

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

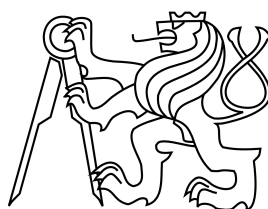
---

Modernizace mikrotesteru pro jedno a  
dvoufotonovou mikroskopii

---

*Autor:*  
Marek IŠKA

*Vedoucí:*  
Ing. František LOPOT, Ph.D.



7. června 2016  
Praha

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

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

V Praze dne .....

.....

podpis

# Poděkování

Chtěl bych poděkovat Ing. Františku Lopotovi, Ph.D. a Mgr. Danielu Hadrabovi (odd. Biomatematicky, Fyziologický ústav AV ČR) za cenné rady a podnětné připomínky při tvorbě této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval Grantové agentuře UK za možnost realizace projektu z finančních prostředků GAUK 956213.

## **Anotace**

Bakalářská práce je zaměřena na návrh tenzometrického čidla pro zařízení, které bude použito v laboratoři pro biomechaniku extrémních zátěží na Fakultě tělesné výchovy a sportu Univerzity Karlovy v Praze. Zařízení primárně slouží pro přímé sledování změn ve struktuře tkání, dá se však použít i pro jiné materiály. Je popsán návrh čidla včetně výběru vhodného tenzometru a materiálu. Dalším úkolem je návrh úpravy stávajícího lineárního vedení.

## **Klíčová slova**

náhradní materiály, tenzometr, tenzometrické čidlo, lineární vedení

## **Abstract**

The subject of this bachelor thesis is a design of a strain gauge sensor for a device, which is used for in-time observation of changes in the structure of tissue and also could be used for other materials. The microtester will be used in the Laboratory of Biomechanics of Extreme Loads of Faculty of physical education and sport of Charles University. The thesis describes design of the sensor completely, including choice of a suitable strain gauge and used material. The task of picking the most suitable solution to provide smooth linear motion will be carried out.

## **Key words**

substitute materials, strain gauge, strain gauge sensor, linear motion



# Obsah

<b>1 Stávající zařízení a jeho použití</b>	<b>6</b>
1.1 Konstrukce . . . . .	6
1.2 Problémy . . . . .	6
<b>2 Mikroskopie</b>	<b>7</b>
<b>3 Tenzometrie</b>	<b>8</b>
3.1 Úvod do tenzometrie . . . . .	8
3.2 Kovové tenzometry . . . . .	10
3.2.1 Drátkové . . . . .	10
3.2.2 Foliové . . . . .	11
3.3 Polovodičové . . . . .	11
3.4 Srovnání odporových tenzometrů . . . . .	11
3.5 Tenzometrická měření . . . . .	13
3.5.1 Převod signálu . . . . .	13
3.5.2 Elektronické vyhodnocovací obvody . . . . .	14
3.5.3 Wheatstonův můstek . . . . .	14
3.5.4 Vyvážené můstky . . . . .	15
3.5.5 Nevyvážené můstky . . . . .	15
3.5.6 Citlivost . . . . .	16
3.5.7 Kompenzace teploty . . . . .	16
3.5.8 Umístění z hlediska namáhání . . . . .	18
3.6 Materiály pro montáž . . . . .	20
<b>4 Specifikace požadovaných úprav</b>	<b>21</b>
4.1 Vedení . . . . .	21
4.2 Úprava nosiče . . . . .	23
4.3 Návrh čidel . . . . .	23
4.3.1 Výběr tenzometru . . . . .	23
4.3.2 Materiál . . . . .	24
4.3.3 Umístění a zapojení . . . . .	25
4.3.4 Dimenzování . . . . .	25
<b>5 Přílohy</b>	<b>36</b>
<b>6 Seznam použité literatury</b>	<b>37</b>

# Úvod

S nárůstem technologických možností zaznamenávají v posledních letech značný rozvoj obory, které se zabývají přípravou materiálů k rekonstrukcím částí lidského těla. Úloha techniky je v tomto oboru neoddiskutovatelná, jak v oblasti prostředků základního výzkumu, tak především v oblasti výzkumu aplikovaného. Jedním z hlavních předmětů bádání jsou náhradní materiály určené buď k pěstování náhradních nativních tkání nebo přímo k voperování do poškozené oblasti těla pacientů. V obou zmíněných případech hrají zásadní roli mechanické vlastnosti těchto materiálů a jejich stabilita v agresivním prostředí lidského těla. Vedle požadavku na vlastnosti těchto materiálů definované účelem jejich použití stojí požadavek producentů těchto materiálů na prostředky pro sledování kvality a stability výroby. Z hlediska uplatnitelnosti náhradních materiálů hrají rozhodující role jejich biokompatibilita k danému typu buněk v daném prostředí a charakter vnitřní struktury a jejich změn při vnějším mechanickém zatěžování. Mechanické zatěžování je zásadní pro správné formování tkáňových a orgánových struktur a spolu s výše uvedenými požadavky tak vzniká intenzivní poptávka po odpovídající technologii.

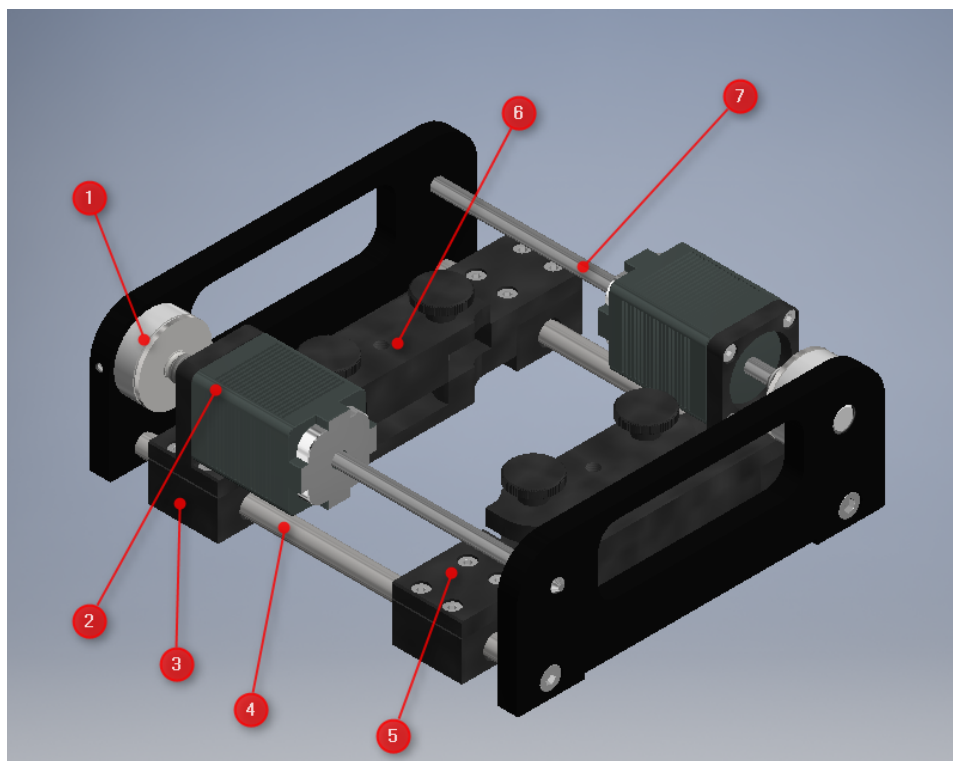
## Cíle

Cílem práce je úprava zařízení, které využívá Laboratoř pro biomechaniku extrémních zátěží Katedry anatomie a biomechaniky Fakulty tělesné výchovy a sportu Univerzity Karlovy v Praze ve spolupráci s Mikrobiologickým ústavem Akademie věd České Republiky, pro účely monitorování strukturálních změn tkáňových a jiných vzorků pod mikroskopy. Úprava bude spočívat v náhradě stávajících kluzných vedení čelistí vhodnějším a preciznějším provedením a v návrhu tenzometrických čidel, které nebudou narušovat konstrukci zařízení.

# 1 Stávající zařízení a jeho použití

## 1.1 Konstrukce

Současná konstrukce mikrotesteru (obr. 1) je tvořena dvěma čidly *Omega LC201-25*, která mají měřicí rozsah síly 0 – 100 N. Pohyb je zajištěn dvěma krokovými servomotory *Servodrive Nema 8 N*, každý z nich vyvine tahovou sílu až 80 N v závislosti na rychlosti posuvu. Původní vedení bylo tvořeno ocelovými tyčemi o průměru 5 mm, po kterých se smýkaly nosiče čelistí, mezi které se upíná zkoumaný vzorek.



Obrázek 1: Současná konstrukce: 1-silové čidlo, 2-motor, 3-nosič čelistí, 4-vodící tyč, 5-čelist, 6-upnutí vzorku, 7-závitová pohybová tyč

## 1.2 Problémy

Mikrotester byl již několikrát použit pro in-time sledování mikroskopických změn tkáňových struktur. Při těchto experimentech byly zjištěny některé nedostatky stávající konstrukce zařízení. Největší problém byl při vyhodnocování záznamu napětí na vzorku. Při použití současných čidel byla při několika měřeních zjištěna velmi špatná opakovatelnost výsledků. Další nedostatek byl pozorovatelný přímo při průběhu měření, kdy bylo patrné, že posouvání čelistí po vodících tyčích není zcela plynulé.

Princip měření silových čidel Omega nedovoluje kompenzovat ohybový (klopivý moment) vznikající nesymetrickým tahem, protože čelist není tažena uprostřed, ale za okraj. Tento nedostatek není možné vyřešit přesunutím pohonů do osy namáhání vzorku z důvodu nedostatku prostoru v oblasti pracovního stage mikroskopu. Problém je navíc umocněn kluzným pohybem jezdců po tyčích, který není plynulý a dochází ke vzpříčení. Pro větší plynulost pohybu musela být u vodítek čelistí vymezena větší

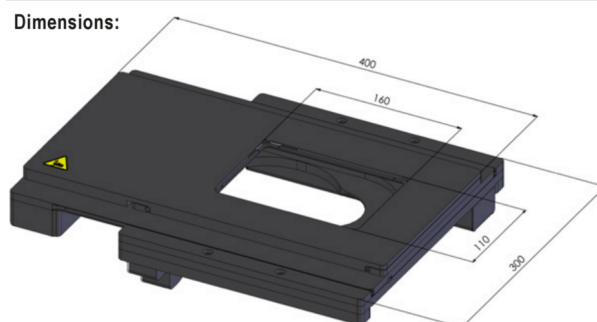
vůle a tím došlo ke snížení tuhosti konstrukce. Zmíněným nedostatkům lze předejít výběrem vhodnějšího vedení a návrhem preciznějších silových čidel.

## 2 Mikroskopie

Dosud se zařízení používalo jako periferie pro konfokální mikroskop *Leica SP2* a *Zeiss LSM510* s multifotonovým zdrojem pro SHG mikroskopii. Nyní se počítá s využitím pro multifotonový mikroskop *Leica SP8* (obr. 2). Předností tohoto mikroskopu je využití nejmodernějších infračervených laserů a super citlivých detektorů, které jsou schopny zaznamenávat i ty nejslabší signály z hlubokých tkáňových řezů. Pro řešení konstrukce mikrotesteru jsou nejdůležitější rozměry pracovního prostoru mikroskopu tzv. stage (obr. 3), který limituje maximální velikost zařízení na  $110 \times 160 \text{ mm}$ . Mimo tento vymezený prostor již nesmí žádná součást trhačky zasáhnout, pouze vodiče od senzorů a motorů. Mikrotester je ve stole upevněn pomocí pružin, které zamezí jeho pohybu.



