



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav konstruování a částí strojů

**Návrh více komponentního zařízení pro měření
zatížení pro smykem řízený nakladač**

**Design of multi-axis load cell for load
measurement in skid steer loader**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2018

Bc. Lukáš Popelka

Studijní program: N2301 STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ
Studijní obor: 2301T047 Dopravní letadlová a transportní technika
Vedoucí práce: Ing. František Starý

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Popelka** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **408927**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav konstruování a částí strojů**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní, letadlová a transportní technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh senzoru pro měření zatížení kol smykově řízeného nakladače

Název diplomové práce anglicky:

Design of Sensor for Load Measuring of Skid Wheel Loader Wheels

Pokyny pro vypracování:

Na základě rešerše navrhnete senzor pro měření zatížení kol smykově řízeného nakladače LDR 400. Práce bude obsahovat koncepty provedení senzoru. Na základě zhodnocení vyberte nejvhodnější variantu provedení, vytvořte 3D model a proveďte dimenzování pomocí MKP analýzy. Navrhnete metodiku kalibrace navrženého čidla.

Seznam doporučené literatury:

Stránky výrobců tenzometrů a měřicí techniky:
<http://www.ni.com/cs-cz.html>
<https://www.hbm.cz>
<https://www.omegaeng.cz>
Studijní podklady odboru pružnosti a pevnosti

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. František Starý, ústav konstruování a částí strojů FS

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

Datum zadání diplomové práce: **09.04.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **03.08.2018**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. František Starý
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Vojtěch Dinybyl, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Návrh více komponentního zařízení pro měření zatížení pro smykem řízený nakladač“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Františka Starého s použitím literatury, uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze 3. 8. 2018

Bc. Lukáš Popelka

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu diplomové práce Ing. Františku Starému za cenné rady a připomínky při zpracování této práce. Dále bych rád poděkoval spolupracovníkům firmy Bobcat EMEA s.r.o. za možnost realizace diplomové práce a užitečné rady k práci.

V neposlední řadě bych rád poděkoval svým blízkým a rodině za morální podporu během celého studia.

Anotační list

Jméno autora: Bc. Lukáš Popelka

Název BP: Návrh více komponentního zařízení pro měření zatížení pro smykem řízený nakladač

Anglický název: Design of multi-axis load cell for load measurement in skid steer loader

Rok: 2018

Studijní program: Strojní inženýrství

Obor studia: Dopravní, letadlová a transportní technika

Ústav: Ústav konstruování a částí strojů

Vedoucí DP: Ing. František Starý

Bibliografické údaje: počet stran 93
počet obrázků 97
počet tabulek 13
počet příloh 0

Klíčová slova: více komponentní zařízení, tenzometr, nakladač

Keywords: multi-axis load cell, strain gauge, loader

Anotace:

Cílem této diplomové práce je návrh více komponentního zařízení pro modelovou řadu smykem řízených nakladačů společnosti Bobcat EMEA s.r.o. včetně návrhu kalibrace tohoto zařízení. Součástí práce není fyzická realizace funkčního prototypu ani kompletní vývoj zařízení. Práce se zaměřuje na možný návrh designu přípravku včetně měřících členů zatížení s přihlédnutím na připojovací rozměry a zástavbové prostory.

Abstract:

The main purpose of this diploma thesis is design of multi-axis load cell for model series skid steer loaders Bobcat EMEA s.r.o. company including design of calibration of this device. Part of this work is not physical realization functional prototype neither complete development of this device. This thesis is focuses on possible design of device include design of load measuring component taking into account connecting dimensions and building space.

Obsah

1	Úvod	1
1.1	Zadání a cíl práce	2
2	Teorie a problematika mechanického namáhání [2,3].....	3
2.1	jednoosá deformace tělesa	3
2.1.1	Absolutní prodloužení tělesa.....	3
2.1.2	Relativní prodloužení tělesa	3
2.1.3	Poissonovo číslo	4
2.1.4	Pracovní diagram.....	5
2.1.5	Hookeův zákon, youngův modul	6
2.2	Prostorová deformace tělesa [2]	7
3	Odporová tenzometrie [3,5,6]	9
3.1	Princip odporových tenzometrů [5]	10
3.2	Terminologie a popis základních parametrů, mezní podmínky [3,5,6].....	11
3.3	Vliv provozních podmínek.....	17
3.4	Rozdělení odporových tenzometrů.....	21
3.4.1	Kovové odporové tenzometry	21
3.4.2	Polovodičové tenzometry	23
3.4.3	Druhy a typy odporových tenzometrů	24
3.5	Instalace odporových tenzometrů [3,6]	30
3.5.1	Příprava plochy objektu	31
3.5.2	Lepení tenzometrů [3,12].....	33
3.5.3	Ochrana tenzometrů [3,8].....	35
4	Princip tenzometrického měření [5,6]	38
4.1	Wheatstonův můstek	38
4.1.1	Zapojení do plného mostu [3]	40
4.1.2	Zapojení do půl mostu	41
4.1.3	Zapojení do čtvrt mostu	41
4.2	Použití jednotlivých konfigurací dle zatížení [13]	42
5	Experimentální testování [2]	45
5.1	Experimentální měření	46
5.1.1	Parametry měření.....	46
6	Návrh senzoru pro měření zatížení	52
6.1	Výrobci víceosých snímačů.....	52
6.2	Konstrukční koncepty víceosého senzoru	54
6.2.1	Koncept č.1	55
6.2.2	Koncept č.2	58
6.2.3	Koncept č.3	62
6.2.4	Další koncepty	65
6.2.5	Finální koncept.....	66
6.3	Zapojení tenzometrů	71
6.3.1	Měření kroutícího momentu	71



6.3.2	Měření klopných momentů.....	72
6.3.3	Měření axiální síly	73
6.3.4	Měření svislé a podélné síly	75
7	Kalibrace [18]	78
7.1	Princip kalibrace	78
7.2	Realizace kalibrace	79
8	Výroba konceptu a instalace	81
8.1	Svařenec konceptu	81
8.2	Instalace.....	83
9	Závěr.....	86
	seznam použitých zdrojů [1].....	87
	seznam použitých symbolů a značek	89
	seznam obrázků.....	91
	seznam tabulek	93

1 ÚVOD

V současné době dochází k výraznému nárůstu stavebních prací a stavebnictví jako takového po celém světě, nejvíce v rozvojových zemích a nově industrializovaných oblastech. Moderní výstavba v těchto oblastech se neobejde bez kvalitní a specializované stavební techniky, která přispívá ke zrychlení a zkvalitnění práce. Velkou výhodou jsou univerzální stavební stroje, které zvládnou více druhů stavebních prací a dokáží nahradit více jednoúčelových strojů, ať už z pohledu nákupů strojů, zajištění školení obsluhy pro jednotlivé stroje, časových prodlev při obměně strojů či při servisu jednotlivých strojů.

Jedním takovým strojem je smykem řízený nakladač (Obr. 1), což je univerzální stavební stroj vhodný převážně k nakládání a přemísťování materiálu a provádění zemních výkopových prací. Tyto nakladače lze opatřit i dalšími pracovními komponenty a rozšířit tak pracovní záběr. Jednou z předních firem vyrábějící tyto nakladače je Doosan Bobcat s.r.o.



Obr. 1.: Smykem řízený nakladač firmy Bobcat [7]

Americká firma Bobcat s.r.o patří mezi přední výrobce těchto nakladačů. Ačkoliv moderní trend více inklinuje ke snižování výrobních nákladů než ke zvyšování kvality strojů, není možné při návrhu součástí, a tedy návrhu celého stroje, dojít k poddimenzování návrhu. Ke správnému dimenzování je důležité znát komplexní zátěžné spektrum jednotlivých dílů a sestav stroje. Pokud se bude vycházet ze špatných informací ohledně zatížení, může dojít k poruše či havárii celého stroje. Taková havárie stroje má za následek zastavení provozu, přímé finanční náklady na opravu, časovou prodlevu vedoucí

k dodatečným finančním nákladům a v nejhorším případě může mít i za následek zranění či dokonce usmrcení pracovní obsluhy. Stejně tak je nechtěný i opačný jev, kdy dochází k nadměrnému předimenzování součástí a tím ke zbytečnému navýšení pořizovací ceny stroje a zvyšování hmotnosti stroje. A právě zjišťování zátěžných podmínek pro smykem řízený nakladač od firmy Doosan Bobcat s.r.o při různých pracovních režimech bude cílem této diplomové práce.

