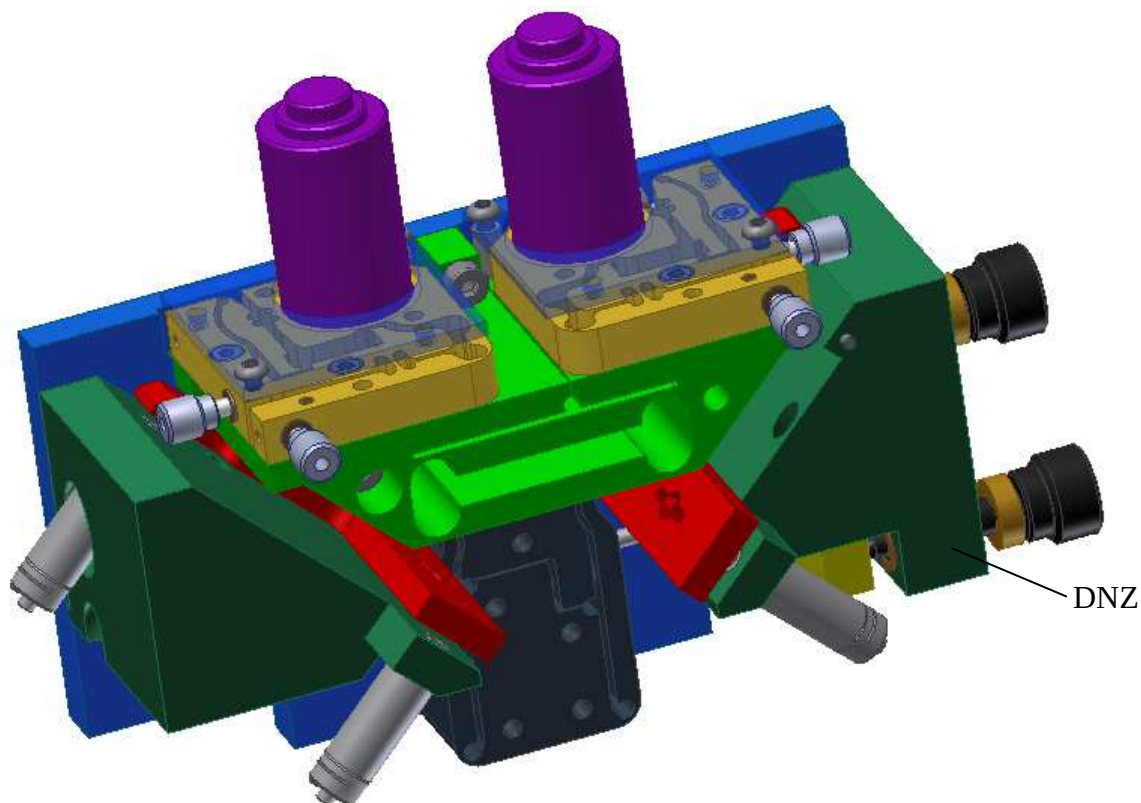
V další kapitole je popsán výsledný návrh a jsou podrobně rozebrány jednotlivé součásti, a je také řečeno, proč byly navrženy zrovna tímto způsobem a jaké jsou výhody tohoto řešení.



Obr. 13 Čtvrtý návrh - pohled zepředu. POPD - změna OPD.

7. Výsledný návrh

Na obr. 14 je zobrazen výsledný návrh, ke kterému je zhotovena výkresová dokumentace a je realizována jeho výroba.

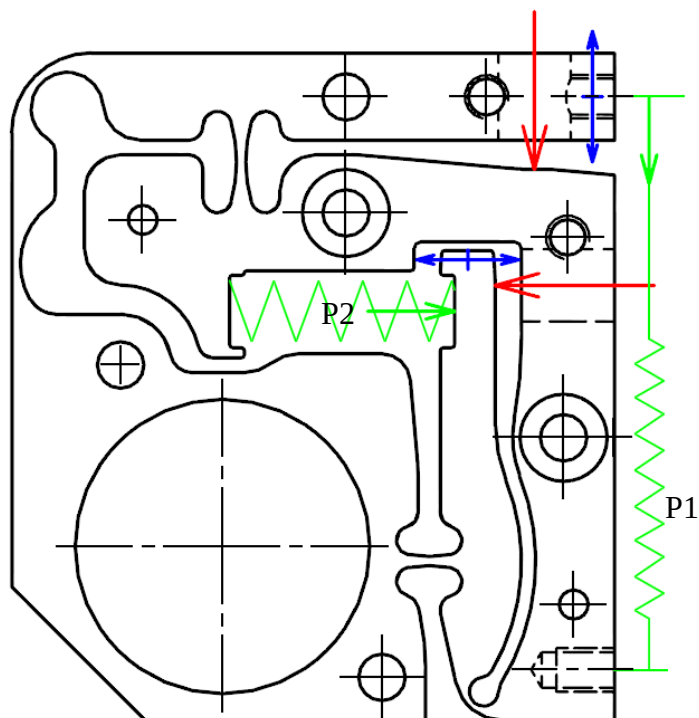


Obr. 14 Výsledný návrh.

Na první pohled lze vidět částečnou podobu s návrhem čtyři (obr. 12, 13). Princip je totožný, pouze držák na naklápění zrcátek (DNZ) je spojen dohromady s držákem na zobáčku, čímž se zjednoduší výroba. V dalším textu si podrobně popíšeme jednotlivé součásti.