Obrázek 2: Mikroskop *Leica TCS SP8* Zdroj:[1]



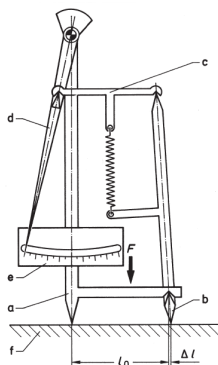
Obrázek 3: Stage mikroskopu Zdroj:[2]

## 3 Tenzometrie

### 3.1 Úvod do tenzometrie

Obvykle se při návrhu částí strojů, staveb, automobilů, letadel atd. uplatňují návrhové výpočty pro různé materiály. Podmínkou však je znalost namáhání dané součásti. Problém nastává, když je zatížení neznámé a vycházíme jen z hrubých odhadů namáhání. V tomto případě je výhodné využít tenzometrické měření a neznámé účinky upřesnit. Díky tomu, že dokážeme tyto vlivy určit, můžeme dosáhnout významné úspory materiálu a zabránit zbytečnému předimenzování součásti, při zachování dané bezpečnosti.

Princip této experimentální analýzy namáhání je založen na objevu z roku 1678, který učinil anglický vědec *Robert Hook* (1635-1703). Objevil vztah mezi namáháním materiálu a jeho výslednou deformací, kterou lze měřit na povrchu materiálu. Zpočátku se při měření využívalo pákového efektu 1 : 1000. Příkladem je přístroj na (obr. 4).



Obrázek 4: *Huggenbergerův tenzometr: a-tělo zařízení, b-pohyblivá páka, c-spojka, d-ukazatel, e-stupnice, f-vzorek,  $l_0$ -počáteční délka,  $\Delta l$ -rozsah měření* Zdroj: [3]

Tyto přístroje byly dlouhou dobu jedinou metodou, jak experimentálně měřit napětí. Navzdory dokonalé konstrukci, měly tyto zařízení také spoustu nevýhod, které výrazně snižovaly možnost jejich použití:

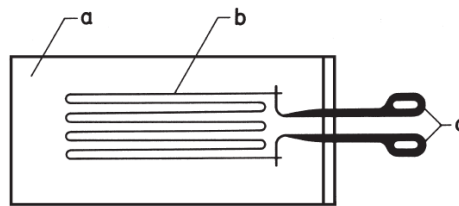
- měřit lze pouze statické procesy
- zařízení musí být velice pevně uchyceno na vzorku
- není možné měřit menší vzorky
- nelze automaticky zaznamenávat výsledky měření

Všechny tyto nedostatky měly být odstraněny použitím elektrických měřících metod.

Teprve ve 30. letech 19. století se vědci začali zajímat o jev, který poprvé zmínil v roce 1843 *Charles Wheatstone*. Šlo o změnu odporu vodiče v závislosti na jeho mechanickém namáhání. Tento jev později v roce 1856 popsal *William Thompson* (1824-1905), od roku 1892 *Lord Kelvin*. Trvalo však 80 let než byl tento vztah použit pro měření v praxi.

Při silovém namáhání vodiče je změna jeho odporu velmi malá. Thompson používal ve své době nejpřesnější galvanometry, které však byly pro jakékoli použití v praxi naprosto nevhodné. Proto hlavní rozvoj čekal až na příchod elektrických zesilovačů.

V roce 1938 ve Spojených Státech pracovali na vývoji tenzometru nezávisle na sobě *Edward E. Simmons* a *Arthur Claude Ruge*. Zatímco Simmons utkal materiál složený z hedvábných vláken a odporových drátků, který potom připevnil na měřenou součást. Ruge snímač vyrobil stočením tenkého vodiče do meandrovitého tvaru, jaký se používá i u dnešních tenzometrů. Na tenkém papíru ho potom nalepil na zkoumaný vzorek. A už první naměřené hodnoty, při porovnání s ostatními metodami, vykazovaly mnohem větší přesnost. Z hlediska praktičnosti a jednoduchosti vyhodnocení byl jednoznačně lepší tenzometr s meandrovitým provedením. Ruge byl schopen najít lineární závislost mezi přetvořením a naměřenými hodnotami změny odporu. Zvláště díky leteckému průmyslu se začal tento typ tenzometrů vyrábět a používat v obrovském měřítku.



Obrázek 5: *Klasický tenzometr: a- základní materiál, b- měřicí mřížka, c- kontakty*  
Zdroj:[3]

Tato podoba tenzometru (obr. 5) se v podstatě neliší od současných provedení. Základní rozdělení snímačů je na:

- mechanické
- optické
- elektrické

Z těchto typů se dnes nejčastěji používají elektrické, které měří změny odporu, kapacity nebo indukčnosti závislé na deformaci (přetvoření). Nejpoužívanější tenzometry se deformují spolu s materiálem a tím vzniká změna odporu, kterou jsme schopni změřit, zaznamenat a vyhodnotit.

Často se uvádí hodnota takzvané poměrné deformace neboli přetvoření vztážené na délku, dle vztahu:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$

Pro běžné konstrukční materiály představuje velmi malou hodnotu, jelikož za spodní mez na úrovni šumu se považuje  $1 \cdot 10^{-6}[1]$ , byla zavedena jednotka

$$\begin{aligned} 1 \text{ mikrostrain} &\equiv 1 \text{ mikroepsilon} \\ 1 [\mu\varepsilon] &\equiv 1 \cdot 10^{-6}[1] \end{aligned}$$

## 3.2 Kovové tenzometry

Kovové tenzometry patří mezi nejpoužívanější elektrické tenzometry, pracují na principu závislosti přetvoření-odpor, kterou objevil Wheatstone a Thompson. Kovové tenzometry můžeme dále dělit:

- drátkové
- foliové

### 3.2.1 Drátkové

Provedení tohoto typu je realizováno meandrovým vinutím z tenkého drátku. Vedení je umístěno na vhodném nosiči, který se přilepí na měřený vzorek.

Lze odvodit vztah mezi přetvořením  $\varepsilon$  a relativní změnou  $\Delta R/R$  odporu. Jestliže má nenamáhaný vodič příčný průřez  $S[\text{mm}^2]$  a odpor  $R[\Omega]$ , pak při protažení o hodnotu  $\Delta L$  se jeho průřez zmenší o  $\Delta S$  a jeho odpor vzroste o hodnotu  $\Delta R$ . Měrný odpor vodiče označíme  $\rho[\Omega \cdot \text{m}]$ , pak lze psát:

Před přetvořením:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S}$$

Po přetvoření:

$$R + \Delta R = \rho \cdot \frac{L + \Delta L}{S - \Delta S} \quad (2)$$

Objem vodiče před a po přetvoření se nezmění, bude tedy platit:

$$SL = (S - \Delta S) \cdot (L + \Delta L)$$

$$\text{tedy} \quad S \cdot \Delta L = L \cdot \Delta S \quad \text{pro} \quad \Delta L \cdot \Delta S \approx 0$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta S}{S} \quad (3)$$

Jestliže se vydělí rovnice v zápisu (2), konstanta  $\rho$  materiálu vodiče se vykrátí a po dosazení a úpravě dostaneme:

$$1 + \frac{\Delta R}{R} = \frac{1 + \varepsilon}{1 - \varepsilon}$$

$$\text{čili hledané} \quad \frac{\Delta R}{R} = \frac{2\varepsilon}{1 - \varepsilon} \approx 2 \cdot \varepsilon \quad (4)$$

když bychom zanedbali malou hodnotu  $\varepsilon$  proti jedničce. Konstanta  $K$  rovná poměru

$$K = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} \quad [1] \quad (5)$$

se pak nazývá **konstantou tenzometru** (též součinitelem deformační citlivosti, anglicky gauge factor). Jak plyne z odvození, je pro drátkový tenzometr podle (4) rovna (velmi blízce) hodnotě 2, nezávisle na materiálu vodiče. Ale samozřejmě musíme vybírat materiál s co nejmenší teplotní závislostí(konstantan).[6]

### 3.2.2 Foliové

Foliové tenzometry se vyrábí odleptáním tenké folie (tloušťky 10 [ $\mu\text{m}$ ]) do obvyklého meandrovitého tvaru, stejně jako u drátkových. Použití těchto tenzometrů je především při měření velkých přetvoření.

Při měření takto velkých přetvoření (ve směru  $x$ ) se však už nepříznivě uplatňuje i vliv jejich citlivosti v příčném směru (směr  $y$ ). Zavádí se proto pojem **příčné citlivosti**, definovaný poměrem:

$$\psi = \frac{K_y}{K_x} \quad [1] \quad (6)$$

kde  $K_x$  resp.  $K_y$  je konstanta tenzometru v podélném resp. příčném směru. [6]

### 3.3 Polovodičové

U tohoto typu tenzometrů se s mechanickou deformací výrazně mění odpor. Působením namáhání v určité krystalografické ose monokrystalu polovodiče nebo difúzní vrstvě polovodiče dochází ke změně elektrické vodivosti. Především záleží na typu polovodiče a obsahu různých příměsí.

Relativní změnu  $\frac{\Delta R}{R}$  odporu na přetvoření  $\varepsilon$  lze popsat i složitějším vztahem ve tvaru

$$\frac{\Delta R}{R} = C_1 \cdot \varepsilon + C_2 \cdot \varepsilon^2 + C_3 \cdot \varepsilon^3 + \dots \quad (7)$$

Vyplývá z toho přímo, že konstantu  $K$  je možno definovat také jako

$$K = \frac{d(\Delta R/R)}{d\varepsilon} = C_1 + C_2 \cdot \varepsilon + C_3 \cdot \varepsilon^2 + \dots \doteq C_1 + 2C_2\varepsilon \quad (8)$$

Polovodičové tenzometry mají obecně až o dva řády vyšší citlivost ( $K \approx 100$ ), ale vztah mezi přetvořením a relativní změnou odporu je nelineární. Konstanty  $C$  v rovnicích závisí na typu vodivosti polovodiče. Kvůli veliké citlivosti těchto tenzometrů je měření velice ovlivněno teplotou, a proto se musí dbát zvláštní pozornosti při volbě zapojení, o kterém se samozřejmě dále zmíním. V současné době jsou polovodičové tenzometry vyráběny z křemíkových monokrystalických tyčinek s vhodnou krystalografickou orientací jejich podélné osy. Na této tyčince jsou připojeny zlaté vývody o průměru 0.07 mm. Pásek křemíku je samonosný, a proto nevyžaduje podložku jako kovové tenzometry. Dostatečný izolační odpor zajišťujeme vytvořením vrstvy lepidla, ještě před nalepením tenzometru. Polovodiče nejčastěji vykazují vodivost typu P, když jsou dotovány borem nebo aluminím. Jejich součinitel deformační citlivosti  $C_1 = 130$ . Další možnost je dotace fosforem či antimonem, čímž dosáhneme vodivosti typu N a součinitele deformační citlivosti  $C_1 = -110$ . Ty jsou však pro měřicí účely nevhodné.

### 3.4 Srovnání odporových tenzometrů

Na závěr bych chtěl typy tenzometrů porovnat z hlediska jejich vlastností. Zaměřím se na snímače kovové a polovodičové, protože jsou pro výrobu snímačů nejhodnější a nejvíce používané.

Při získávání informací o dostupných typech snímačů jsem samozřejmě čerpal hlavně ze stránek výrobců senzorů. Jako předního výrobce kovových tenzometrů bych představil



německou společnost **HBM (Höttinger Baldwin Messtechnik)**, která byla založena v roce 1950. Výrobou tenzometrů se zabývá od roku 1955. Dnes patří k největším výrobcům snímačů a působí po celém světě. Na stránkách této firmy nalezneme vše, od samotných tenzometrů až po celé měřicí řetězce s vyhodnocováním signálu.[4] Polovodičové tenzometry nabízí firma **VTS Zlín (Výroba tenzometrů a snímačů Zlín)**. Tato česká firma vznikla v roce 1990, aby zajistila v nových hospodářských podmínka pružný rozvoj polovodičové tenzometrie a její aplikaci. Sdružila jak odborníky, kteří vyvinuli výrobní technologii ve Výzkumném a zkušebním leteckém ústavu v Praze, tak odborníky řídící výrobu tenzometrů od jejího zahájení v OPS Zlín. Tato výroba začala v roce 1974 a do roku 1989 musela být dvacetinásobně rozšířena pro potřebu exportu a různá průmyslová odvětví. Zejména proto, že USA zakázaly vývoz polovodičových tenzometrů do několika zemí. [5]

Při výběru snímače se řídíme několika kritérii. Základní shrnutí vlastností viz.(tab. 1).