1.1 ZADÁNÍ A CÍL PRÁCE

Navrhněte vyměnitelné zařízení pro měření zatížení na kolech smykem řízeného nakladače pro modelové řady S450 a S500'. Zařízení dimenzujte s ohledem na následující parametry [7]:

- Provozní schopnost a odolnost během výkopových prací
- Sběr a ukládání dat
- Vyměnitelnost pomocí redukcí pro modelové řady LDR S450 a S500'

Předpokládané rozsahy zatížení a klimatických podmínek:

- Horizontální a vertikální síla: 20 000 N
- Axiální (boční) síla: 15 000 N
- Klopné a kroučící momenty: 10 000 Nm
- Pracovní rozsah teploty: (15÷70) °C

2 TEORIE A PROBLEMATIKA MECHANICKÉHO NAMÁHÁNÍ [2,3]

Při dimenzování součástek zařízení je nutné si uvědomit, že napětí nelze měřit přímou metodou. V experimentální mechanice se napětí měří nepřímou metodou, kdy je změřeno přetvoření na součástce a pomocí materiálových konstant přepočteno na požadované napětí. Právě vlivem zatížení nebo změnou teploty dochází k deformaci těles, což lze matematicky popsat pomocí poměrných deformací, respektive složek posunutí. Následující kapitola se pro zjednodušení soustřeďuje na jednoosé deformace, respektive jednoosou napjatost, základní principy se pak uplatňují i pro prostorovou deformaci tělesa.

2.1 JEDNOOSÁ DEFORMACE TĚLESA

Deformace tělesa obvykle slouží k popisu velikosti změny délky rozměru od původního stavu. Změna délky nemusí být vyvolána pouze vnější silou, ale také například změnou teploty. Je důležité rozlišovat mechanické namáhání a tepelné namáhání. Stejně tak je důležité rozlišovat relativní prodloužení tělesa a absolutní prodloužení tělesa. V případě nárůstu změny délky se jedná o prodloužení tělesa, pro opačný jev se jedná o zkrácení tělesa.

2.1.1 ABSOLUTNÍ PRODLOUŽENÍ TĚLESA

Absolutním prodloužením, respektive zkrácením tělesa, se rozumí rozdíl velikosti změny délky v daném směru od původního stavu k novému měřenému stavu v konkrétním čase.

$$\Delta l = l - l_0 \quad (1)$$

Referenční délkou pro vyhodnocení nejčastěji bývá celková délka součásti v měřeném směru, může to však být i určitý úsek. Změna délky může být kladná v případě tahového působení či zahřátí tělesa nebo záporná v případě tlakového působení či ochlazení tělesa.

2.1.2 RELATIVNÍ PRODLOUŽENÍ TĚLESA

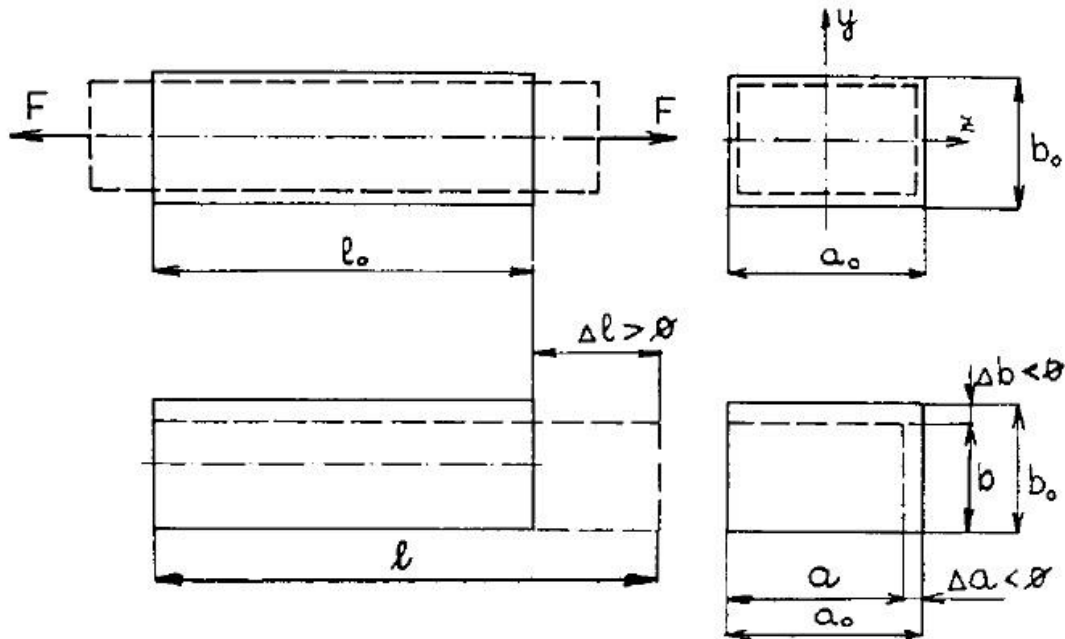
Relativním prodloužením, respektive zkrácením tělesa se rozumí absolutní velikost změny délky v daném směru vzhledem k původní délce tělesa či referenční délky.

$$\varepsilon = \Delta l / l_0 \quad (2)$$

Z rovnice (2) je patrné, že relativní prodloužení je veličina bez jednotky. Někdy se velikost relativního prodloužení udává v %, což přispívá k lepší názornosti velikosti deformace.

2.1.3 POISSONOVO ČÍSLO

Při zatěžování tělesa nedochází k deformaci pouze ve směru působení sil, ale také ke změně příčných rozměrů podle (Obr. 2)



Obr. 2.: Smykem řízený nakladač firmy Bobcat [2]

Při zavedení souřadného systému lze napsat deformace v jednotlivých směrech jako:

$$\varepsilon_x = \Delta l / l_0 \quad (3)$$

$$\varepsilon_y = \Delta b / b_0 \quad (4)$$

$$\varepsilon_z = \Delta a / a_0 \quad (5)$$

Pro kladné hodnoty Δl , tedy v případě prodloužení ve směru osy x a kladné hodnoty ε_x , lze očekávat záporné hodnoty Δa a Δb , tedy i záporné hodnoty ε_y a ε_z . Ve směru osy x mluvíme o poměrném prodloužení tělesa, ve směru osy y a z o poměrném zkrácení tělesa. Pro izotropní materiály je hodnota $\varepsilon_y = \varepsilon_z$. Na základě dřívějších experimentů korespondujících se znalostmi o krystalografické mřížce lze zavést vztah (6)

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = -\mu \cdot \varepsilon_x \quad (6)$$