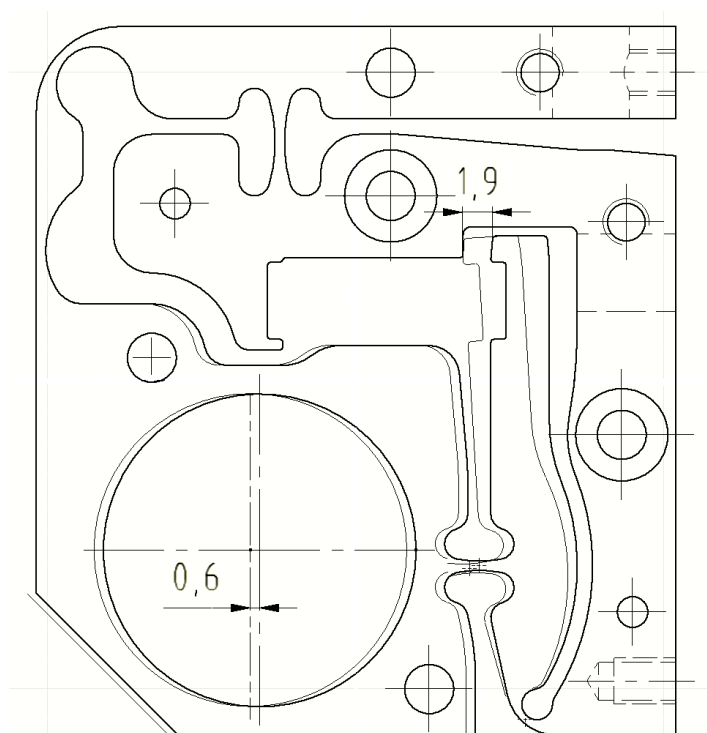
7.1 Posuv objektivů

Na obr. 15 je vidět posuv objektivů. Celý posuv je řešen pomocí paralelogramu, který je vyřezán do mosazi. Mosaz byla zvolena kvůli vysoké mezi kluzu ($Re = 200 - 300 \text{ MPa}$ [13]). Červenými šipkami jsou na obr. 15 vyznačena místa, na která působí mikrometrický šroub. Aby byl posuv zajištěn i při povolování šroubů, tak jsou v paralelogramu umístěny pružiny (P1, P2). Směr pohybu páky je vyznačený modrými šipkami.



Obr. 15 Posuv objektivu - síly. P1 - pružina 1. P2 - pružina 2.

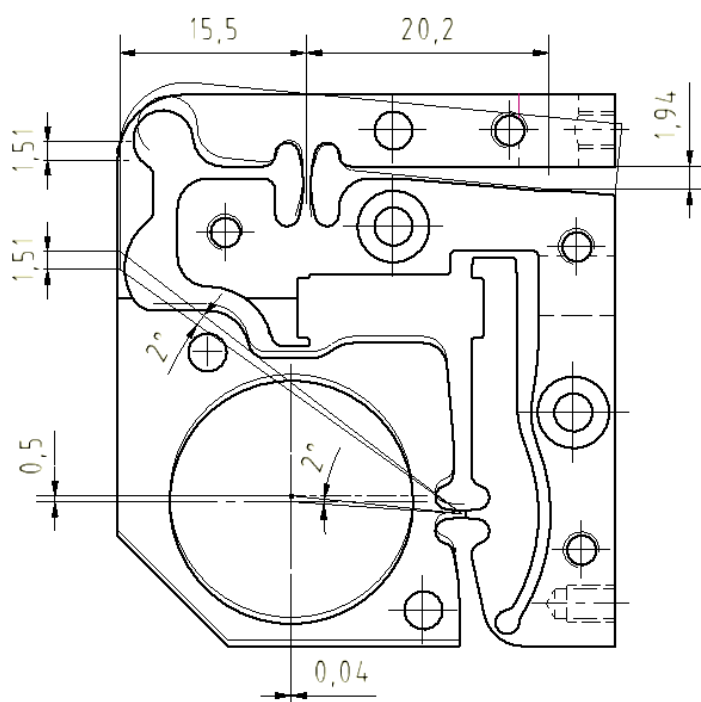
Pohyb objektivu probíhá v rozmezí $\pm 0,6 \text{ mm}$ v horizontálním směru (obr. 16) a $\pm 0,05 \text{ mm}$ ve vertikálním (obr. 17). Většímu pohybu zabrání paralelogram, který byl vyřezán s dorazy. Obr. 16 je simuluje pohyb pravé páky. Je zde také ukázáno, o kolik se posune střed s objektivem, jestliže se páka dostane do své maximální polohy.



Obr. 16 Pohyb pravé páky a její vliv na posuv středu.

Posuv je zajištěn pákou, na kterou působí mikrometrický šroub, který je umístěn v bronzovém závitovém pouzdře se závitem $M3 \times 0,2$. Takže na jedno otočení závitu se páka posune o $0,2 \text{ mm}$ v místě, kde tlačí šroub, to znamená, že střed objektivu se posune o pouhých $0,07 \text{ mm}$. Od nulové polohy páky do polohy, kdy se posuv zastaví o doraz, můžeme udělat 8,6 otáčky šroubem. To samé platí i pro pohyb na druhou stranu.

V dalším obrázku (obr. 17) je nasimulované otáčení horní páky. To je z důvodu zvětšení citlivosti uděláno přes pákový mechanismus. Je zde použitý totožný mikrometrický šroub, který je také umístěn v bronzovém pouzdře se závitem $M3 \times 0,2$. Takže na jednu otáčku nastane v místě osy šroubu posun $0,2 \text{ mm}$ a střed objektivu se posune o $0,052 \text{ mm}$, takže šroubem můžeme z nulové polohy otočit o 9,6 otáčky.



Obr. 17 Pohyb horní páky a její vliv na posuv středu.

Otočení horní páky má doraz pouze na jedné straně, na druhé je toto vyřešeno podložkou, pomocí které je délka závitu zkrácena na potřebnou tak, aby byl dodržen stejný rozsah pohybu jako v opačném směru.