Tabulka 1: Porovnání vlastností kovových a polovodičových tenzometrů

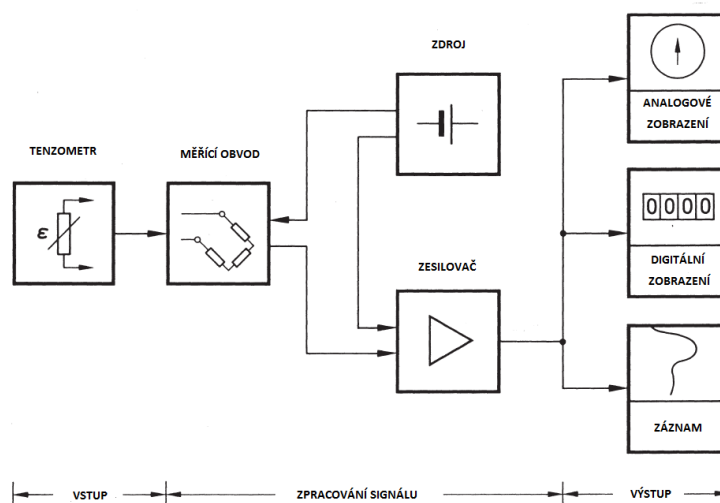
VLASTNOST	KOVOVÉ	POLOVODIČOVÉ
K-faktor	malý ( $K \doteq 2$ )	velký ( $K > 100$ )
Linearita	velmi dobrá	špatná
Teplotní stabilita	velmi dobrá	špatná
Frekvenční rozsah měření	malý	od statických až po stovky Hz
Max. kladná deformace	2%	0.3%

Oba dva typy tenzometrů lze využít od laboratorních měření až po řízení strojů. Polovodičové i kovové snímače se vyrábí v několika provedeních a velikostech. Často bývá největším omezením velikost měřeného vzorku. Zde s výhodou používáme polovodičové tenzometry, které se vyrábějí od aktivní délky jednoho milimetru a šířky 0.2 mm s tloušťkou 0.01 mm. Samotné odpory snímačů jsou v rozsahu 50 – 1000  $\Omega$  a to u obou provedení. Musíme mít také představu o tom, jak velká deformace bude vznikat. Pro velké změny jsou nejčastěji využívány foliové snímače.

Dalším parametrem může být směr namáhání, pokud je neznámý nebo je součást vystavena víceosé napjatosti, potom často používáme tzv. tenzometrické růžice (obr. 12) (patří mezi kovové tenzometry), které jsou schopné měřit napjatost v několika směrech. Z naměřených hodnot potom můžeme pomocí Mohrovy teorie víceosé napjatosti určit hlavní napětí v dané součásti.

Z ekonomického hlediska je dobré uvažovat, jaké máme požadavky na přesnost a zda budeme měřit statický či dynamický děj a podle toho vybrat správný typ. Na závěr je však nutné dodat, že v současnosti lze i u drátkových tenzometrů dosáhnout rozměrů, které se nebudou o mnoho lišit od miniaturních polovodičových snímačů. A zároveň už nemusíme uvažovat násobně větší náklady při použití polovodičů, protože rozdíl v ceně už není tak velký. Proto se výběr vhodného tenzometru dá omezit především podmínkami použití a požadovanými vlastnostmi naměřených dat. S tím nám pomohou katalogy a příručky výrobců.

## 3.5 Tenzometrická měření



Obrázek 6: Základní měřicí schéma: Zdroj: [3]

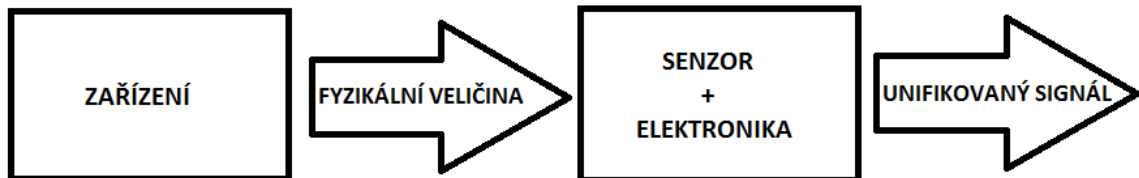
Měřené přetvoření je většinou velmi malé, a proto i změny odporu mohou být pod rozlišovací schopnost obyčejných ohmmetrů. Z tohoto důvodu ve většině případů používáme pro měření speciální schéma zapojení tenzometru (obr. 6). Jako první je tenzometr, který převádí mechanické přetvoření na změnu elektrického odporu. Následuje měřicí obvod, obvykle Wheatstonův můstek, do kterého je tenzometr zapojený. Obě tyto části jsou však pasivní a musíme je zásobovat z vnějšího zdroje. Další součástí tohoto zapojení je zesilovač, který vstupní signál zesiluje na hodnotu vhodnou pro zobrazovací zařízení. Výstupním článkem je zobrazování naměřených hodnot v podobě, kterou požadujeme. Nejjednodušší je analogové zobrazení výstupu voltmetru, ale pokud měříme nějaký dynamický proces lze zapojit i záznamové zařízení pro vyhodnocení v závislosti na čase. Toto schéma je složeno jen z nejzákladnějších součástí. V praxi můžeme zařadit mnoho dalších zařízení, které umožní získávat lepší hodnoty a rozšíří možnosti použití pro více aplikací. Dnes se používají inteligentní senzory, které jsou schopné zpracovávat signály z různě umístěných čidel a různých veličin. Vstupní signál zesílí, převedou na digitální a jsou schopny naměřená data zaznamenat, či odeslat sběrnicí do mikropočítače pro vyhodnocení. Obsluha potom získá veličinu, kterou potřebuje. Například přímo napětí nebo sílu, zpracovanou v závislosti na čase, otáčkách atd..

### 3.5.1 Převod signálu

V předchozích kapitolách jsme rozdělili elektrické tenzometry dle veličiny, která se u nich v závislosti na deformaci mění, na: odporové, kapacitní, indukční. Nejčastěji zaznamenáváme při běžném rozsahu měření ( $\varepsilon = 10^{-5}$  až  $10^{-3}$ ) vyvolanou změnu odporu v jednotkách až stovkách  $m\Omega$ . Měření těchto velmi malých změn vyžaduje použití přesných a citlivých obvodů. Vstupním obvodem je nejčastěji Wheatstonův můstek. Můstkům a způsobům jejich zapojení je věnována následující kapitola. Další důležitou

součástí je kompenzovaný zesilovač, který zesílí výstupní napětí na měřitelnou úroveň. Nejčastěji se používá operačních zesilovačů.

### 3.5.2 Elektronické vyhodnocovací obvody



Obrázek 7: *Unifikovaný signál*

V praxi používané snímače, které jsou vybavené elektronickými obvody, poskytují dostatečně velký výstupní signál (obr. 7). Rozlišujeme signály napěťové a proudové. Napěťový unifikovaný signál (obvykle o velikosti 0 až 10V nebo -10 až +10V) má výhodu díky neomezené přenosové vzdálenosti, ale výrazně podléhá rušení (relé, motory, stykače). Proudový unifikovaný signál (často 0 až 20 mA nebo 4 až 20 mA) má omezenou možnost délky vedení, kvůli odporu vodičů vedení. Výhodou použití signálu 4 až 20 mA je snadné rozpoznání přerušení smyčky, protože potom neprotéká proud.

Při použití snímačů, které reagují na mechanickou veličinu změnou odporu, kapacity nebo indukčnosti, je ale změna těchto veličin často velmi obtížně měřitelná. Proto se musí pro zpracování signálu využít můstkových obvodů.

Tyto obvody můžeme dle napájení rozdělit na [7]:

1. **stejnoseměrné**, kdy napájecím zdrojem je zdroj stejnosměrného napětí nebo proudu
2. **střídavé**, kdy napájecím zdrojem je zdroj harmonického napětí nebo proudu
3. **impulsové**, kdy napájecím zdrojem je zdroj impulsů

Podle stavu při vyhodnocování změny parametru snímače [7]:

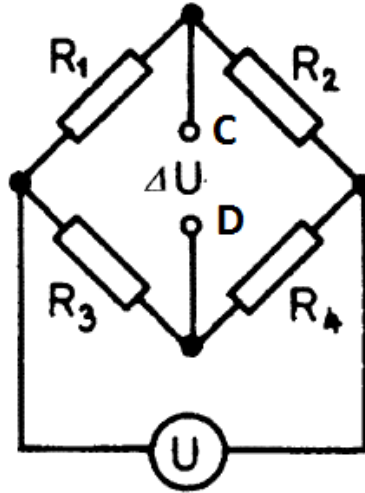
1. **vyvážené**, kdy rozvážení můstku je kompenzováno a vyhodnocujeme změnu kompenzačního prvku
2. **nevyvážené**, kdy vyhodnocujeme přímo velikost rozvážení můstku

### 3.5.3 Wheatstonův můstek

V roce 1843 byl představen Charlesem Wheatstonem obvod pro přesné měření elektrického odporu. Po svém vynálezi byl tento obvod nazván Wheatstonův můstek. Lze jej využít pro různé způsoby měření odporu:

- pro určení absolutní hodnoty odporu porovnáním se známým odporem
- pro určení relativních změn odporu

V tenzometrii je používána především druhá metoda. Změny odporu na tenzometru se často pohybují od  $10^{-4}$  do  $10^{-2} \Omega/\Omega$ , proto potřebujeme měřit s velkou přesností. Všechny tyto požadavky při tenzometrii splňuje nejlépe právě Wheatstonův můstek.



Obrázek 8: *Wheatstonův můstek* Zdroj: [7]

Čtyři větve obvodu (obr. 8) jsou tvořeny rezistory  $R_1$  až  $R_4$ . Výstupní napětí mezi body **C D** je úměrné změně některého z rezistorů ( $R_1$  až  $R_4$ ). Toto napětí způsobí proud  $I_V$ . Vzhledem k velikostem odporů v obvodu, můžeme zanedbat vnitřní odpor zdroje napětí  $U$ .

### 3.5.4 Vyvážené můstky

Nahrazením obvodu pomocí Theveninova teorému, můžeme pro zkratovaný obvod  $I_V = 0$  odvodit podmínku rovnováhy můstku [7]:

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3 \quad (9)$$

Můstek můžeme vyvážit ručně nebo automaticky, servomechanismem. Je možné je vyrovnat i elektronicky, změnou parametrů polovodičových prvků. Vyvážené můstky dosahují velmi malé chyby (menší než 0.5%)

### 3.5.5 Nevyvážené můstky

Jsou v praxi více rozšířené než vyvážené. Můstek se nesnažíme vyrovnat na nulovou výchylku, ale zaznamenáváme napětí nebo proud v diagonále **C D**. Často pro tyto obvody platí vztah:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0 \quad (10)$$

Můžeme předpokládat, že v tomto případě je snímačem odpor  $R_1$ , který mění svou hodnotu s deformací v určitém rozmezí  $R_0 \pm \Delta R$

Měření s použitím nevyváženého můstku je snadnější a rychlejší s možností přímého záznamu. Ale přesnost je menší (asi 1%).