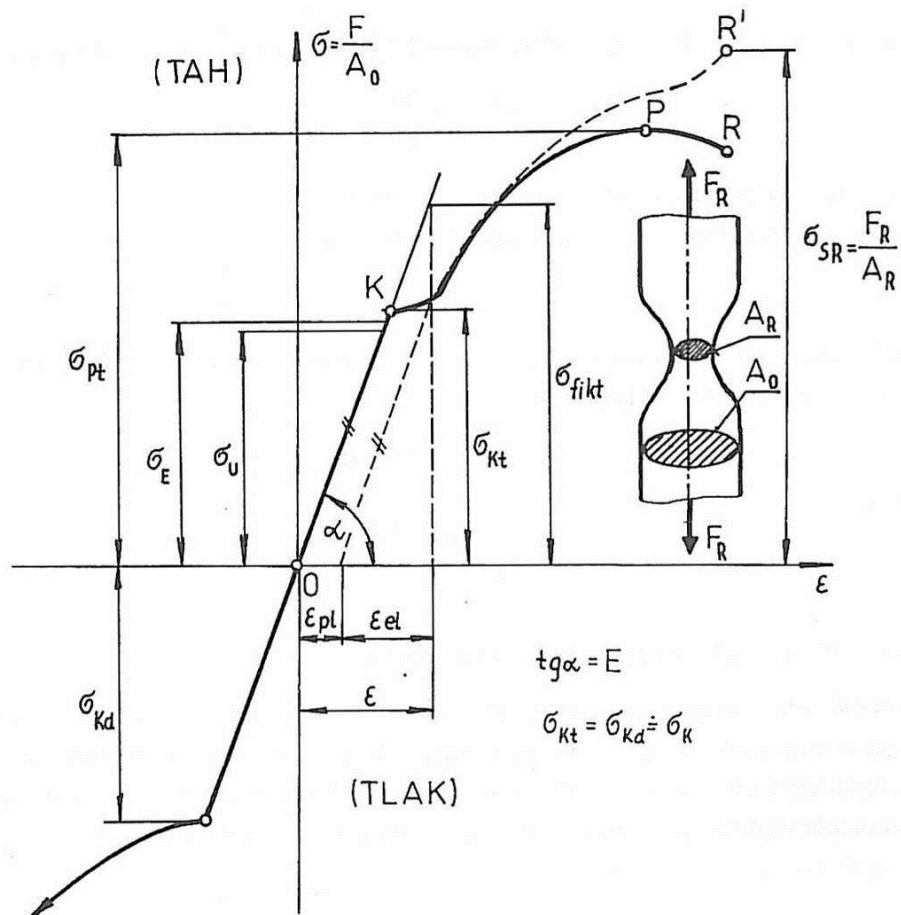
Součinitel příčného zúžení μ neboli Poissonovo číslo lze pro oblast pružných deformací brát jako konstantu. Jeho absolutní hodnotu pro jednoosou deformaci v oblasti pružných deformací lze vyjádřit vztahem (7)

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right| \quad (7)$$

2.1.4 PRACOVNÍ DIAGRAM

Jedná se o diagram znázorňující závislost mezi deformací a napětím. Pracovní diagram se získává z tahové zkoušky na předepsaných vzorcích dle norem ČSN. Na Obr. 3 je uveden příklad pracovního diagramu pro měkkou ocel dle závislosti vztahu (8)

$$\sigma = \sigma(\varepsilon) \quad (8)$$



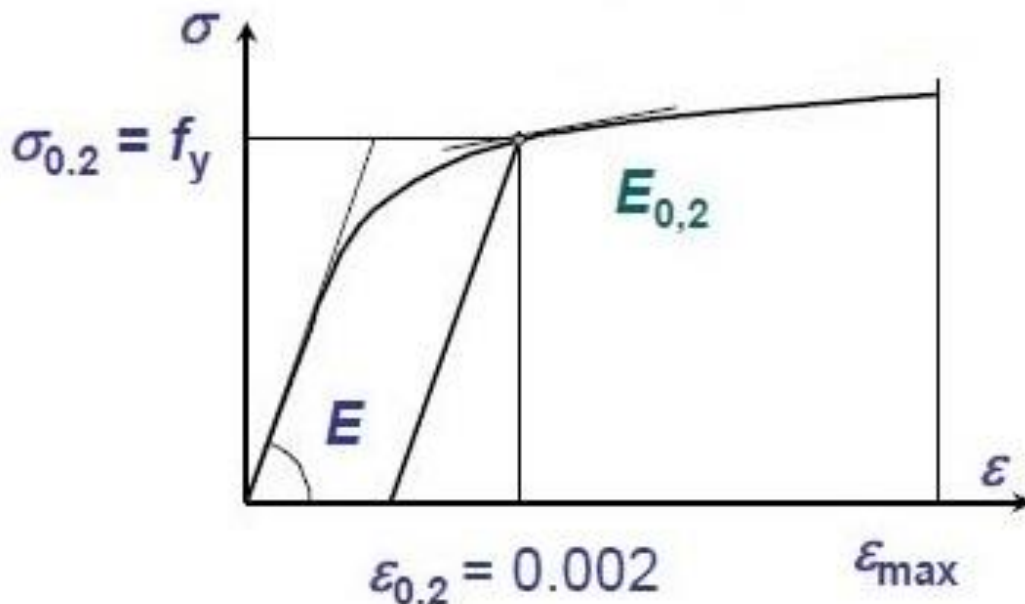
Obr. 3.: Pracovní diagram měkké ocele [2]

0 – nezatížený stav
 K – mez kluzu
 E – Youngův modul

σ_E – napětí mezi pružnosti
 σ_U – napětí mezi úměrnosti
 σ_{Kt} – napětí mezi kluzu

Napětí do meze pružnosti nezpůsobuje v materiálu žádné trvalé deformace, vznikají tedy pouze pružné deformace. Od hodnoty napětí mezi kluzu se začínají v materiálu výrazně projevovat plastické deformace, tedy deformace trvalé.

Většina materiálů se však nevyznačuje tak výraznou hodnotou mezi kluzu. Pro tyto materiály byla zavedena smluvní mez kluzu. Smluvní mez kluzu je právě taková velikost napětí, která způsobí předepsanou hodnotu plastické (trvalé) deformace, nejčastěji pro hodnotu 0,2 % (Obr. 4)



Obr. 4.: Pracovní diagram tvrdé ocele [4]

2.1.5 HOOKEŮV ZÁKON, YOUNGŮV MODUL

Hookeův zákon je matematická podoba lineární části rovnice (8) a pro jednoosou napjatost má tvar (9),

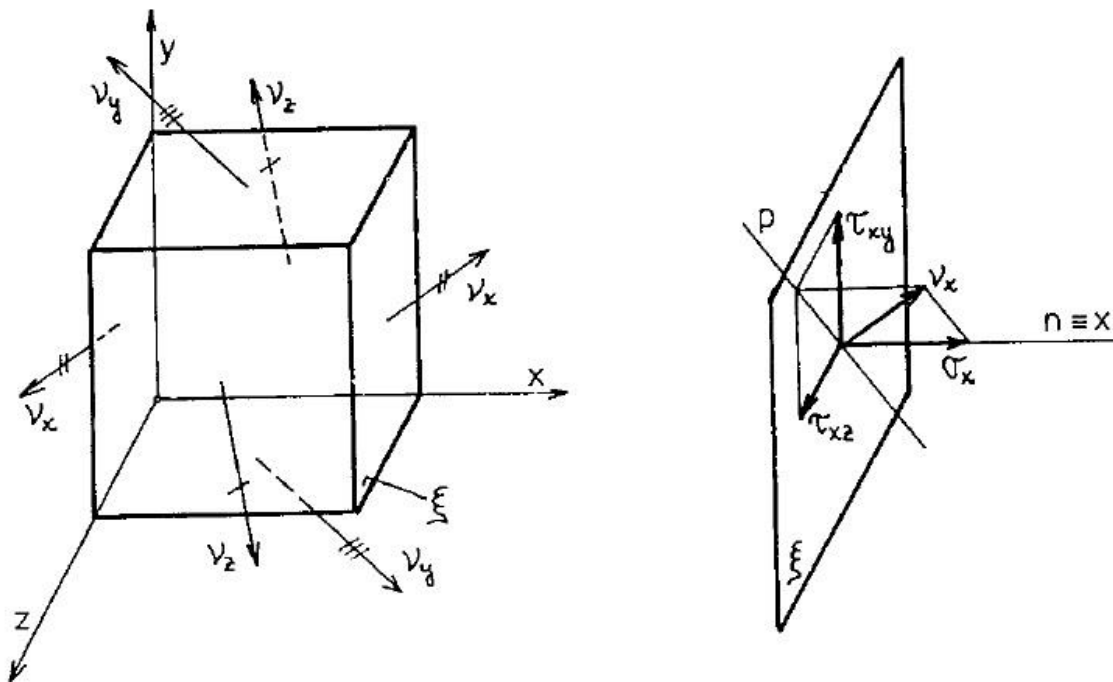
$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (9)$$

kde hodnota E je modul pružnosti v tahu neboli Youngův modul a má stejné jednotky jako napětí. Youngův modul je dán směrnicí tečny lineární oblasti diagramu. Pro větší hodnotu modulu pružnosti bude materiál méně deformován než materiál s menší hodnotou při

stejném napětí, v případě stejného průřezu při stejném silovém zatížení. Ačkoliv je často hodnota E brána jako konstant, může se tato hodnota měnit, např. se změnou teploty.