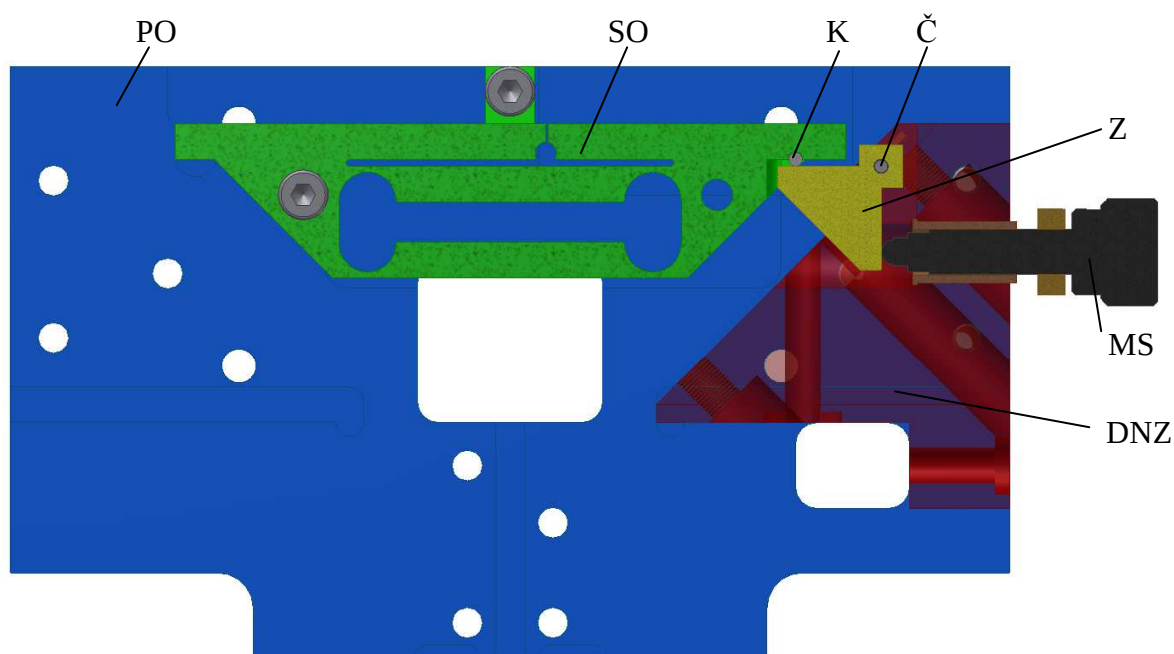
Jak již bylo řečeno v úvodu této kapitoly, jako materiál je použita mosaz, kvůli její mezi kluzu. Již z obrázků může být patrné, že jednotlivé klouby v paralelogramu budou extrémně namáhány na ohyb. Potřebujeme tudíž, aby docházelo pouze k elastické deformaci. Proto jsou i poloměry jednotlivých kloubů navrženy s největším možným poloměrem, aby deformace v kloubech byla více rozložena a klouby měly co největší životnost.

Protože se část s objektivem pohybuje a je nutné zajistit, aby tento pohyb probíhal bez problémů, je u pohyblivé části ubrán materiál o $0,02 \text{ mm}$, tím nebude docházet ke styku s jiným materiálem při pohybu a malé nerovnosti nebo nečistoty nebudou vadit v plynulosti pohybu.

7.2 Srdce objektivů

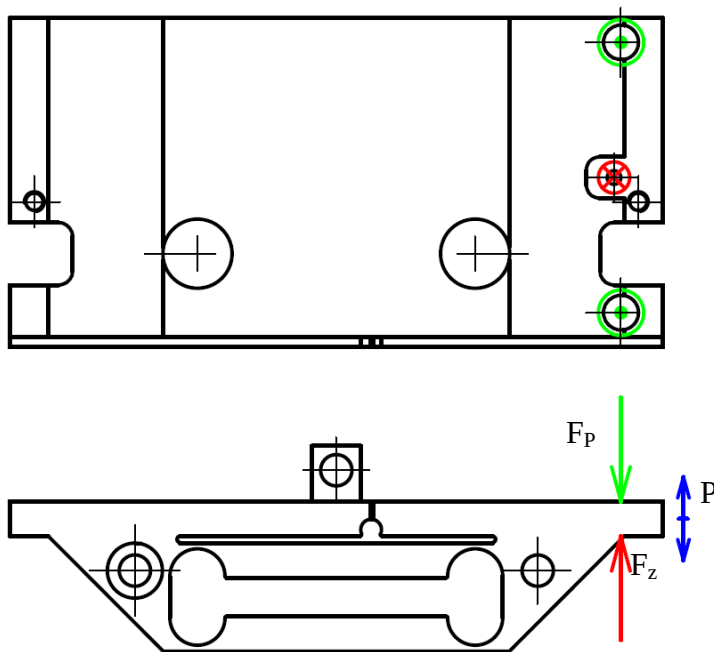
Srdce objektivů je součást, na které jsou umístěny paralelogramy na posuv objektivů. Ty jsou popsány v předchozí kapitole. Srdce objektivů je pevně spojeno se základní deskou (ZD), ale pouze tak, aby byl umožněn pohyb jednoho z objektivů v podélném směru (nahoru a dolů). Posuv je také zajištěný paralelogramem, který je do srdce vyřezán. A protože rozsah tohoto pohybu je velice malý a ramena paralelogramů jsou dlouhá, tak je jako materiál použita slitina hliníku (AlCuMgPb).

Stejně jako u posuvu objektivů nedochází ke styku pohyblivé části s jinou součástí, tak i u srdce objektivů je zajištěno, aby k tomuto styku nedocházelo, v tomto případě je vybrání provedeno v základní desce. Na obr. 18 můžeme vidět srdce objektivů (SO) a místo, na které působí síla (v místě kuličky (K)), která zajišťuje pohyb části v podélném směru. Pohyb je zajištěný přes zobáček (Z), který koná otáčivý pohyb přes čep (Č) umístěný v držáku na naklápění zrcátek (DNZ) a je na něj tlačeno mikrometrickým šroubem (MS). Zobáček (Z) působí na kuličku (K), umístěnou v zahluobené díře na srdci objektivů (SO) a bodově se dotýkající zobáčku. Aby nedocházelo k přílišnému otláčení zobáčku, je zobáček vyrobený z mosazi. Zpětný posuv při povolování šroubu je zajištěn dvěma tažnými pružinami, kde jeden konec je umístěn na srdci objektivů a druhý na držáku na naklápění zrcátek (DNZ).



Obr. 18 SO - srdce objektivů, Z - zobáček, Č - čep, K - kulička, DNZ - držák na naklápění zrcátek, MS - mikrometrický šroub, D - základní deska.

Na obr. 19 jsou ukázány síly, které v paralelogramu působí od pružin a od mikrometrického šroubu. Mikrometrický šroub má jemné nastavení $25 \mu m$. A proto, že je kulička umístěna ve stejné vzdálenosti od čepu, jako je vzdálenost působení mikrometrického šroubu od čepu, tak se na jedno otočení objektiv posune o stejnou vzdálenost, tj $25 \mu m$.