### 3.5.6 Citlivost

Citlivost můstku lze ovlivnit použitím současně dvou resp. čtyř snímačů, citlivost se pak zvětší dvakrát resp. čtyřikrát. Podle počtu zapojených snímačů rozdělujeme zapojení na:

1. čtvrtmost - 1 tenzometr
2. půlmost - 2 tenzometry
3. plný most - 4 tenzometry

Vhodným zapojením tedy dosáhneme větší citlivosti, záleží také na smyslu namáhání snímače. Jednotlivé možnosti jsou popsány včetně obrázků v kapitole 3.5.7, z jednotlivých zapojení plyne i výhoda pro kompenzaci určitých vnějších vlivů.

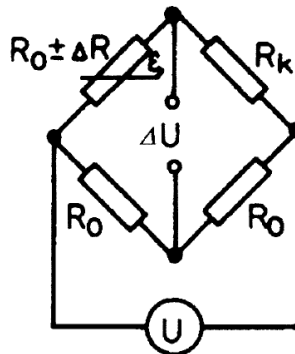
### 3.5.7 Kompenzace teploty

Vzhledem k vlastnostem tenzometrů, je každé měření velmi ovlivněno změnou teplot. Zvláště v některých aplikacích při použití citlivých polovodičových snímačů je nutno tento vliv brát v úvahu. Teplotu lze kompenzovat několika způsoby:

1. samokompenzačním tenzometrem
2. zpracováním tenzometrického drátku
3. vhodným zapojením tenzometrů do můstku

Samokompenzační tenzometr je na stejné podložce v sérii s měřícím vinutím a opačnou teplotní charakteristikou. Stejně jako pro speciálně technologicky zpracovaný drátek je funkční pouze pro rozsah teplot daný výrobcem.

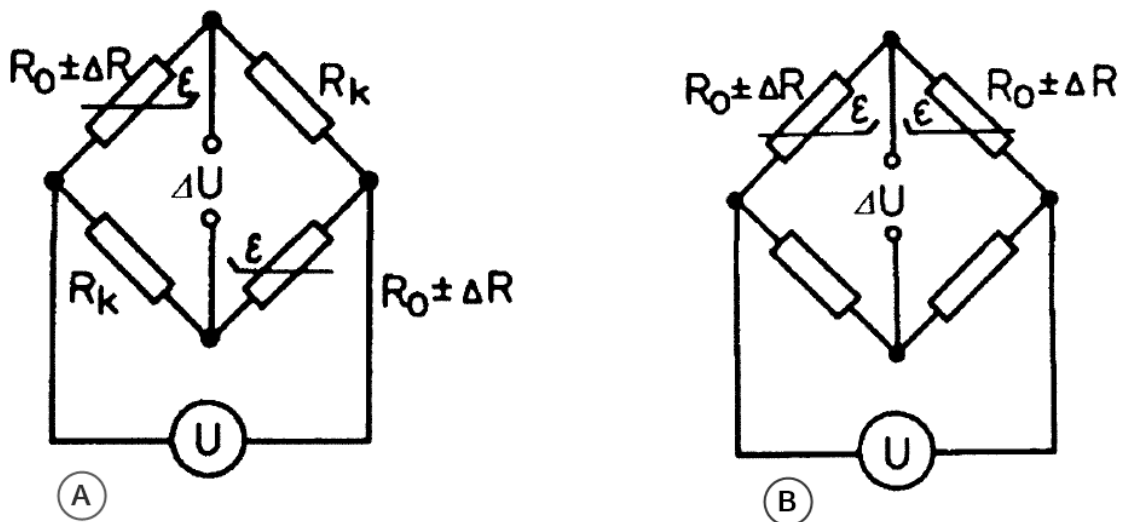
V praxi se teplota nejčastěji kompenzuje vhodným zapojením v můstku. Pro rovnováhu můstku musíme opět dodržet podmínku (9). Do Wheatstonova můstku zapojíme měřící tenzometr  $R_0$  místo odporu  $R_1$  (vznikne tzv. čtvrtmůstek) a nenamáhaný kompenzační tenzometr  $R_k$  stejných parametrů, umístěného v co největší blízkosti k měřícímu, místo odporu  $R_2$  nebo  $R_3$  (obr. 9)



Obrázek 9: Zapojení kompenzačního členu bez namáhání Zdroj: [7]

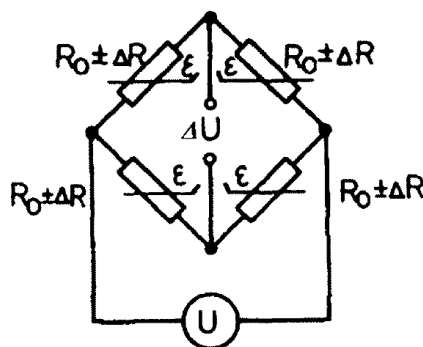
Jestliže podmínky měření umožní použít dva tenzometry můžeme je zapojit do obvodu jako tzv. půlmůstek a získat tím dvojnásobnou citlivost oproti nenamáhanému kompenzačnímu tenzometru. Musíme však rozlišovat dva případy:

- A. oba měřicí tenzometry jsou namáhány **souhlasně**, potom jsou zapojeny místo odporu  $R_1$  a  $R_4$ , tedy do opačných větví můstku (obr. 10.A)
- B. tenzometry jsou namáhány **nesouhlasně** (tah-tlak), tedy i jejich změny jsou opačné, proto musí být zapojeny do sousedních větví můstku viz. (obr. 10.B)



Obrázek 10: Zapojení namáhaného kompenzačního tenzometru: A) souhlasně, B) nesouhlasně Zdroj: [7]

Pokud je možné použít pro měření čtyři tenzometry, lze vytvořit plný můstek, který je čtyři-krát citlivější než čtvrtmůstek, zároveň se nám neprojeví vliv teploty na výstupním napětí. Musíme však zajistit, aby dva tenzometry byly namáhány na tah a dva na tlak. Zapojení je uvedeno viz. (obr. 11).



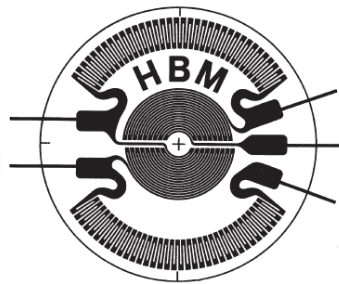
Obrázek 11: Plný můstek Zdroj: [7]

### 3.5.8 Umístění z hlediska namáhání

Již při výběru tenzometru musíme mít představu o namáhání, které bude na součást působit. Vycházíme z toho, zda známe směr hlavního napětí, mohou nastat tyto možnosti:

1. směr známe a namáhání je jednoosé
2. směr známe a namáhání je víceosé
3. směr neznáme

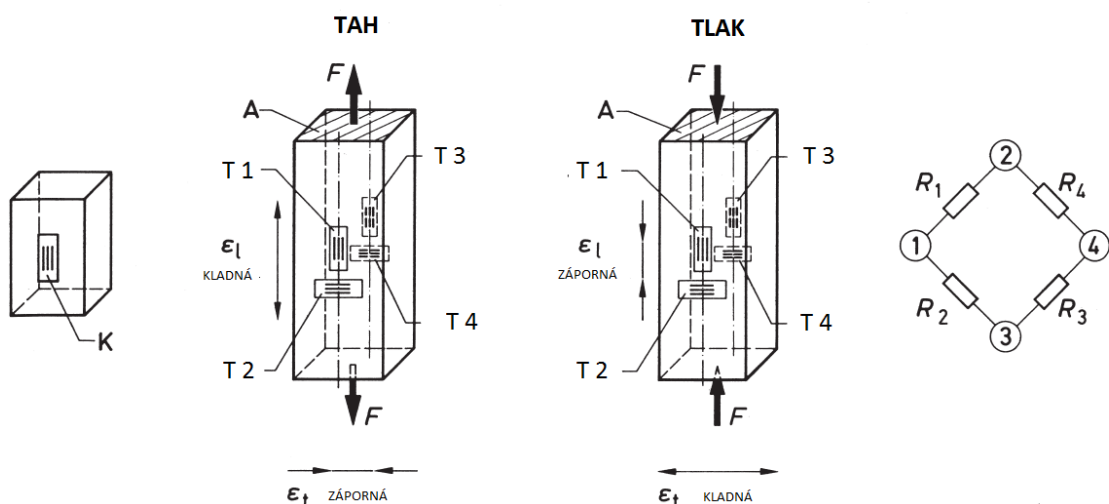
V prvním případě zvolíme jednoosý tenzometr (obr. 5), který umístíme ve směru deformace. V druhém případě se používají tzv. tenzometrické kříže, které opět umístíme ve směru deformací. Při poslední možnosti, kdy je směr neznámý je vhodné zvolit tzv. tenzometrické růžice obr.(12), které umístíme na měřený povrch. Potom z naměřených výsledků jsme schopni pomocí teorie napjatosti určit hlavní napětí a jeho směr. Při dalším experimentu už bychom měli být schopni umístit i jednoosý tenzometr.



Obrázek 12: *Tenzometrická růžice HBM* Zdroj: [3]

Základní případy zatížení jsou tah, tlak, ohyb a krut. V praxi však často není možné tyto jednotlivé zatížení od sebe izolovat, a proto si musíme uvědomit, že ne vždy měříme přímo veličinu, kterou chceme znát.

Při měření tahové/tlakové síly existuje několik kombinací zapojení tenzometrů, které však velmi výrazně ovlivní získané hodnoty. Budeme vycházet z umístění tenzometrů na (obr. 13) Deformaci měřícího členu však může způsobovat více složek, některé z nich mohou nepříznivě ovlivňovat měření. Například, při měření osové síly, může být ovlivněna ohybovým momentem. Nebo naopak při měření ohybového momentu, můžeme měřit i vliv osové síly. Proto je nutné tyto parazitní vlivy umět určit a zrušit je vhodným zapojením tenzometrů do můstku.



Obrázek 13: Vyrůšení parazitních vlivů:  $\varepsilon_l$ -poměrná deformace ve směru prodloužení,  $\varepsilon_t$ -kolmá poměrná deformace,  $K$ -kompenzační mechanicky nezátížený tenzometr  
Zdroj: [3]

V měřícím obvodu jsou tenzometry  $T_{1-4}$  znázorněny jako odpory  $R_{1-4}$ , tyto rozhodně nemusí být všechny využity pro měření viz.(tab. 2). Záleží také na typu tenzometru, zda je vybaven kompenzační smyčkou pro určitý rozsah teplot a nebo jen měří deformaci. V případě potřeby lze pro kompenzaci využít nenamáhaného tenzometru  $K$ , který by však měl být umístěn co nejblíže měřicímu snímači, který je namáhan.

Tabulka 2: Možnosti sestavení obvodů:  $T_{1-4}$ -měřící tenzometry,  $R_C$ -pevné odpory pro vytvoření můstku

Rameno můstku	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	Poznámka
Jednoduchý čtvrt můstek	T 1	$R_C$	$R_C$	$R_C$	1
Čtvrt můstek s komp. tenzometrem	T 1	$K$	$R_C$	$R_C$	2
Půl-most	T 1	T 2	$R_C$	$R_C$	3
Diagonální poloviční most	T 1	$R_C$	T 3	$R_C$	4
Diagonální poloviční most 2 komp.tenz.	T 1	$K$	T 3	$K$	5
Plný most	T 1	T 2	T 3	T 4	6

Poznámky k tabulce (2):

1. Parazitní vliv ohybového momentu se projeví ve výsledku měření, jestliže teplotní deformace není vyrušena kompenzačním tenzometrem, tak se ve výsledcích objeví také.
2. Vliv ohybu není kompenzován, teplotní kompenzace dosáhneme pokud se pohybujeme v rozmezí funkčnosti kompenzačního tenzometru. V případě, že jsme mimo tento interval, dostaneme stejné výsledky jako v případě 1.