2.2 PROSTOROVÁ DEFORMACE TĚLESA [2]

V této kapitole rozšíříme chápání deformace tělesa z jednoosé napjatosti na víceosou napjatost. Dá se dokázat, že napjatost je v určitém bodě tělesa jednoznačně určena, známe-li napětí působící ve třech vzájemně kolmých rovinách proložených tímto bodem. Bývá zvykem při grafickém znázornění těchto tří rovin a příslušných napětí v nich působících kreslit celý elementární hranolek (Obr. 5). V pomyslných rovinách leží obecná napětí v_x , v_y a v_z .

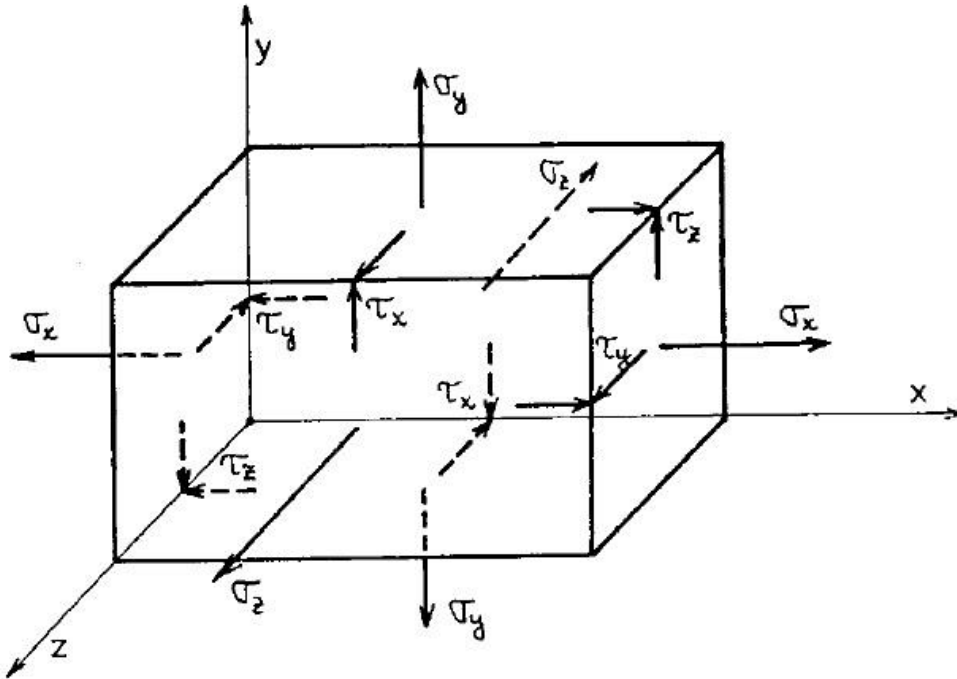


Obr. 5.: Elementární hranolek s vyznačenou rovinou ξ [2]

Je zapotřebí si však uvědomit, že rozměry hranolku slouží pouze pro lepší názornost. Nyní si vezmeme pomyslnou rovinu ξ dle (Obr. 5), která je kolmá na osu x a rozložme obecné napětí v_x na normálové napětí σ_x , tedy napětí, jehož směr je totožný s osou x a smykové napětí τ_{xy} a τ_{xz} , tedy smyková napětí, jejichž směr je vždy totožný s danou osou y a z a normála vždy kolmá k právě rovině ξ . Tento rozklad je výhodný v budoucích výpočtech oproti obecnému napětí v vzhledem k vymizení problematiky svírají úhel tohoto napětí a rovinou ve kterém působí. Pokud tento rozklad provedeme pro zbylé osy y a z , dostaneme 9 složek napětí σ_x , τ_{xy} , τ_{xz} , σ_y , τ_{yx} , τ_{yz} , σ_z , τ_{zx} a τ_{zy} . Lze dokázat, že lze zjednodušit značení smykového napětí dle vztahu (10)

$$\begin{aligned}
 \tau_{XY} &= \tau_{YX} = \tau_Z \\
 \tau_{YZ} &= \tau_{ZY} = \tau_X \\
 \tau_{ZX} &= \tau_{XZ} = \tau_Y
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Tímto zjednodušením dostaneme šest složek napětí, z něhož jsou tři složky normálová napětí a tři složky smyková napětí. Pokud je těchto všech šest složek nenulových, mluvíme o prostorové (trojosé) napjatosti (Obr. 6)



Obr. 6.: Prostorová napjatost určená šesti složkami napětí [2]

Pro případ, kdy obecné složky napětí v_x , v_y budou v rovině rovnoběžné s rovinou xy a $v_z = 0$, budou všechny složky napětí ležet v rovině xy . V tom případě budou nenulové pouze složky σ_x , σ_y a τ_z – což odpovídá rovinné (dvojosé) napjatosti.

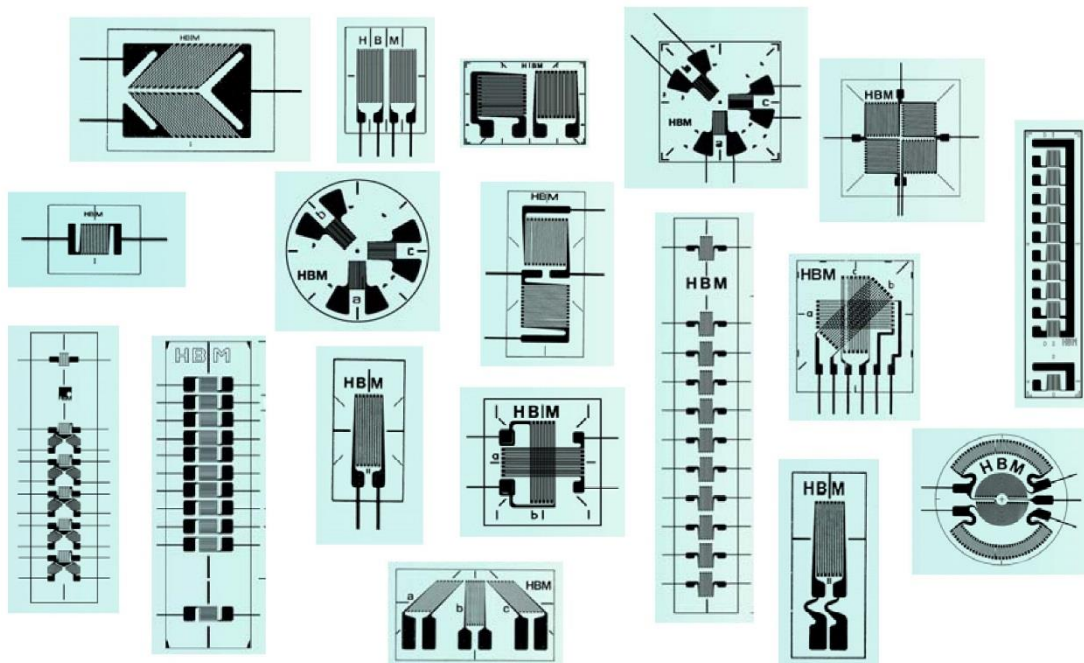
Pro případ, kdy obecné složky v_y a v_z budou nulové a v_x nenulové rovnoběžné s osou x , bude nenulová pouze složka σ_x – což odpovídá přímkové (jednoosé) napjatosti.

3 ODPOROVÁ TENZOMETRIE [3,5,6]

Odporová tenzometrie je experimentální metoda využívající odporových tenzometrů k měření napětí využívající deformace tenzometru, který je pevně spojen s povrchem zkoumaného objektu. Z tohoto důvodu je nutné zajistit kvalitní spoj mezi tenzometrem a měřeným objektem, více v kapitole [3.5]. Využívá se tak jevu, kdy součástka mění svůj měrný elektrický odpor v závislosti na deformaci, resp. v závislosti na změně rozměrových parametrů.