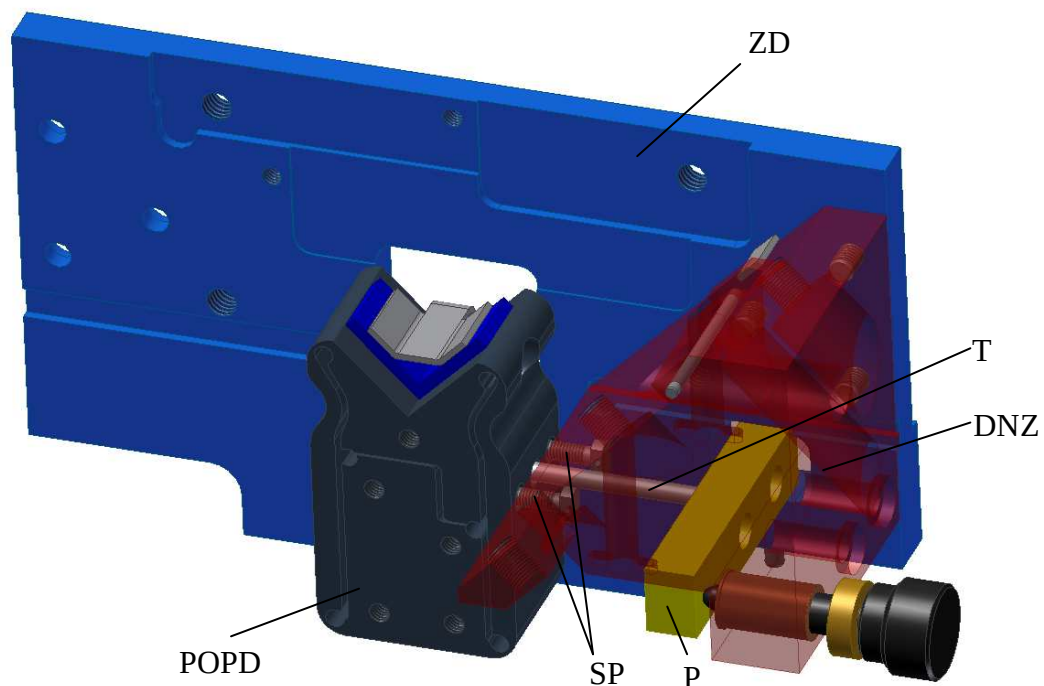


Obr. 19 Srdce - působící síly. F_p - síla od pružiny, F_z - síla od zobáčku, P - posuv.

7.3 Změna rozdílu optických drah

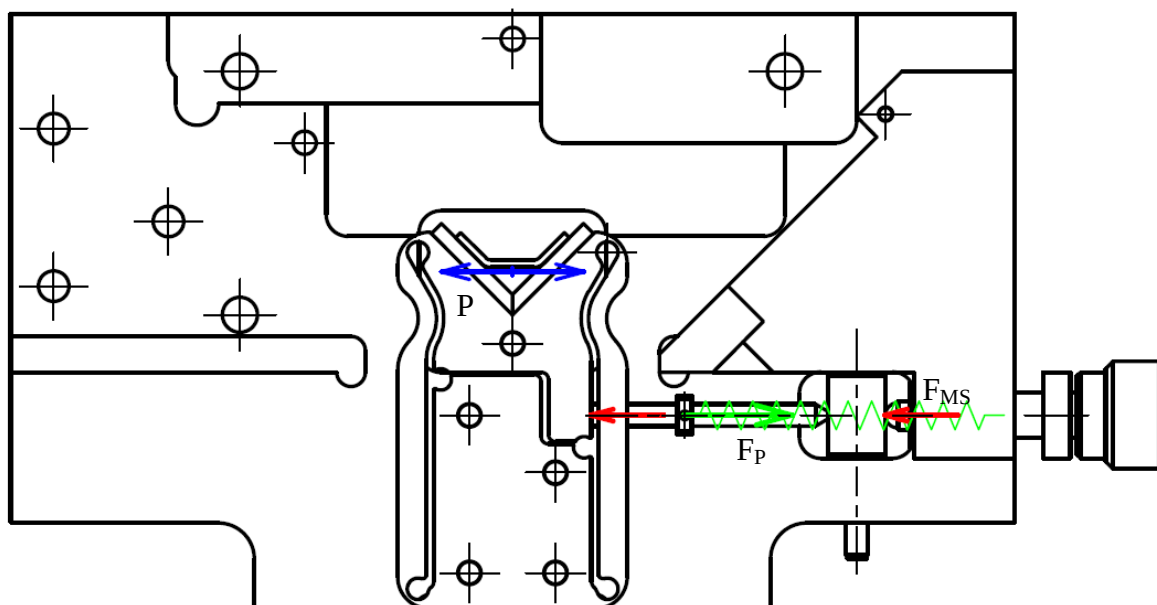
Změna OPD je prováděná také pomocí paralelogramu. Jsou na něm umístěna vnitřní zrcátka, kdy právě pohybem těchto párových zrcátek dochází ke změně rozdílu optických drah. Je velice důležité, aby zrcátka svírala pravý úhel mezi sebou a zároveň svírala úhel 45° s osou interferometru a ještě měla přesně stanovenou výškovou polohu. Tohle je umožněno tvarovými spoji na paralelogramu a základní desce, které do sebe zapadají. Je kladena velká přesnost na jejich výrobu (kolmost, rovnoběžnost). Aby byla zaručena i přesná poloha zrcátek vůči základní desce, je tvar „V“ řezán, až když je paralelogram připevněný pomocí šroubů a tvarových spojů k základní desce (tvarové spoje jsou ukázány v kapitole 7.5).

Ke změně optických drah dochází vlivem mikrometrického šroubu, který je uložený v DNZ a působí na páku (P). Ta je uložena v základní desce (ZD) na čepu a koná otáčivý pohyb, dále tato páka působí na trn (T), který je umístěný mezi pákou a paralelogramem ($POPD$). Zpětný pohyb zajišťují dvě pružiny, které jsou pomocí šroubů (SP) přichyceny k paralelogramu, a dále ještě přichyceny k DNZ. Protože síla musí působit na vnitřní část paralelogramu, je pohyb konán pomocí trnu a v paralelogramu jsou zhotoveny tři otvory, kdy ve středním je trn a v bočních šrouby, na kterých jsou přichyceny pružiny.



Obr. 20 ZD - základní deska, P - páka, DNZ - držák na naklápění zrcátek, POPD - změna OPD, SP - šrouby na pružiny.