3. Vliv ohybu se projeví ve výsledcích, avšak teplota je spolehlivě kompenzována.
4. Při křížovém zapojení do můstku zrcadlově umístěných tenzometrů je vliv ohybového momentu kompenzován, teplotní deformace je kompenzována pouze v případě použití kompenzovaných tenzometrů, jinak se ve výsledcích projeví.
5. Pokud splníme rozsah teplot, pro funkci kompenzačního tenzometru stejně jako v případě 3., dostáváme výsledky bez parazitních vlivů teploty a ohybového momentu. Jestliže se budeme pohybovat mimo dané rozmezí teplot, výsledky budou srovnatelné s případem 4.
6. Křížové zapojení zrcadlově umístěných tenzometrů do plného můstku zcela eliminuje vliv ohybového momentu a spolehlivě kompenzuje vliv teplotní deformace. Toto je ideální zapojení pro měření obyčejné síly (tah/tlak).

Samozřejmě v každé aplikaci se liší podmínky měření a často je značně omezený i prostor pro umístění snímačů, v takovém případě musíme volit optimální způsoby pro vyrušení co nejvíce parazitních vlivů, při dodržení omezení. Jedině tímto přístupem jsme schopni získat kvalitní výsledky, nezatížené zbytečnými chybami.

### 3.6 Materiály pro montáž

Montážním materiálem nazýváme všechny materiály, které potřebujeme, abychom mohli začít měření. Jsou to materiály, které umožní pevné spojení tenzometru s povrchem vzorku a jeho připojení, včetně materiálů, které chrání měřicí místo před vnějšími vlivy. Je nutno zmínit, že montáž tenzometru vyžaduje zvláštní pozornost, protože jediné bezchybně umístěný snímač je schopný poskytovat použitelné výsledky. Zvláště v některých aplikacích by obsluha měla mít na mysli, že nesprávné výsledky měření mohou ohrozit zdraví a život mnoha lidí.

Pro nalepení odporového tenzometru na měřený objekt mají podstatně výhodnější vlastnosti lepidla vytvrzující chemicky, než lepidla, vytvrzující fyzikálně, odpařením rozpouštědla. Od tenzometrických lepidel vyžadujeme zejména vysokou odolnost proti tečení v pevném stavu (creep). Potřebný souhrn vlastností vykazují lepidla na bázi [5]:

- epoxidu, vytvrzující při teplotách nad  $100^{\circ}\text{C}$
- kyanoakrylátu, vytvrzující za pokojové teploty, působením vzdušné vlhkosti
- polyamidu, vytvrzují za vyšších teplot, s kterými lze měřit od kryogenních teplot do  $400^{\circ}\text{C}$

Základním měřítkem kvality tenzometrického lepidla je prokluz, způsobený tečením za studena (creep). Vyjadřuje se procentickou změnou signálu tenzometru při konstantní poměrné deformaci, obvykle  $1 \cdot 10^{-3}$  a stálé teplotě, nejčastěji o 30 minutách, nebo grafem časové závislosti této změny.

$$d_t = \frac{R_{e,1} - R_{e,2}}{R_{e,1}} \cdot 100 \quad (11)$$

kde

$d_t$       *prokluz deformovaného tenzometru za čas  $t$  [%]*

$R_{e,1}$       odpor tenzometru v okamžiku zdeformování [ $\Omega$ ]  
 $R_{e,2}$       odpor tenzometru po uplynutí času  $t$  od zdeformování [ $\Omega$ ]

Volba lepidla se řídí požadovanou přesností a podmínkami měření. Snímače a statická tenzometrická měření vyžadují prokluz při pokojové teplotě v řádu setin %. Dynamická měření jsou na hodnoty prokluzu náročná méně. Z velkého počtu průmyslově využívaných epoxidů a kyanoakrylátů má jen málo typů přijatelný prokluz. Například široce používaná pryskyřice EPOXI 1200 má za podmínek, uvedených v předchozím odstavci prokluz kolem 7 %. [5]

Pro měření účinnosti přenosu deformace tenzometrických lepidel použijete velmi citlivé polovodičové tenzometry. Mezi účinností přenosu lepidla a hodnotami konstant tenzometru (viz kapitola 3.3)  $C_1$  a  $C_2$  je přímá úměra. Pro velmi přesná tenzometrická měření je nutné pro zvolené lepidlo zavést korekční faktory konstant  $C_1$  a  $C_2$ .

## 4 Specifikace požadovaných úprav

### 4.1 Vedení

Vzhledem k základnímu nedostatku stávající konstrukce je požadavek na vedení jasný, zajistit plynulý posuv čelistí. Protože síly a momenty, které nám na vozíky působí nejsou velké, není únosnost vedení hlavním požadavkem. Pro zajištění lineárního pohybu připadá v úvahu několik dostupných variant:

- kolejnicové vedení
- oběžné kuličkové vedení
- vedení s kuličkovým pouzdem

Kolejnicové vedení (obr. 14) nabízí vysokou únosnost, avšak s tím jsou spojeny také mnohem větší rozměry a tudíž by byl nevyhnutelný velký zásah do celé konstrukce mikrotesteru a vzhledem k rozměrovému omezení i zmenšení rozsahu pohybu čelistí.



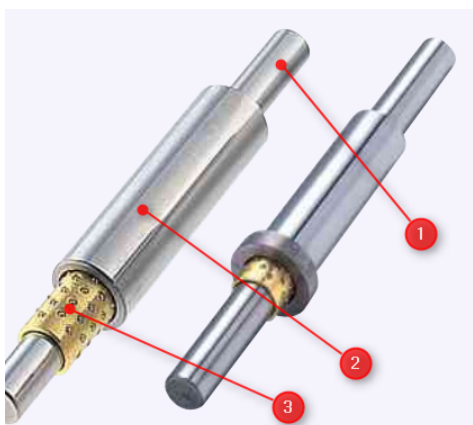
Obrázek 14: Lineární kolejnicové vedení Zdroj:[11]

Oběžné kuličkové vedení (obr. 15) pracuje na principu oběžných drah pro kuličky. Celý mechanismus je zapouzdřený a utěsněný. V požadovaných rozměrech pro vodící tyč o průměru 5 mm, však dosahuje pouzdro příliš velkých vnějších rozměrů a bylo by technologicky náročné tento typ umístit do nosiče čelistí.



Obrázek 15: *Oběžné kuličkové vedení* Zdroj:[12]

Poslední uvažovanou variantou je vedení s kuličkovým pouzdem (obr. 16), které je velice precizní. Funguje na principu kuličkového ložiska a díky tomu zajišťuje absolutně plynulý chod. V kompaktním provedení lehce splní rozměrové požadavky. Kvůli dodržení tuhosti konstrukce je nutné zachovat průměr vodící tyče. Lze využít nabídky výrobce, a proto volím požadovanou délku 100 mm a výrobu požadovaných závitů do čel tyčí. Je možné objednat i povrchovou úpravu, volím černé chromování, které zajistí korozivzdornost a zabrání nežádoucím odleskům v prostoru mikroskopu (obr. 17).

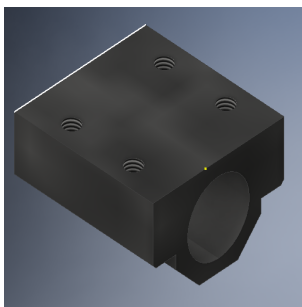


Obrázek 16: *Kuličkové vedení:*  
Zdroj: [13]



Obrázek 17: *Povrchová úprava  
LTBC*  
Zdroj: [14]

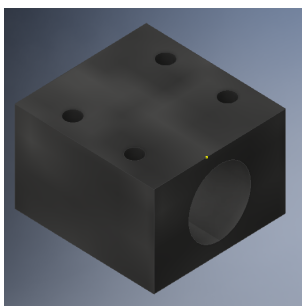
Průchodka se nalisuje do otvorů upravených nosičů (obr. 18), které se přišroubují k čelistem. Kuličkový jezdec je nutno vymezit na vodící tyči pro zajištění funkčnosti vedení po celém rozsahu pohybu čelistí. Tímto řešením se vyhoví požadavku na minimalizaci úprav, při obrovském zlepšení chodu čelistí. Touto výměnou se nepřekročí maximální zástavbové rozměry dané velikostí stage mikroskopu.



Obrázek 18: *Upravený nosič*

## 4.2 Úprava nosiče

Z volby nového vedení plyne také úprava stávající konstrukce nosiče (obr. 19), který původně sloužil i jako součást kluzného vedení. Je potřeba upravit průměr díry pro montáž jezdců a srazit hrany kvůli možnosti pohybu po připevnění do nového typu stage mikroskopu. Zároveň bylo nutné změnit materiál součásti. Původní nosič, který sloužil zároveň i jako vedení byl vyroben z plastu Oilamid (obchodní název), změnou materiálu na dural došlo k významnému zvýšení tuhosti celé konstrukce zařízení.



Obrázek 19: *Původní nosič*

## 4.3 Návrh čidel

### 4.3.1 Výběr tenzometru

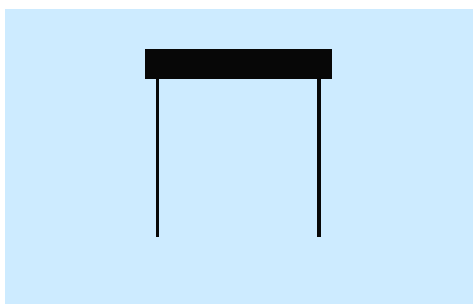
Při výběru tenzometru je nutné přesně určit požadavky pro danou aplikaci, kterými se budu řídit. Pro naše měření jsem jako zcela klíčový požadavek zvolil citlivost a rozměry senzoru. Při experimentech se sledují mikroskopické změny ve struktuře tkáně, a proto potřebujeme v reálném čase zaznamenávat jakoukoli změnu vzniklého napětí. Proto budu jednoznačně vybírat z polovodičových tenzometrů (obr. 20), které svou citlivostí předčí všechny ostatní typy.



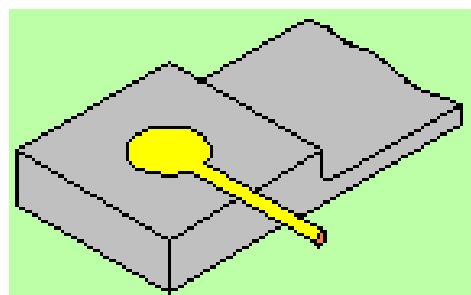
Obrázek 20: Polovodičový tenzometr Zdroj:[5]

Jako dodavatele tenzometrů využiji nabídku firmy VTS Zlín, protože mimo poradenství při výběru nejvhodnějšího senzoru, jsou schopni zajistit i nalepení tenzometru a tedy kompletní výrobu čidla dle mého návrhu. Při výrobě tohoto miniaturního čidla je zapotřebí speciálních přípravků, díky kterým se tenzometry umístí naprosto přesně a bude zajištěno, že při měření budeme získávat správné hodnoty.

Vybral jsem tedy polovodičový tenzometr *AP130-3-12/BP* (*A-uspořádání tenzometru (obr.21)*, *P-pozitivní deformační citlivost*, *130-hodnota součinitele deformační citlivosti*, *3-délka tenzometru*, *12-odpor v desítkách ohmů*, *BP-tvar konce křemíkové části tenzometru (obr.22)*) z katalogu výrobce, který mi byl odborníkem schválený jako vhodný.