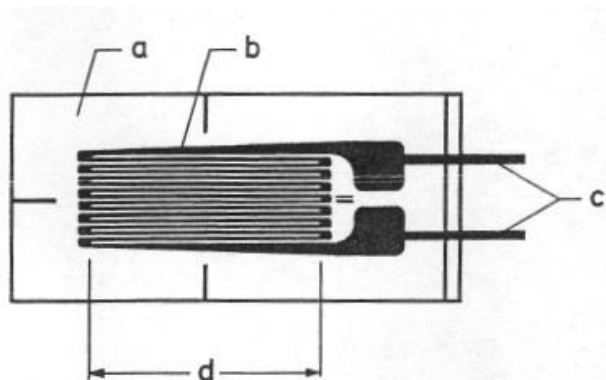
Tenzometrie tak patří mezi experimentální metody zjišťování mechanických veličin a stala se nenahraditelnou složkou v oblasti průmyslu, zejména strojírenství a stavebnictví. Nejčastěji se tato metoda používá ke zjištění napětí, sil, kroutících momentů a tlaků. Počátky praktické tenzometrie se datují přibližně do první poloviny 20. století, ačkoliv poznatky, o které se základy tenzometrického měření opírají, byly známy od první poloviny 19. století.

Mezi současně nejvyspělejší a největší firmu zabývající se tenzometrií patří německá firma HBM, která prováděla tenzometrické zkoušky už za druhé světové války, odkud načerpala mnoho zkušeností, hlavně při zkoumání mechanických veličin pro válečná letadla ve zkušebním centru Luftwaffe. Mezi další přední výrobce patří firmy Omega nebo Vishay, za zmínku určitě stojí též firma National Instruments, přední dodavatel příslušenství pro měření. Vzhledem ke zvyklosti firmy a spolupráce s firmou HBM je spousta následujících kapitol psaná přímo pro tenzometry od firmy HBM včetně hodnot, grafů, obrázků apod. až po doporučenou instalaci.



Obr. 7.: Odporové tenzometry firmy HBM [8]

V současné době se nejvíce používají fóliové tenzometry kvůli jejich jednoduchosti a efektivitě. Obyčejný fóliový tenzometr je složen ze tří hlavních částí (Obr. 8):



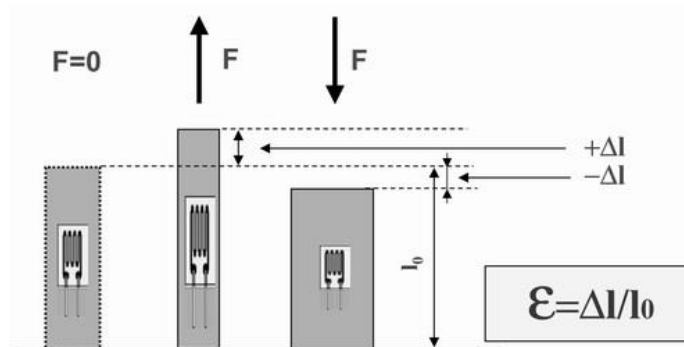
- a) podkladová fólie
- b) měřicí mřížka
- c) připojovací drátky

Obr. 8.: Části fóliového tenzometru [3]

, kde vzdálenost d je aktivní délka mřížky je nejdůležitějším parametrem, podle kterého je často i konkrétní typ tenzometru označován.

3.1 PRINCIP ODPOROVÝCH TENZOMETRŮ [5]

Jak již bylo zmíněno, odporové tenzometry pracují na principu změny měrného elektrického odporu v závislosti na změně rozměrových parametrech neboli na změně deformace. Pokud je tenzometr pevně spojen s deformovaným objektem, je deformace tenzometru stejná jako deformace objektu v místě, kde je tenzometr připevněn (Obr. 9).

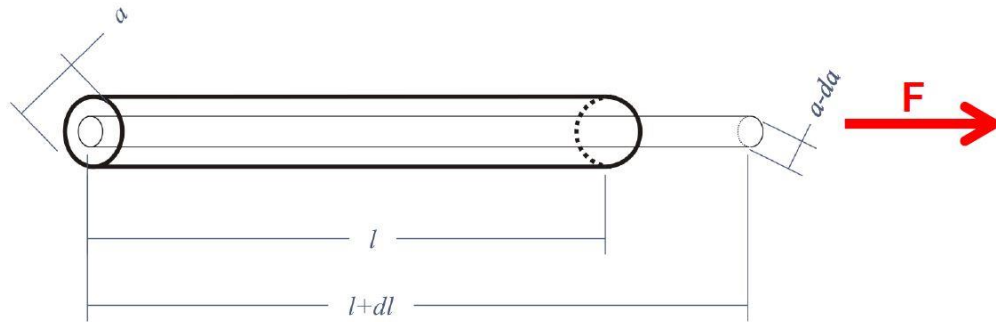


Obr. 9.: Deformace tenzometrů [10]

Vezměme si obecně kovový vodič o průřezu S a délky l (Obr. 10) v nezátíženém stavu. Tento vodič má velikost odporu:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (11)$$

Pokud bychom tento vodič zatížili tahovou silou F , dojde ke změně parametrů vodiče, kdy se prodlouží o délku dl a zúží o da (Obr. 10).



Obr. 10.: Schéma vodiče při zatížení [9]

Dojde nejen ke změně délky l a průřezu S , ale zároveň ke změně měrného odporu ρ . Tato změna lze popsat parciální derivací jako:

$$dR = d\rho \cdot \frac{l_0}{S} + dl \cdot \frac{\rho}{S} - \frac{dS}{S^2} \cdot \rho \cdot l \quad (12)$$

Při dalších úpravách lze dojít ke vztahu, který popisuje tuto změnu pomocí změně elektrického odporu, deformace vodiče a konstanty označované K neboli K -faktor:

$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon \cdot k \quad (13)$$

$$k = \frac{\Delta R}{R \cdot \varepsilon}$$

3.2 TERMINOLOGIE A POPIS ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ, MEZNÍ PODMÍNKY [3,5,6]

Deformační součinitel tenzometru

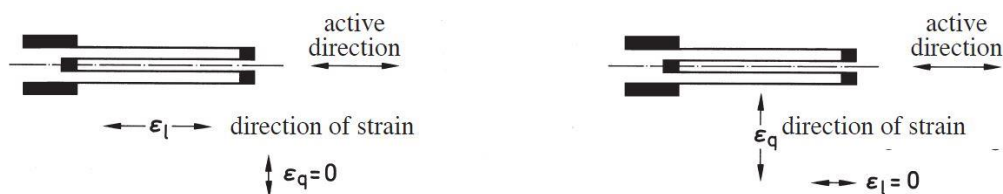
Též nazývaný K -faktor tenzometru, v angličtině gage factor. K -faktor popisuje konfiguraci celého tenzometru. Ta závisí hlavně na parametry měřící mřížky, typu tenzometru, materiálu vodiče a teplotě. Hodnota K -faktoru nám ve výsledku udává přepočtení mezi deformací a změnou odporu vztaženou k jmenovitému odporu. Tato hodnota se určuje experimentálně a výrobce ji vždy udává pro daný tenzometr. Pro nejčastěji používaný materiál měřící mřížky konstantan je K -faktor roven přibližně dvěma. Rozdílné typy a velikosti tenzometrů mohou hodnotu zvyšovat či snižovat, vždy je zapotřebí se řídit hodnoty výrobce pro právě používaný tenzometr.

Závislost mezi změnou měrného odporu a deformací lze považovat za lineární, ačkoliv část má parabolický průběh. Tato oblast je však často mimo pracovní oblast, proto není zapotřebí tuto oblast kompenzovat či matematicky popisovat. Změny jsou tak malé, že lze tyto odchylky v klidu zanedbat. Většinou se bavíme o hodnotě menší než 0,1 %. Až při dosažení určité hodnoty deformace se více projeví nelineární průběh, tato hodnota je také udávána výrobcem.

Hodnotu K-faktoru dále výrazněji ovlivňuje teplota. Základní hodnota K-faktoru je vždy měřena při konkrétní hodnotě, nejčastěji při $T = 20^\circ$ či teplotě blízké. Výrobce vždy udává koeficient, kterým lze hodnotu K-faktoru přepočítat od základní teploty na teplotu měřeného místa. Závislost je často vzrůstající se zvyšující se teplotou, některé materiály mají závislost však opačnou.