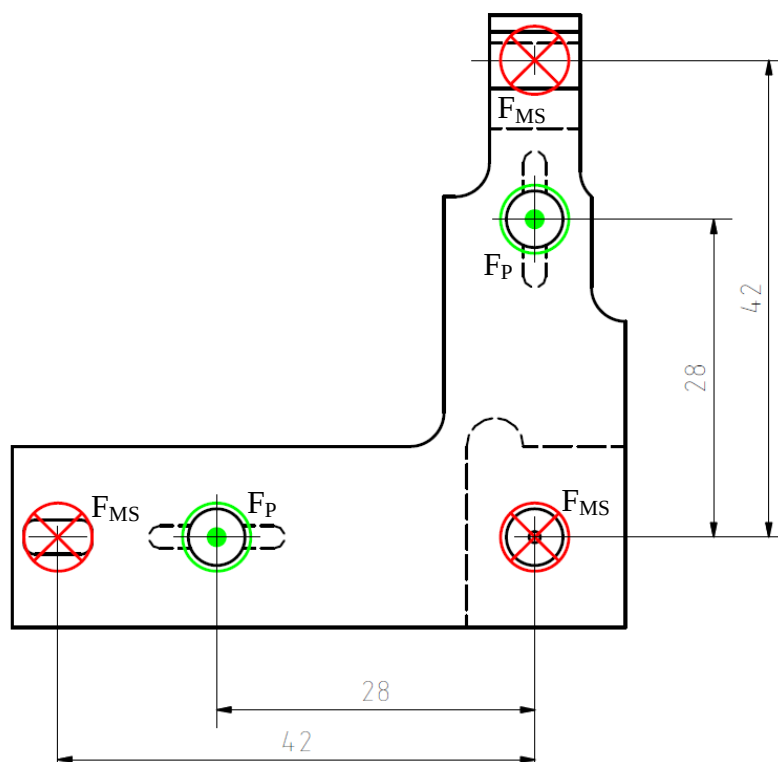
Na obr. 21 jsou ukázány síly, které působí na paralelogram. Tenkou zelenou čarou je schematicky zakreslena pružina, která působí silou F_P ve vyznačeném směru. Červenou čarou je zobrazena síla F_{MS} , kterou působí šroub na páku. Pomocí ní pak působí trn na paralelogram.



Obr. 21 P - posuv, F_P - síla od pružiny, F_{MS} - síla od mikrometrického šroubu.

7.4 Naklápění vnějších zrcátek

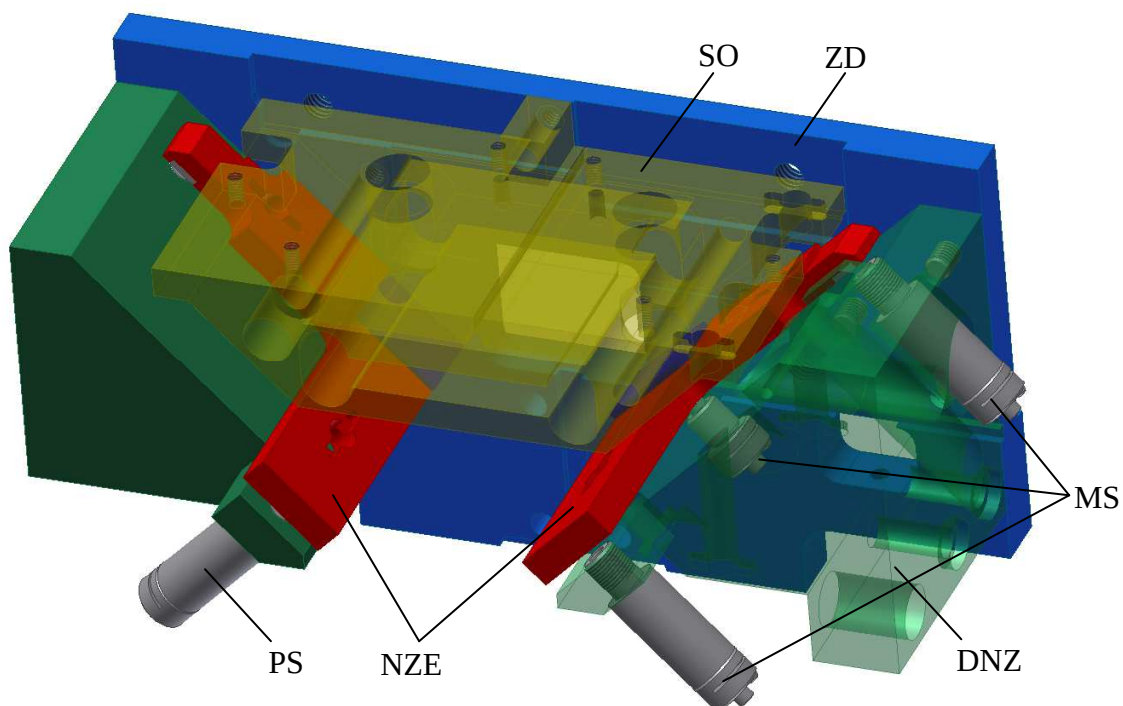
Požadavek na naklápění vnějších zrcátek byl takový, že oproti současnému stavu má mít delší ramena naklápění, ale pozice zrcátek má být zachována. Na obr. 22 je vidět konečný návrh řešení, kdy se ramena prodloužila na dvojnásobek původní délky, z 21 mm na 42 mm. Naklápění zrcátek je provedeno úplně stejně, jako je uvedeno v kapitole 5.2., pouze se prodloužila ramena a tím se i posunula pozice přitlačných pružin, které musí být ve 2/3 délky ramene.



Obr. 22 F_P - síla od pružiny, F_{MS} - síla od mikrometrických šroubů.

Na obr. 23 je ukázáno naklápění zrcátek a všechny další části, které souvisejí s naklápěním. Naklápění je umožněno dvěma mikrometrickými šrouby (MS). Třetí šroub (MS), který působí ve středu zrcátka, a kolem něhož probíhá naklápění zrcátka, slouží jako stavěcí. Naklápěcí mikrometrické šrouby (MS) jsou umístěny v přípravku (PS), ve kterém je zalícovaný kolík (uložení H7/h6), a teprve přípravek je pevně umístěn v DNZ. Středový stavěcí mikrometrický šroub je přichycen přímo na DNZ, a tudíž je k němu složitý přístup. Tím se zabrání jeho nechtěnému otočení po justáži.

Na obr. 23 je také vidět, že při dvojnásobné délce ramen (NZE) bude rameno kolidovat se srdcem (SO), proto je v srdci uděláno vybrání, do kterého bude rameno zapadat.