Obrázek 21:  
*Uspořádání tenzometru*  
Zdroj: [5]



Obrázek 22:  
*Tvar konce křemíkové části*  
Zdroj: [5]

#### 4.3.2 Materiál

Každý materiál je charakteristický mnoha chemickými, fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. Hlavními jsou: chemické složení, modul elasticity, mez kluzu, mez pevnosti, tepelná vodivost, elektrická vodivost a další. Na modulu elasticity závisí velikost deformace materiálu, při stejné síle se například hliník zdeformuje více než ocel. Vzhledem k našemu zatížení a snaze využít co největší rozsah měření tenzometru, jsem se rozhodl volit materiál spíše s větší deformací. Čistý hliník však není příliš vhodný svými ostatními mechanickými vlastnostmi. To mě vedlo k výběru slitiny hliníku-duralu. Existuje však mnoho typů duralu o různém chemickém složení a zastoupení jednotlivých prvků. Navíc pro použití na výrobu čidla je také velmi důležité konečné zpracování materiálu, které významně ovlivňuje hysterezi a linearitu duralu. Pro konstrukci čidel

se často používá dural *EN AW2024-T351*, který je po rozpouštěcím žíhání navíc plasticky deformován pro odstranění vnitřních pnutí. Tento materiál mi byl pro své výhodné vlastnosti doporučen i firmou VTS.

### 4.3.3 Umístění a zapojení

Při zatěžování vzorku bude na čidla působit tahová síla, ale zároveň i ohybový moment. Při měření nesmí dojít k jakémukoli výkyvu teploty například průvanem, či dotekem ruky, protože zatímco ohybový moment budeme kompenzovat vhodným zapojením dvou protilehlých tenzometrů, další dva tenzometry pro kompenzaci teploty už není možné umístit kvůli nedostatku prostoru. A proto jsem zvolil zapojení křížem do půlmostu viz. 2. případ kapitola 3.5.8. Protože při nalepení dochází k předpětí tenzometru, kterému není možné zabránit, musí být výsledný můstek dovážen a zkalibrován. Kvůli ochraně tenzometru a konektorů budou plochy zality v silikonu.

### 4.3.4 Dimenzování

Návrh čidla běžně vychází z doporučené poměrné deformace (přetvoření) vhodné pro měření. Nejčastěji to bývá asi 0.5 promile tzn. 500  $[\mu\varepsilon]$ . Zároveň musí být zajištěno, aby čidlo nemohlo být znehodnoceno. Z tohoto důvodu by při maximální síle s určitou bezpečností nemělo vzniknout napětí větší než 80% hodnoty meze elasticity.

Obrázek 23: Chemické složení materiálu *EN AW2024-T351*: Zdroj:[15]

%	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V
min.	-	-	3,80	0,30	1,20	-	-	-	-	-	-
max.	0,50	0,40	4,90	0,90	1,80	0,10	-	0,25	0,10	-	-

Tabulka 3: Vlastnosti materiálu *EN AW2024-T351*

VLASTNOST	[MPa]
Modul elasticity $E$	73100
Smluvní mez kluzu $R_{p0.2}$	290
Mez pevnosti tahu $R_m$	440

### Stanovení průřezu

Čidla se navrhují pro poměrnou deformaci 0.5 promile tj. 500 $[\mu\varepsilon]$ . Proto prvotní návrh průřezu čidla  $A$ , provedu s touto hodnotou  $\varepsilon$  dle Hookova zákona:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = 73100 \cdot 500 \cdot 10^{-6} = 36.55 \text{ MPa} \quad (12)$$

kde

$\sigma$ ....napětí

$E$ ...modul elasticity

$\varepsilon$ ....poměrná deformace

nyňí ze vztahu pro napětí:

$$\sigma = \frac{F_{provoz}}{A} \quad (13)$$

pro přibližnou provozní sílu  $F_{provoz} = 15 \text{ N}$

$$A = \frac{F_{provoz}}{\sigma} = \frac{15}{36.55} = 0.41 \text{ mm}^2$$

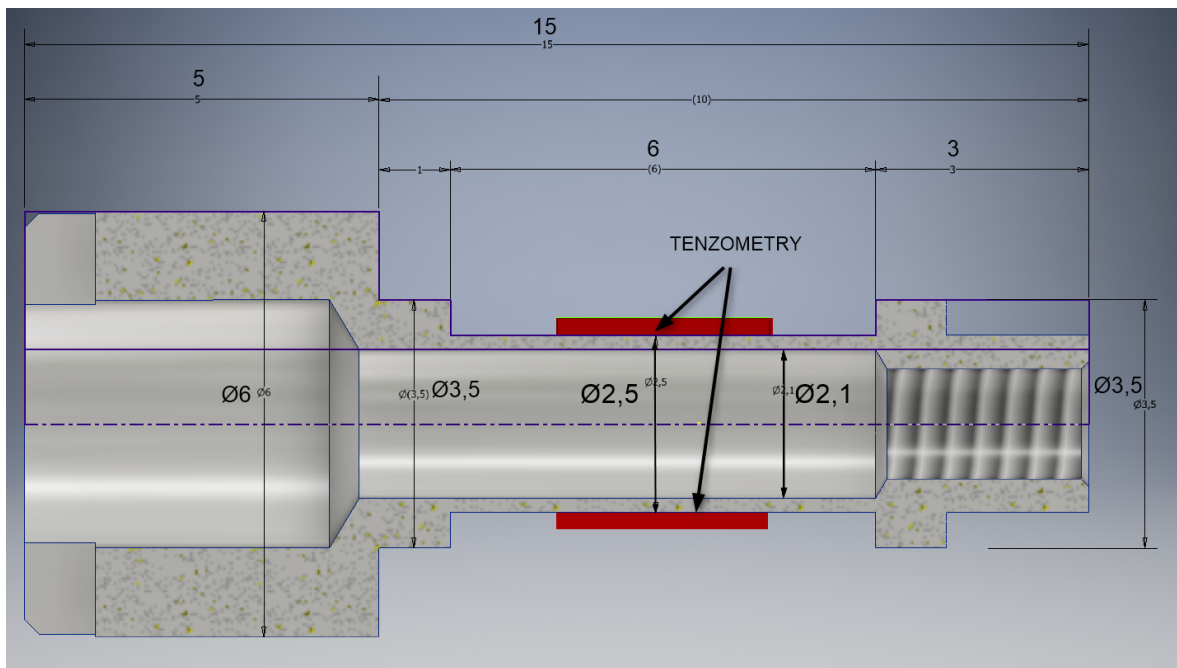
Tento průřez je však pro nás dostupnými prostředky nereálné vyrobit, proto jsem čidlo navrhl s větším kritickým průřezem a to určením tloušťky stěny  $0.1 \text{ mm}$  při průměrech  $2.5 \text{ mm}$  a  $2.7 \text{ mm}$ . Avšak ani tento návrh se nepodařilo realizovat, protože se při výrobě tenká stěna vždy zborčila. Z tohoto důvodu mi bylo doporučeno změnit tloušťku na  $0.2 \text{ mm}$  při průměrech  $2.5 \text{ mm}$  a  $2.1 \text{ mm}$  viz. (obr. 24). Pro tyto hodnoty jsem vypočítal obsah mezikruží dle vztahu:

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot (D_1^2 - D_2^2) \quad (14)$$

kde  $D_1$  a  $D_2$  jsou průměry vnějšího povrchu a díry

Pro  $D_1 = 2.7 \text{ mm}$  a  $D_2 = 2.5 \text{ mm}$

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot (2.5^2 - 2.1^2) = 1.445 \text{ mm}^2$$



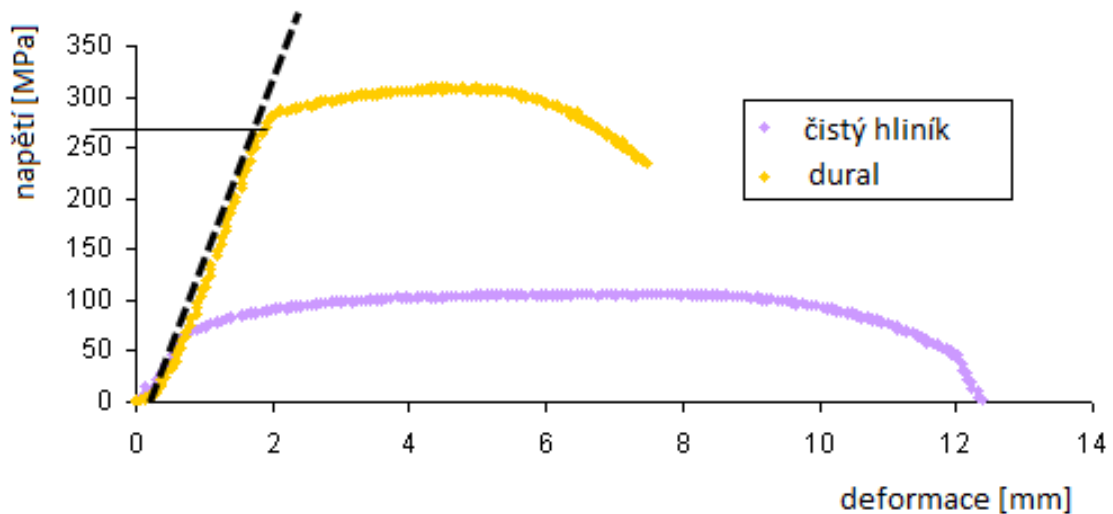
Obrázek 24: Základní rozměry návrhu čidla

## Bezpečnost vůči mezi elasticity

Mez elasticity materiálu, často nazývána mezí proporcionality je napětí, při kterém se materiál přestává deformovat elasticky a začíná plastizovat. Zatímco při napětích v elastické oblasti jsou všechny deformace dokonale vratné, při plastické deformaci

se materiál už nevrátí do výchozí délky. Přesněji je mez elasticity napětí, při kterém přestává platit Hookův zákon (12).

Závislost deformace na napětí již není lineární a odklání se od směrnice dané modulem elasticity  $E$ . Toto napětí lze určit několika metodami, např. offsetovou metodou, kdy uděláme rovnoběžku se směrnicí grafu v elastické oblasti pro hodnotu poměrné deformace 0.002%. Jednodušší je mez elasticity odečíst přímo z diagramu napětí-deformace. Tuto metodu jsem použil i v tomto případě, protože v čidle nebude vznikat tak velké napětí, abych se tímto odhadem ocitl na hranici bezpečnosti zničení čidla. Pro odečtení hodnoty jsem zvolil diagram duralu (obr. 25). Do grafu jsem doplnil čárkovaně přímku se směrnicí danou modulem elasticity  $E$ , nyní je možné určit, kdy závislost přestává být lineární a odchyluje se od přímky. Odečetl jsem přibližnou hodnotu  $R_{PL} = 270 \text{ MPa}$ , tato hodnota pro naše potřeby plně postačuje. Avšak pokud bychom chtěli mez elasticity určit podstatně přesněji, lze provést experiment s daným materiálem přímo za použití tenzometru. Postup je následující, nainstalujeme snímač a poté postupně zatěžujeme (po malých krocích), vždy změříme deformaci, odlehčíme a opět změříme deformaci. V elastické oblasti bychom se vždy měli vrátit na nulu, pokud zaznamenáme deformaci, jsme schopni určit mez elasticity (např. už 0.005%). Tímto si materiál jsme schopni sami proměřit, samozřejmě bychom tento pokus několikrát zopakovali, abychom si byli jisti určenou mezí elasticity.