Příčná citlivost snímače

U jednoduchých tenzometrů by mělo v ideálním případě docházet k deformaci pouze ve směru aktivní měřící mřížky tenzometru. V tu chvíli bychom mohli brát příčnou deformaci tenzometru rovnu nule (Obr. 11) a změna odporu by byla závislá pouze na K-faktoru. Pro případ příčné deformace, tedy deformace kolmé k aktivnímu směru, bychom mohli uvažovat zase pouze deformační součinitel v příčném směru. V reálu však dochází k deformaci v obou směrech. Tuto deformaci si lze zjednodušeně představit jako zúžení, respektive rozšíření při tahovém, respektive tlakovém zatížení.



Obr. 11.: Deformace mřížek s ohledem na směr zatížení [3]

Každý tenzometr je od výrobce popsán právě touto závislostí, tedy závislostí mezi deformačním součinitel v příčném a aktivním směru a je označován jako součinitel příčné deformace:

$$q = \frac{k_t}{k_l} \quad (14)$$

, kde q - součinitel příčné citlivosti
 k_t - deformační součinitel v příčném směru
 k_l - deformační součinitel v aktivním směru

K potlačení vlivu příčné deformace se nejčastěji používá zesílení na konci jednotlivých smyček v měřicí mřížce a co možná nejužší konstrukce mřížky. Příčná deformace se tak projeví v těchto zesílených částech a není tolik ovlivněna celá aktivní mřížka.

Druhým vlivem ovlivňující příčnou deformaci je zúžení materiálu v místě deformace. Toto zúžení ovlivňuje pochopitelně i přípevněný tenzometr, a to zápornou změnou hodnoty odporu pro kladnou deformaci.

Tenzometry běžně mívají příčnou deformaci menší než 0,008 – tedy menší než 0,1 %, přesto je nutné s tímto vlivem počítat.

Měřicí mřížka

Tenzometry se vyrábějí s různou délkou měřicí mřížky v závislosti na požadovaných parametrech tenzometru a na homogenitě pole napětí v místě měření.

Délka měřicí mřížky neovlivňuje citlivost tenzometru, ta je závislá na relativním prodloužení tenzometru, nikoliv na absolutním prodloužení tenzometru. Pro zvýšení citlivosti tenzometru tedy nepomůže prodloužení tenzometru, Není však vhodné používat zbytečně malé tenzometry, pokud to není nezbytně nutné – například pro vyšetřování pole napětí vrubu.

Pro volbu délky měřicí mřížky má zásadní vliv homogenita pole napětí.

Homogenní pole napětí

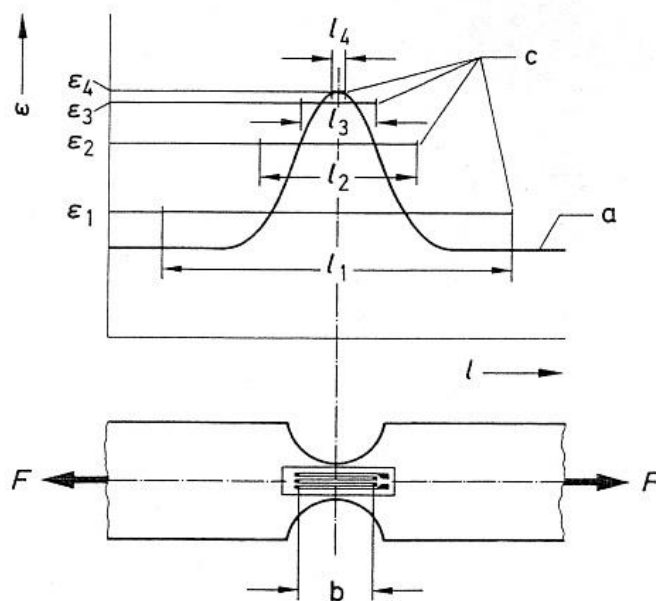
Pro homogenní pole napětí je rozhodujícím vlivem pro délku měřicí mřížky volné místo na měření objektu. Pro větší objekty se doporučuje použít tenzometry v s měřicí mřížkou v řádech jednotek milimetru. Při volbě větších tenzometrů je vhodné brát v potaz zhoršenou manipulaci při nalepování tenzometrů.

Nehomogenní pole napětí

Tenzometry měří střední hodnotu deformace pod měřicí základnou – fungují tedy na integračním principu. S rostoucí délkou měřicí základny roste i zkoumaná plocha. Ve výsledku plynou dva možné případy vyhodnocení zkoumané plochy.

Pokud chceme měřit úmyslně střední hodnotu deformace ve větší zkoumané ploše, například z důvodu velké nehomogenity či zrnitosti materiálu či různě tvarovaného povrchu, volíme větší délku měřicí mřížky ke zprůměrování střední hodnoty deformace, která je pro danou aplikaci více směrodatná. Tohoto měření se například velmi často využívá ve stavebnictví, kde je většina materiálu nehomogenní.

Naopak pokud chceme měřit lokální deformace, například špičky napětí vrubu, volíme co nejmenší možnou základnu pro změření co nejužší oblasti okolo maximálního napětí. Nejmenší možná délka měřicí základny je dána technickými možnostmi výroby, obvykle v rozmezí desetin milimetrů. Na následujícím obrázku (Obr. 12) je vidět, co se odehrává v okolí vrubu sledovaného tělesa včetně lokálních hodnot deformace:

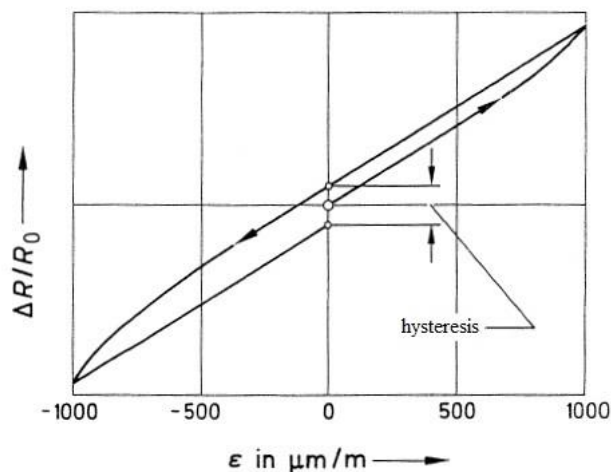


Obr. 12.: Rozložení deformací u vrubové součástky pod zatížením [3]

- a velikost napětí podél centrální osy pod zatížením
- b aktivní délka měřicí mřížky l_1, l_2, \dots, l_i
- c velikost deformace k příslušné délce měřicí mřížky

Mechanická hystereze

Hysterezi u tenzometrů vnímáme jako rozdíl naměřených hodnot změny odporu při cyklické změně deformace pro danou hodnotu deformace neboli že pro danou deformaci v průběhu zatěžování nemáme stejnou hodnotu změny odporu. Ve výsledku lze mechanickou hysterezi chápat jako zbytkové napětí, kdy po vymizení vnějších zatížení zůstává nenulová hodnota změny odporu (Obr. 13). Hodnota hystereze se postupně snižuje s přibývajícím počtem cyklu zatížení až se ustálí na konstantní hodnotě, obvykle do 0,5 %.



Obr. 13.: Mechanická hystereze [3]

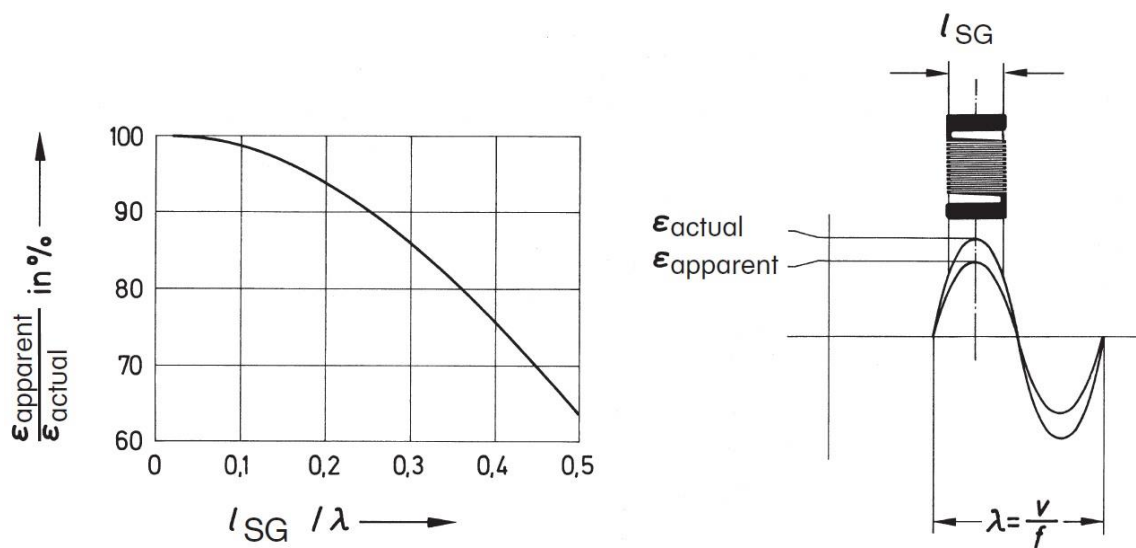
Hodnota hystereze závisí na zvoleném typu tenzometru, podložce, základním materiálu, druhem lepidla ale i precizností nalepení tenzometru.