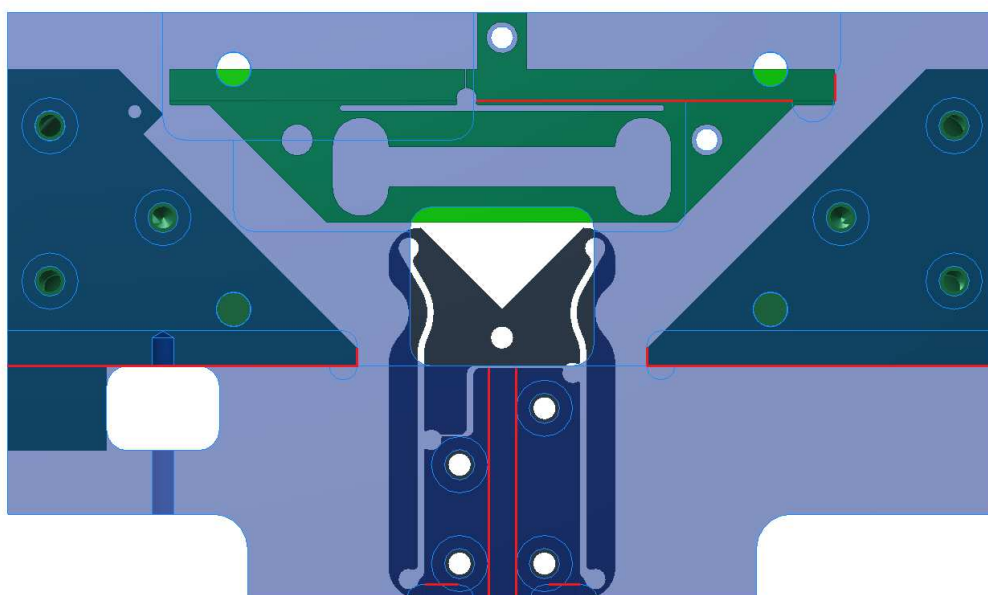


Obr. 23 SO - srdce objektivů, ZD - základní deska, MS - mikrometrické šrouby, DNZ - držák na naklápění zrcadel, NZE - naklápění vnějších zrcadel, PS - přípravek na mikrometrický šroub.

7.5 Základní deska

Veškeré součásti nového návrhu mikroskopu jsou umístěny na základní desce, která je kompatibilní s předchozí deskou. V desce jsou čtyři díry se závitem M6. Pomocí těchto děr je deska přidělána k mikroskopu.

Dále je na desce 10 děr o průměru $4,3\text{ mm}$. Šest je použito k přichycení DNZ v referenční a objektové větvi a pomocí zbývajících čtyř děr je přichycený paralelogram pro změnu OPD. U všech děr průměru $4,3\text{ mm}$ je uděláno zahlužení o průměru 8 mm pro zapuštění šroubů.



Obr. 24

Na obr. 24 je vidět základní deska, na které jsou červenou barvou vyznačeny dosedací a opěrné plochy, které při montáži součástí na desku zajistí jejich přesnou polohu. Na základní desce je také osazení, které zajistí přesnou polohu při montáži na mikroskop.

V této kapitole jsou podrobně popsány jednotlivé součásti, jejich pozice na základní desce a proč byly tyto součásti navrhnuté zrovna tímto způsobem. U všech paralelogramů je velmi důležitá přesnost jejich výroby, zvláště pak přesnost jednotlivých kloubů a navíc jsou i velmi tvarově složité, proto byla jako obráběcí metoda pro paralelogramy zvolena metoda elektroerozivního obrábění, jinak nazývána metoda řezání drátem. V následující kapitole si stručně popíšeme její charakteristiku.

7.6 Elektroerozivní řezání drátem

Některé součásti na mikroskopu jsou vyrobeny pomocí technologie obrábění drátem, proto se touto metodou stručně zabýváme v následujících odstavcích. Je zde řečeno, co to metoda řezání drátem je a proč obrábíme právě touto metodou.

Řezání drátem je nekonvenční technologie, která se neřadí do klasického třískového obrábění, ale jde o bezsilové působení obráběcího nástroje na obrobek. Elektroerozivní řezání patří do skupiny obrábění elektrickým výbojem (EDM). Princip metody spočívá v elektroerozi, kde dochází k úběru materiálu mezi anodou (nejčastěji obráběcí nástroj) a katodou (obrobek). Tímto způsobem se taví a odpařují mikroskopické částičky obrobku. Proces obrábění probíhá v prostředí dielektrika. Touto metodou lze obrobit pouze materiály s elektrickou vodivostí [12].

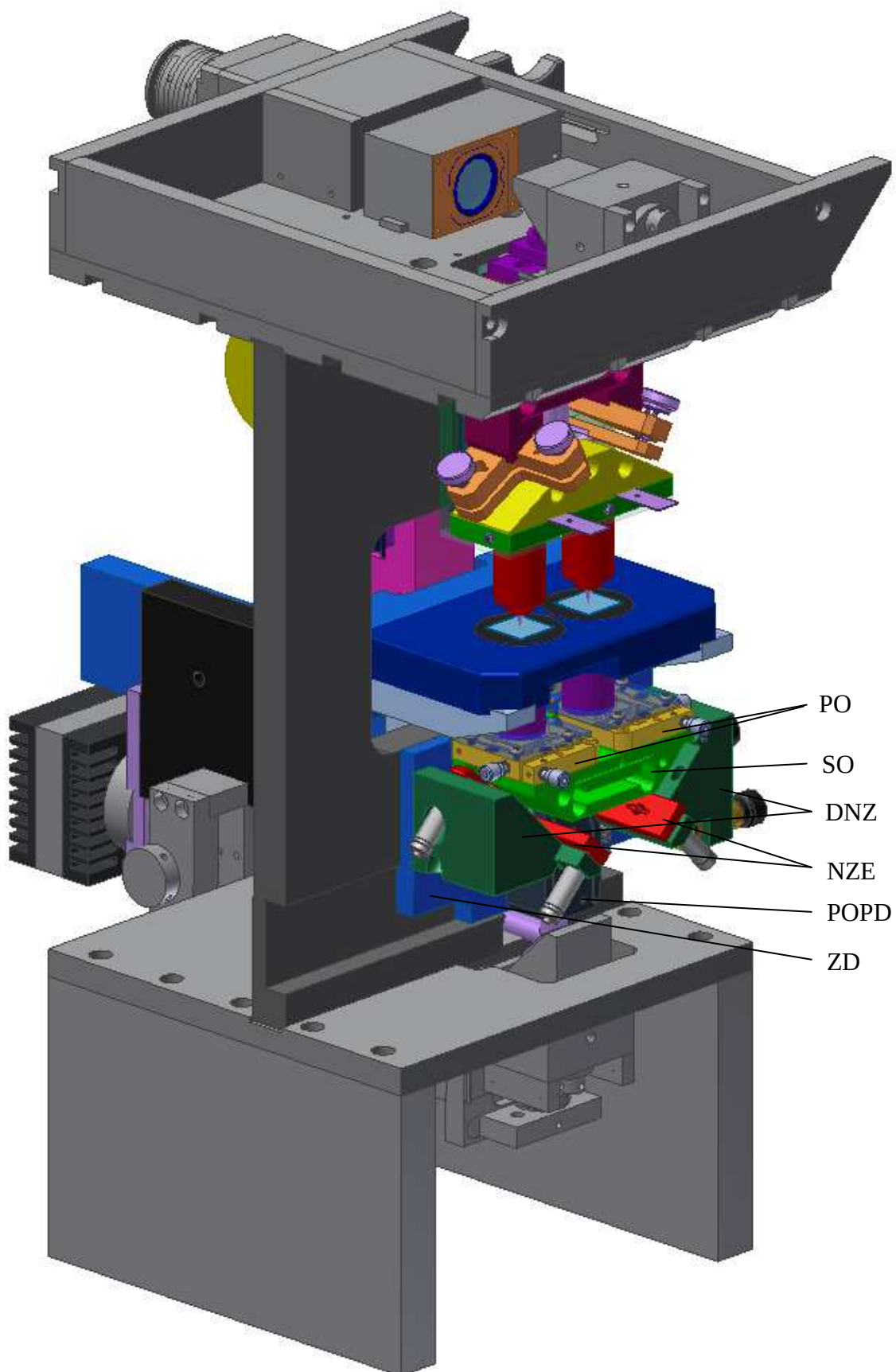
Elektroerozivní obrábění se využívá při obrábění přesných a tvarově složitých součástí, které mohou být z těžkoobrobitelných materiálů a jinou metodou by nebylo možné je obrobit. Navíc tato metoda dosahuje velkých přesností a drsnosti povrchu Ra 0,2.