Obrázek 25: Diagram napětí-deformace duralu Zdroj:[8]

Vzhledem k nepřesnosti metody a možné nedokonalosti materiálu je lepší pro výpočet uvažovat asi 80 % této hodnoty, proto volím

$$R_{PL} = 270 \cdot 0.8 = 216 \text{ MPa}$$

Nyní je třeba vyhodnotit maximální napětí, které může na čidle vzniknout tahem motorů. Při maximálním výkonu a nejmenším kroku, dle údajů výrobce motory vyvi-



nou sílu  $80\text{ N}$ . Tuto hodnotu vynásobíme bezpečností  $1.25$  pro výpočet

$$F_{MAX} = 80 \cdot 1.25 = 100\text{ N}$$

Tyto hodnoty dosadíme do vzorce pro napětí (13) v nejslabším a měřícím průřezu čidla:

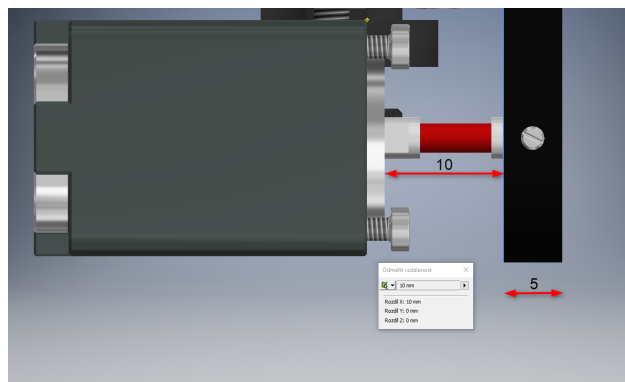
$$\sigma_{MAX} = \frac{F_{MAX}}{A} = \frac{100}{1.445} = 69.2\text{ MPa} \quad (15)$$

Tímto výpočtem jsem ověřil, že ani při maximálním zatížení čidla nedojde k jeho zničení dosáhnutím meze elasticity s výslednou bezpečností  $k$ :

$$k = \frac{R_{PL}}{\sigma_{MAX}} = \frac{270}{69.2} = 3.9$$

### Rozměry čidla

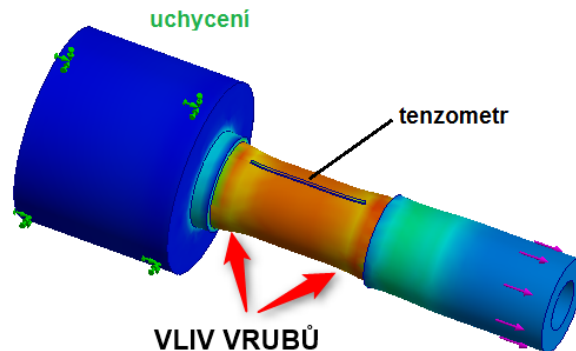
Další rozměry už jsem musel přizpůsobit stávající konstrukci, aby nebyly potřeba žádné úpravy a zásahy. Pro určení celkové délky čidla jsem použil vzdálenost mezi motorem a čelem v krajní poloze čelisti mikrotesteru (obr. 26) (dotyk mezi čelistí a čelem), k tomu jsem přičetl tloušťku čela pro zašroubování čidla. Hodnoty změřené přímo na konstrukci trhačky odpovídají 3D modelu sestavy, a proto jsem návrh provedl přesně podle hodnot z modelu.



Obrázek 26: *Krajní poloha trhačky*

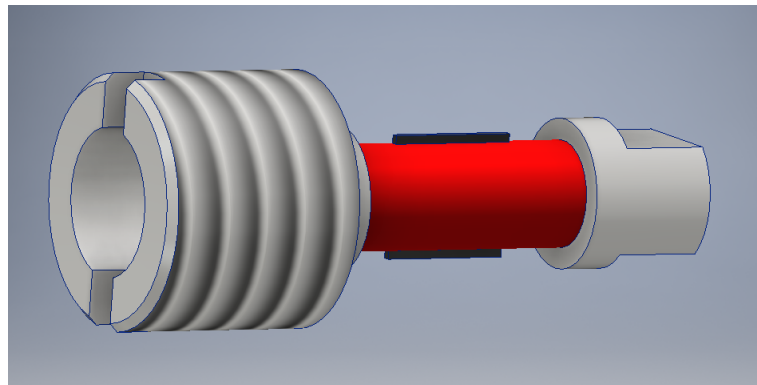
Při návrhu délky plochy pro umístění tenzometrů jsem byl limitován především jejich délkou, u zvoleného typu je to  $3\text{ mm}$ . Tuto plochu jsem osadil z obou stran většími průměry  $3.5\text{ mm}$ , protože v rámci zvýšení odolnosti tenzometrů a kontaktů proti vnějším vlivům plánuji zalít celé ohraničené plochy silikonem. Zvětšení průměru je důležité i z hlediska technologičnosti konstrukce, pro výrobu závitu  $M2$ , kde je potřeba více materiálu, aby nedošlo k jeho stržení. Při změnách průměrů však musím uvažovat možné vrubové účinky na průběh napětí v celé součásti. Proto je nutné udělat plochu dostatečně dlouhou, abych zamezil vlivu špičkových napětí, vznikajících v blízkosti vrubů na měření. Tenzometry musí být na celé své ploše vystaveny působení přibližně stejného napětí. První návrh (obr. 27), kdy plocha pro tenzometry měla délku pouze  $4\text{ mm}$ , byl nevyhovující, proto po zjednodušené analýze bylo nutné ji zvětšit na  $6\text{ mm}$ ,

při této délce jsou vrubové účinky na průběh napětí velmi dobře eliminovány a nebude docházet ke zkreslení výsledků měření.



Obrázek 27: Příklad nevhodného návrhu - oblasti vlivu vrubů

Nakonec přichází na řadu dokončovací operace, kdy je nutné zajistit určitou jakost vnějšího i vnitřního povrchu a to z důvodu zamezení existence mikrovrubů a dokonalého přilnutí tenzometrů k materiálu. Pro tuto operaci jsem navrhl broušení na drsnost Ra 0.8.

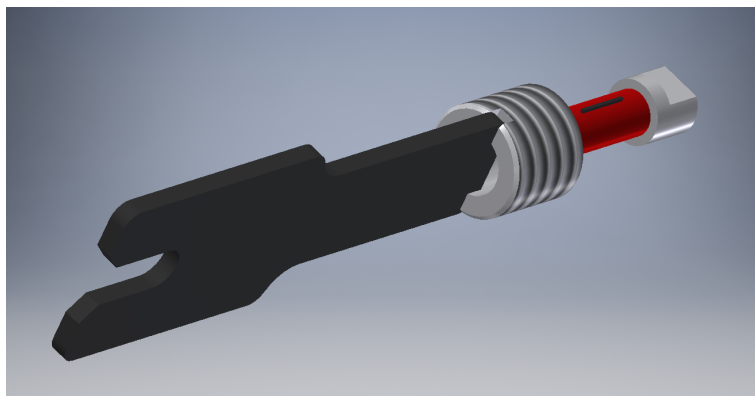


Obrázek 28: Čidlo s tenzometry

### Montážní prvky

Svým návrhem čidla jsem docílil funkční, ale velmi citlivé součásti. Především část s nalepenými tenzometry lze kvůli tenkostěnné konstrukci neopatrnou manipulací vážně poškodit. Tuto oblast je možné namáhat pouze při provozu zařízení, proto považuji za nutné přidat několik prvků pro montáž, aby nedošlo k poškození čidla.

Je velmi důležité, aby měřicí tenkostěnná část nebyla jakkoli namáhána, zejména případným krutem při montáži. Proto doporučuji vytvořit montážní přípravek, tím je klíč, který lze jednoduše vyrobit z plechu pouze za pomoci technologií vrtání a broušení. S touto pomůckou je zajištěna bezproblémová a bezpečná montáž, aniž by byla část s tenzometry zbytečně poškozena.



Obrázek 29: *Montáž do čela*

Jako první doporučuji zašroubovat čidlo do čela trhačky, kdy je použit klíč viz. (obr. 29), proti povolení zajistíme čidlo stavěcím šroubem. Dalším krokem je spojení čidla se závitovou tyčí od motoru (obr. 30), kdy je čidlo jištěno proti pohybu klíčem a závitová vodící tyč se dotáhne.



Obrázek 30: *Spojení vodící závitové tyče*

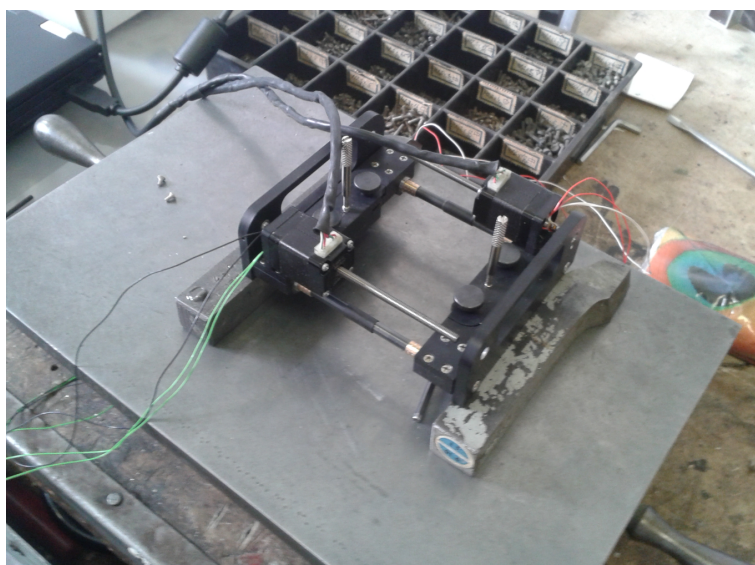
## Závěr

Na základě vytvořené dokumentace byly vyrobeny a dodány potřebné součásti (obr. 31) a zařízení mohlo být smontováno v nové verzi.



Obrázek 31: *Senzor*

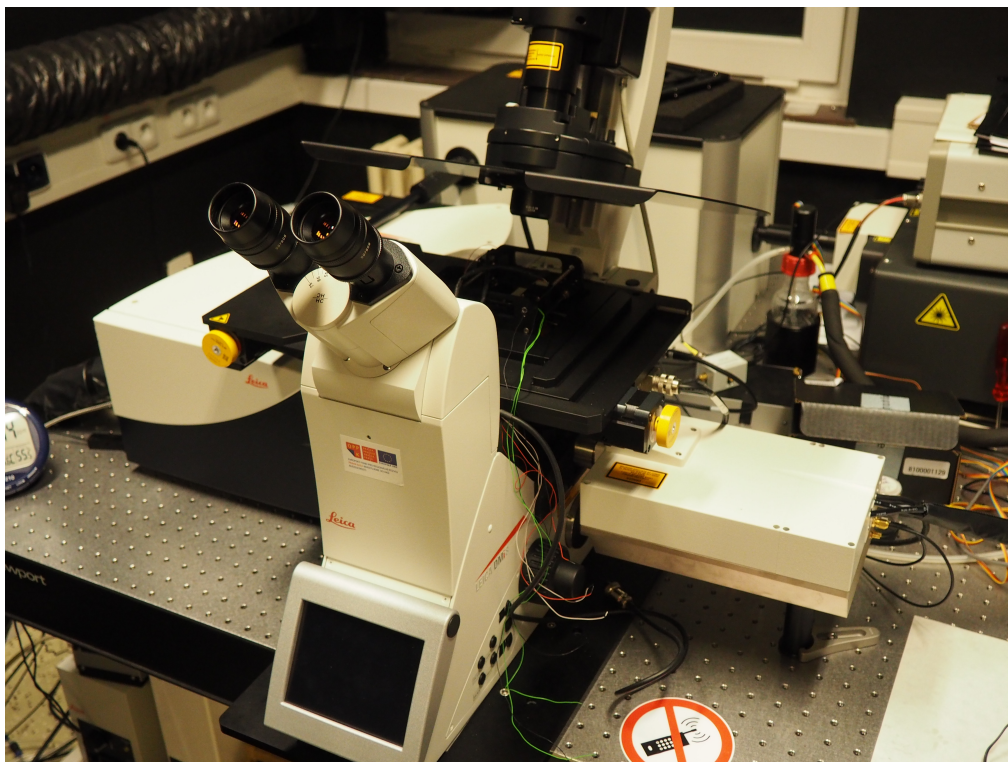
Po otestování funkčnosti celého zařízení (obr. 32) byl mikrotester předán zadavateli,