Relaxace

Projevuje se na dlouhodobě zatížené součástce. Poměrná deformace měřená tenzometrem se v čase mění i při konstantní deformaci zkoumaného objektu. Tento jev lze označit jako „prokluz“ tenzometru na objektu a v konečném součtu dochází ke zkreslení naměřené deformace. Řádově se pohybuje v jednotkách procent při dlouhodobé zátěži a s narůstajícím časem pochopitelně roste. Pro správné měření je po určité době nutné odstranit tenzometry a nalepit tenzometry znovu.

Mezní frekvence

V případě rychlého dynamického zatížení může dojít, že poměr vzniklé podélné vlny v materiálu při zatížení je velký vzhledem k aktivní délce tenzometru a tenzometr tak díky své integrační schopnosti zprůměruje vzniklé špičky přetvoření a udá nám pouze střední hodnotu deformace. Proto pro rychlé dynamické děje či měření rázů je zapotřebí použít tenzometry s malou měřicí mřížkou. V případě nesprávné volby tenzometru nenaměříme špičkové hodnoty a dojde ke zkreslení výsledků (Obr. 14).



Obr. 14.: Závislost snížené citlivosti vlivem krátké délky měřicí mřížky [3]

Creep

Neboli vliv tečení, který se projevuje při dlouhodobém zatížení materiálu. V případě konstantního zatížení totiž dojde k poklesu měřené veličiny, kdy v místě připevněného tenzometru dojde k trvalému přetvoření vrstvy materiálu. Vliv creepu se více projevuje u tenzometrů s menší aktivní délkou mřížky. Velikost creepu je ovlivněna i volbou lepidla.

Existují dva způsoby, jak potlačit tento efekt. Jedním z nich je volba takového tenzometru, který je konstrukčně navržen, aby se u něho creep nevyskytoval anebo se zvolil takový tenzometr, který má přesně opačný creep a účinky se tak vyruší – takový efekt je však v praxi velmi obtížně dosažitelný.

Napájecí napětí

Je dána vždy výrobcem maximální hodnota pro konkrétní typ tenzometru. Podle Ohmova zákona je proud protékající tenzometrem přímo úměrný velikosti napětí. Mohlo by se zdát, že je vhodné použít vždy maximálních hodnot napájení, avšak při vysokém napětí může u takto malého průřezu vodiče dojít k vysoké proudové zátěži a přehřátí. To může vést ke zničení tenzometru či k naměření zcela zkreslených hodnot.

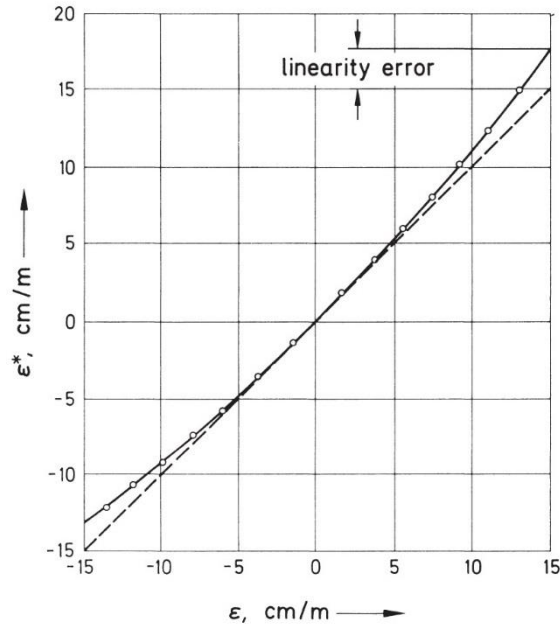
Napájecí napětí je také nutno přizpůsobit okolní teplotě – při větší okolní teplotě je nutné teplotu snížit či použít pulsní napájení tenzometru. Při navrhování je též vhodné vzít v potaz budoucí použití ochranných tmelů či laků, které ztěžují chlazení tenzometrů.

Mezní podmínky pro statickou deformaci

Hodnota mezní deformace pro daný tenzometr je udávána výrobcem, běžně však tato hodnota dosahuje hodnot $\varepsilon = \pm 3000 \mu\text{m/m}$, vždy však záleží na typu zvoleného tenzometru. Některé tenzometry jsou schopny měřit i deformace do 20 cm/m.

Při vyšších deformacích se měřící mřížka dostává do oblasti plastické deformace a ztrácí své původní vlastnosti. Tenzometr ztrácí svou vlastnost opakovatelnosti a začíná se výrazněji projevovat nelinearita tenzometru a měřícího Wheatstonova mostu.

Právě nelinearita je největším problémem. Zatímco nelinearita Wheatstonova mostu je relativně dobře zdokumentována a problém lze matematicky vhodně korigovat, nelinearitu tenzometru lze zatím velmi špatně obecně matematicky korigovat. Některé korekce jsou známy jen pro konkrétní měření – dané zatížení, konkrétní tenzometr a příslušný materiál zkoumaného objektu.



Obr. 15.: Odchylka měřené deformace k teoreticky lineární měřené deformaci [3]

3.3 VLIV PROVOZNÍCH PODMÍNEK

Teplota

Při změně teploty dochází k délkové dilataci všech materiálů, v našem případě tedy k dilataci zkoušeného objektu a dilataci měřicí mřížky tenzometru. Rovněž změna teploty ovlivňuje odporové parametry mřížky tenzometru. Součtem těchto faktorů se též říká zdánlivá deformace a ovlivňují měření stejně jako vnější zatížení, které způsobuje deformaci, ačkoliv žádné nepůsobí. Pro přesné měření během změn teploty je zapotřebí tuto závislost popsat matematickým vzorcem a popisují je následující součinitele:

- α_C - teplotní součinitel délkové roztažnosti zkoušeného materiálu
- α_M - teplotní součinitel délkové roztažnosti materiálu mřížky
- α_R - teplotní součinitel elektrického odporu materiálu mřížky
- ε_{ZT} - zdánlivá deformace vyvolaná změnou ΔT

a změnu teploty jako proměnnou:

ΔT - změna teploty

Teplotní odezva tenzometru na rozdíl teplot lze vyjádřit jako:

$$\frac{\Delta R}{R} = k (\alpha_C - \alpha_M) \cdot \Delta T + \alpha_R \cdot \Delta T = k \cdot \varepsilon_{ZT} \quad (15)$$

a následně vyjádřit zdánlivou deformaci vztahem:

$$\varepsilon_{ZT} = \left[(\alpha_C - \alpha_M) + \frac{\alpha_R}{k} \right] \cdot \Delta T \quad (16)$$