8. Model sestavy s novým konstrukčním řešením

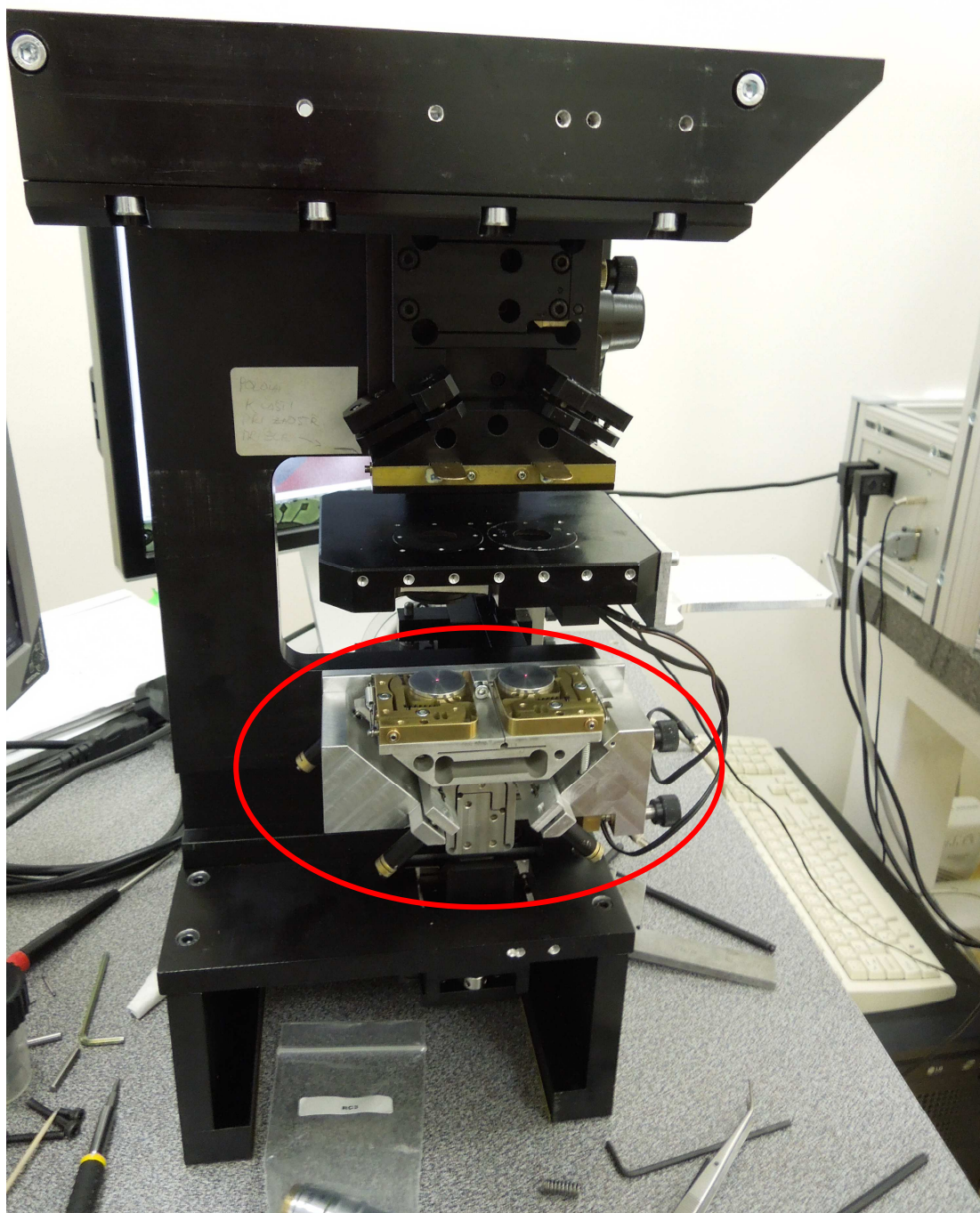
Je navržena úprava koherencí řízeného holografického mikroskopu v části mezi objektivy a výstupní čočkou. Podle požadavků je udělán model a zhotovena veškerá výkresová dokumentace. Na obr. 25 je vidět celá původní sestava, i s novou částí. Zde je vidět základní deska (ZD), na které jsou všechny nové komponenty upevněny. Samotná deska je přišroubována k mikroskopu. Dále vidíme srdce (SO), na kterém jsou umístěny paralelogramy pro posuv objektivů (PO) s mikrometrickými šrouby pro jemný posuv, držáky na naklápění zrcadel (DNZ), na kterých je umístěno naklápění vnějších zrcadel (NZE) s prodlouženými rameny. Ve spodní části desky je přichycený paralelogram pro změnu OPD (POPD). Vnější i vnitřní zrcátka nejsou vidět. Celá nová sestava i s kusovníkem je k nalezení v příloze.