Obrázek 32: *Konstrukce mikrotesteru s novým vedením*

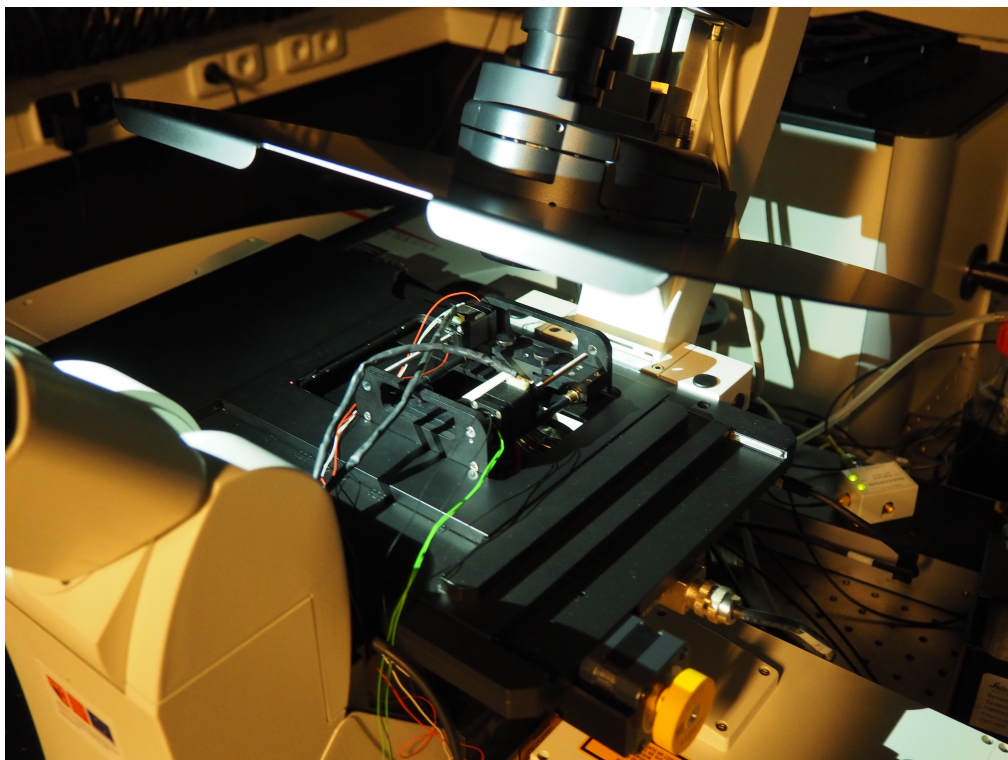
který zahájil jeho testovací provoz v prostředí mikroskopu Leica SP8 (obr. 33), kde budou probíhat měření vzorků.





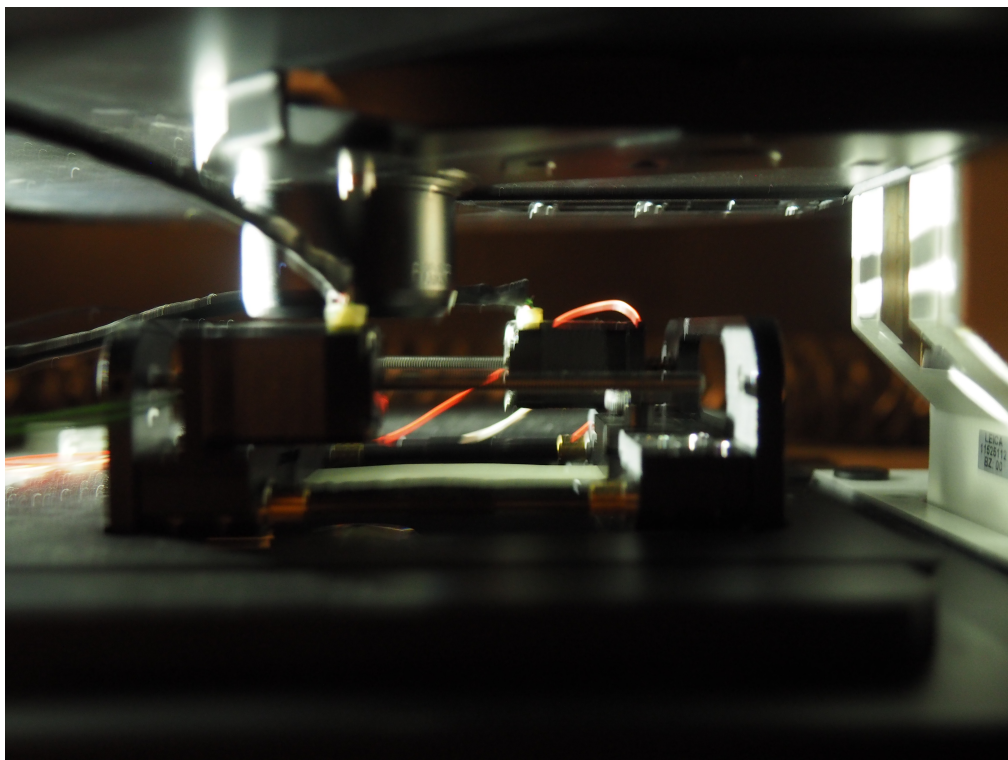
Obrázek 33: *Mikroskop Leica SP8*

Zařízení je v podstatě součástí stage mikroskopu (obr. 34) v prostoru objektivů,



Obrázek 34: *Umístění zařízení na stage mikroskopu*

které jsou po instalaci zkoumaného vzorku sklopeny do těsné blízkosti jeho povrchu (obr. 35) a zařízení je připraveno k měření.



Obrázek 35: *Detail po sklopení objektivů mikroskopu Leica SP8*

## Použité značky a symboly

Symbol	Jednotka	Význam
$\varepsilon$	[1]	Poměrná deformace
$L$	[mm]	Délka
$\Delta L$	[mm]	Změna délky
$R$	[ $\Omega$ ]	Elektrický odpor
$\Delta R$	[ $\Omega$ ]	Změna elektrického odporu
$\rho$	[ $\Omega \cdot m$ ]	Měrný odpor vodiče
$S$	[mm <sup>2</sup> ]	Průřez tenzometrického drátku
$\Delta S$	[mm <sup>2</sup> ]	Změna průřezu
$K$	[1]	Konstanta tenzometru (Gauge faktor)
$\psi$	[1]	Příčná citlivost
$K_x$	[1]	Konstanta tenzometru v podélném směru
$K_y$	[1]	Konstanta tenzometru v příčném směru
$C, C_1, C_2$	[1]	Konstanty v rovnici pro K tenzometru
$R, R_{1,2,3,4}$	[ $\Omega$ ]	Odpor větvi Wheatstonova můstku
$R_i$	[ $\Omega$ ]	Vnitřní odpor
$I_V$	[A]	Výstupní proud (proud diagonálou)
$S_m$	[V/ $\Omega$ ]	Citlivost můstku
$U$	[V]	Napájecí napětí při napěťovém napájení můstku
$I_0$	[A]	Napájecí proud při proudovém napájení můstku
$R_0$	[ $\Omega$ ]	Měřicí tenzometr
$R_k$	[ $\Omega$ ]	Kompenzační tenzometr
$N$	[N]	Osová síla
$U$	[U]	Napájení můstku
$\Delta U$	[U]	Výstupní elektrické napětí z můstku
$d_t$	[%]	Prokluz deformovaného tenzometru za čas $t$
$R_{e,1}$	[ $\Omega$ ]	Odpor tenzometru v okamžiku zdeformování
$R_{e,2}$	[ $\Omega$ ]	Odpor tenzometru po uplynutí času $t$ od zdeformování
$\varepsilon_l$	[1]	Poměrná deformace ve směru prodloužení
$\varepsilon_t$	[1]	Kolmá poměrná deformace
$R_C$	[ $\Omega$ ]	Pevný odpor pro vytvoření můstku
$E$	[MPa]	Modul elasticity
$R_{p0.2}$	[MPa]	Smluvní mez kluzu
$R_m$	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
$\sigma$	[MPa]	Napětí
$F_{provoz}$	[N]	Provozní síla zařízení
$F_{MAX}$	[N]	Maximální dosažitelná síla

$A$	$[mm^2]$	Průřez čidla
$R_{PL}$	$[MPa]$	Mez elasticity
$k$	$[1]$	Bezpečnost
$D_1$	$[mm]$	Vnější průměr plochy pro tenzometry
$D_2$	$[mm]$	Průměr díry
$F_{MAX}$	$[N]$	Maximální dosažitelná síla



## 5 Přílohy

výrobní výkres tenzometrického čidla  
výrobní výkres nosiče čelistí  
materiálový list EN AW2024-T351  
technický list k tenzometrickému čidlu F282

## 6 Seznam použité literatury

- [1] Leica TCS SP8 MP. PRAGOLAB [online]. Praha [cit. 2016-02-10]. Dostupné z:  
<http://www.pragolab.cz/opticke-mikroskopy/konfokalni-mikroskopy/leica-tcs-sp8-mp>
- [2] Scanning Stage SCAN IM 130 x 85. Marzhauser [online]. Wetzlar: © MÄRZHÄUSER WETZLAR GMBH&CO [cit. 2016-02-10]. Dostupné z:  
[http://www.marzhauser.com/en/pim/produktdetail-popup.html?view=details&pimid=a466&no\\_cache=1&m=null&p=null](http://www.marzhauser.com/en/pim/produktdetail-popup.html?view=details&pimid=a466&no_cache=1&m=null&p=null)
- [3] An introduction to measurement using strain gages. HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK [online]. Darmstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1989 [cit. 2016-02-09]. Dostupné z:  
<http://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/techarticles/hoffmann-book/Hoffmann-book-EN.pdf>
- [4] Měřicí technika HBM. HOTTINGER BALDWIN MESSTECHNIK [online]. [cit. 2016-02-09]. Dostupné z: <http://www.hbm.cz/>
- [5] VTS Zlín s.r.o [online]. Zlín: Enzon, 2010 [cit. 2016-02-09]. Dostupné z: <http://www.vtsz.cz>
- [6] MILÁČEK, Stanislav. Měření a vyhodnocování mechanických veličin. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001, 231 s. ISBN 80-01-02417-2
- [7] VOLF, Jaromír a Josef JENČÍK. Technická měření. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000, 212 s. ISBN 80-01-02138-6
- [8] Introduction to mechanical testing. In: Dissemination of IT for the Promotion of Materials Science [online]. England: University of Cambridge, 2004 [cit. 2016-02-09]. Dostupné z:  
<http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/mechanical-testing/printall.php>
- [9] MICHALEC, Jiří. Pružnost a pevnost I. 3. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2009, 308 s. ISBN 978-80-01-04224-3
- [10] MICHALEC, Jiří. Pružnost a pevnost II. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001, 215 s. ISBN 80-01-02375-3
- [11] Linear guide. MISUMI [online]. [cit. 2016-02-10]. Dostupné z:  
<http://www.misumi-europe.com/en/e-catalog>
- [12] Linear Bushigs. MISUMI [online]. [cit. 2016-02-10]. Dostupné z:  
<http://www.misumi-europe.com/en/e-catalog>
- [13] Ball guide. MISUMI [online]. [cit. 2016-02-10]. Dostupné z:  
<http://www.misumi-europe.com/en/e-catalog>

- [14] Linear shaft LTBC. MISUMI [online]. [cit. 2016-02-10]. Dostupné z: [http :  
//www.misumi – europe.com/en/bestseller/steel – shafts – linear – shafts](http://www.misumi-europe.com/en/bestseller/steel-shafts-linear-shafts)
- [15] Material datasheet EN AW2024. SEEBERGER [online]. [cit. 2016-02-10]. Dostupné z:  
[http : //seeberger.net/\\_assets/pdf/werkstoffe/aluminium/en/3.1355.pdf](http://seeberger.net/assets/pdf/werkstoffe/aluminium/en/3.1355.pdf)