Na obr. 26 je vidět nově vyrobená část, která je umístěna přímo na mikroskopu.

Všechny požadavky, které jsou určeny na začátku kapitoly 6, jsou v nové konstrukci splněny a jsou vytvořeny výrobní výkresy s předepsanými tolerancemi. Shrnutí a ověření funkčnosti, bude popsáno v závěru.



Obr. 25 PO - posuv objektivů, SO - srdce objektivů, DNZ - držáky na naklápění zrcátek, NZE - naklápění vnějších zrcátek, POPD - změna OPD, ZD - základní deska.



Obr. 26 Koherencí řízený holografický mikroskop při justáži nových komponentů. Nová část je zvýrazněna.

9. Závěr

V rámci své diplomové práce jsem se zabýval konstrukční úpravou koherencí řízeného holografického mikroskopu.

V práci je uvedeno základní dělení mikroskopů a rozdíly mezi těmito druhy. Dále je stručně popsán princip koherencí řízeného holografického mikroskopu, uložení všech optických prvků a nedostatky některých z nich, kterými se zabýváme. Je navrženo několik řešení, z kterých je vybráno nejideálnější, u kterého je zhotovena výkresová dokumentace jednotlivých prvků a výsledné sestavy. Veškeré výkresy jsou umístěny v příloze této diplomové práce.

Jednotlivé prvky nové části mikroskopu jsou v práci podrobně popsány a je uvedeno, proč byl zvolen tento způsob řešení. Výsledná sestava je zhotovena a je provedena její montáž a justáž.

Při kompletaci zařízení a následné justáži se vyskytly drobné problémy, které ovšem nebyly kritické, a daly se vyřešit drobnou úpravou některých prvků. Po sestavení a justáži nových prvků můžeme říci, že nově navržená část splňuje všechny požadavky, které jsou určeny v kapitole 6. To znamená, umožňuje příčný posuvu objektivů, čímž je zajištěna souosost objektivů a kondenzorů. Dále je zvětšena citlivost naklápění vnějších zrcátek, kdy je délka ramen zvětšena na dvojnásobek z 21 mm na 42 mm. Podmínka pro změnu OPD v části za objektivy byla také splněna, a to párovým posuvem vnitřních zrcátek. Podrobný popis je uveden v kapitole 7.3.

Hlavním přínosem mé diplomové práce je návrh a ověření funkčnosti nové části mikroskopu, která má zjednodušit obsluhu a seřizování tohoto mikroskopu.

Seznam použitých zdrojů

- [1] HERT, R., *Optics*, 4th ed. Adelphi university 2002, ISBN 0-321-18878-8.
- [2] KOLMAN, P. *Koherencí řízený holografický mikroskop*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 72 s. Vedoucí disertační práce doc. RNDr. Radim Chmelík, Ph.D.
- [3] KOLMAN, P., CHMELÍK, R., “Coherence-controlled holographic microscope,” *Optics express* 22003, Vol. 18, No. 21.
- [4] JANEČKOVÁ, H., KOLMAN, P., VESELÝ, P., CHMELÍK, R., *Digital holographic microscope with low spatial and temporal coherence of illumination*, Research programmes of the Ministry of Education of the Czech Republic (Projects No. MSM0021630508, and LC04060), (2008).
- [5] CHMELA, P., *Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, 1965, vol. 10, no 2, s. 65 - 73.
- [6] STRAKA, B. *Komponenty pro laserovou mikromanipulaci v koherencí řízeném digitálním holografickém mikroskopu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 57 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zbyněk Dostál.
- [7] DREXLER, W., FUJIMOTO, J., *Optical coherence tomography*, Springer Berlin Heidelberg, 2008, ISBN 978-3-540-77549-2.
- [8] JEBÁČKOVÁ, A.: *Koherencí řízený holografický mikroskop ve výzkumu životního cyklu buňky*, Brno, 2012. 59 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, vedoucí diplomové práce Ing. Hana Uhlířová, Ph.D.
- [9] CHMELÍK, R. & HARNA, Z., *Parallel-mode confocal microscope*. *Optical Engineering*, vol. 38, pp. 1635-1639, (1999).
- [10] CHYTKOVÁ, I., *Holografický konfokální mikroskop zobrazující prošlým světlem - konstrukce a experiment*. Diplomová práce, VUT v Brně, (1999)
- [11] PROKOPOVÁ, M., *Holografický konfokální mikroskop zobrazující prošlým světlem – teorie a konstrukce*. Diplomová práce, VUT v Brně, (1999).
- [12] BARTOŠ, P. *Elektroerozivní drátové řezání*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 67 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Osička, Ph.D.
- [13] LEINVEBER, J., VÁVRA, P., *Strojnické tabulky*. Albra - pedagogické nakladatelství, 2003, ISBN 80-86490-74-2.

Seznam použitých zkratk a symbolů

Symbol	Význam	Jednotky
OPD	změna optických drah	
CCHM	koherencí řízený holografický mikroskop	
OCM	optická koherenční mikroskopie	
OCT	optická koherenční tomografie	
λ	vlnová délka	nm
λ_0	střední vlnová délka	nm
φ	difrakční úhel	°
n	difrakční řád	
f_G	prostorová frekvence difrakční mřížky	mm ⁻¹
f_{OP}	nosná prostorová frekvence hologramu	mm ⁻¹
S	zdroj světla	
M	zrcadlo	
D	detektor	
G	difrakční mřížka	
OP	výstupní rovina	
O	mikroskopový objektiv	
C	mikroskopový objektiv sloužící jako kondenzor	
SO	srdce objektivů	
Z	zobáček	
DNZ	držák na naklápění zrcátek	
NZE	naklápění vnějších zrcátek	
NZI	naklápění vnitřních zrcátek	
T	trn	
SP	šrouby na pružiny	
MS	mikrometrický šroub	

Seznam příloh

Příloha 1: Výkresová dokumentace

Příloha 2: CD - elektronická verze diplomové práce, výkresová dokumentace