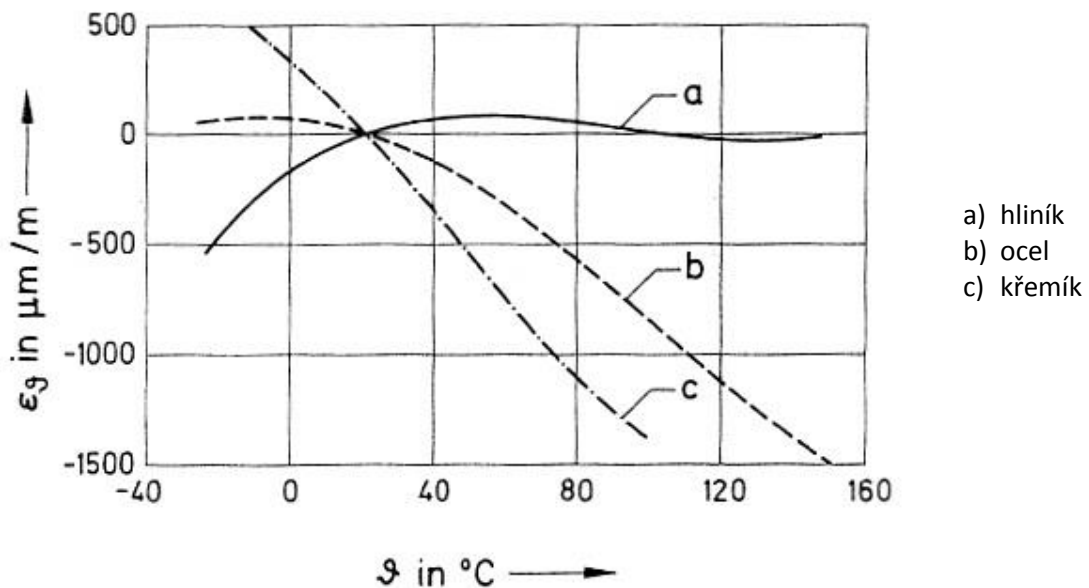
Jelikož jsou dané součinitele konstanty a daná složka zdánlivé deformace je funkcí pouze změny teploty, lze tento vztah zjednodušit díky pomocného teplotního součinitele měřeného místa:

$$\alpha_M = (\alpha_C - \alpha_M) + \frac{\alpha_R}{k} \quad (17)$$

na zjednodušený vzorec:

$$\varepsilon_{ZT} = \alpha_M \cdot \Delta T \quad (18)$$

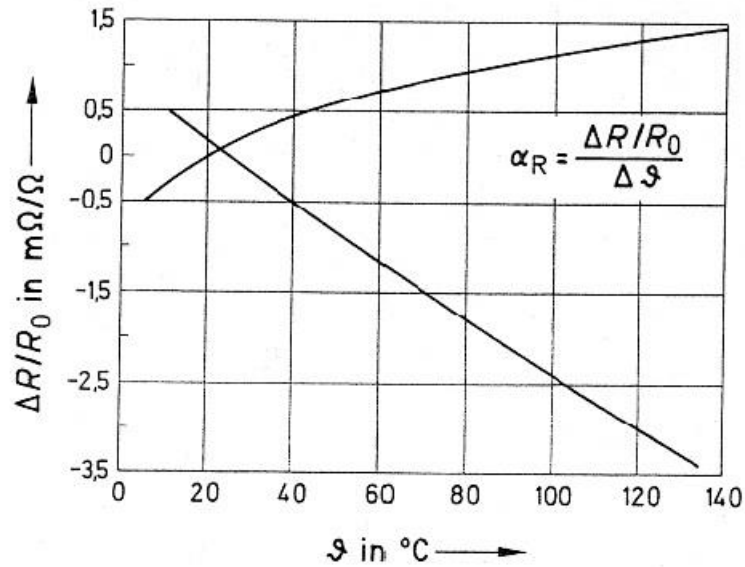
Tuto zdánlivou deformaci je při větších změnách teploty nutno kompenzovat, jinak bychom dostali zkreslené hodnoty měření deformace. Na Obr. 16 je vidět změna zdánlivé deformace se změnou teploty na různých materiálech zkoumaného tělesa.



Obr. 16.: Příklady zdánlivé deformace pro různé materiály [3]

Teplotně samokompensované tenzometry

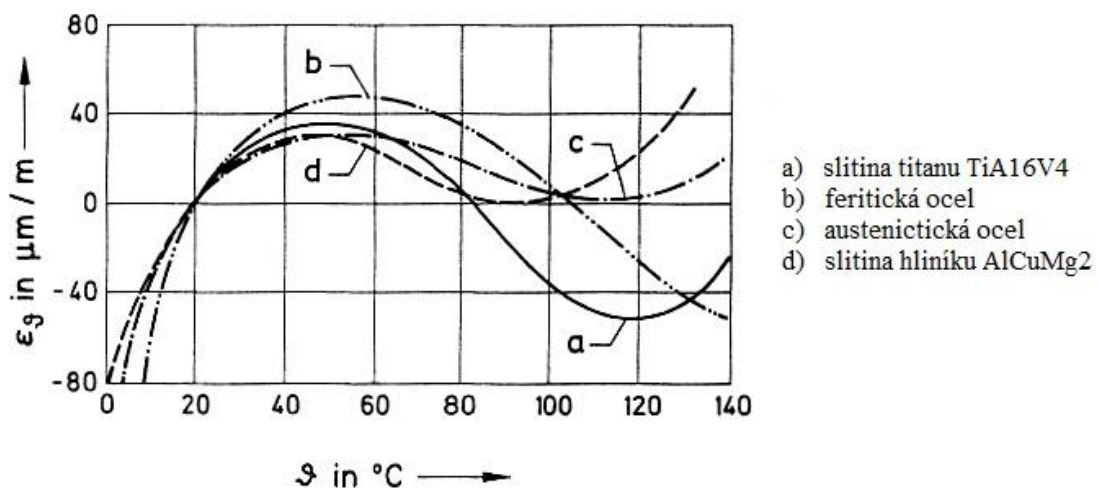
Existují různé způsoby výroby tenzometrů k minimalizaci zdánlivé deformace pro určitý teplotní rozsah změn. Nejlogičtější způsobem je změna teplotního součinitele elektrického odporu materiálu mřížky – materiál, příměsi, způsob výroby, konstrukce apod... Konkrétní změny a technologie jsou však know-how každé firmy. Způsob, jakým lze ovlivňovat tento součinitel je uveden na Obr. 17



Obr. 17.: Závislost elektrického odporu mřížky na teplotě [3]

Snahou je dosáhnout α_R takové hodnoty, aby byla splněna podmínka:

$$\alpha_R = (\alpha_M - \alpha_C) \cdot k \quad (19)$$



Obr. 18.: Závislost zdánlivé deformace na teplotě pro různé materiály [3]

Hodnoty součinitelů však nejsou lineární, na Obr. 18 je vidět teplotní závislost zdánlivé deformace určitého druhu tenzometru vzhledem ke konkrétnímu zkoumanému materiálu. Jelikož závislost není lineární, není vůbec jednoduché teplotní samokompensací vliv teploty eliminovat.

Kvalitní výrobci tenzometrů přikládají tento graf či matematický vzorec k jednotlivým typům tenzometru. Závislost však platí pouze pro konkrétní materiál vzorku zkoušeného

objektu, hodnota se může lišit pro na první pohled stejný materiál, který má však mírně odlišné materiálové složení.

Teplotní drift

„Teplotní drift je vyvolán především mikrostrukturálními změnami a oxidací nebo korozi měřící mřížky. Další možnou příčinou může být také například relaxace napětí k níž dochází v měřící mřížce nebo v lepidle v důsledku jejich ovlivnění teplotními změnami. Tyto procesy jsou závislé na teplotě a na čase. Teplotní drift je nevratnou změnou, znemožňuje dosažení původního výchozího nulového bodu.

Významnými činiteli ovlivňujícími teplotní drift jsou jednak složení materiálu mřížky, jednak její tepelné a mechanické zpracování. Je známo, že za studena tažené nebo válcované materiály mřížky vykazují výraznější drift, který je zjevný již při poměrně nízkých teplotách okolo 100°C. Vedle toho popuštěné slitiny mají drift mnohem menší. Vliv má též historie mechanického zpracování mřížky tenzometru.

Rovněž nesprávná manipulace s tenzometrem během aplikace může drift výrazně zvětšit. Svým dílem přispívá též použité lepidlo: stejné typy tenzometrů mohou vykazovat různý drift v závislosti na použitém lepidle (např. za studena nebo za tepla tvrditelném).

Chyby způsobené teplotním driftem mohou být při měření vyloučeny vhodným můstkovým zapojením tenzometrů – do plného nebo polovičního můstku; při použití kompenzačních tenzometrů pak i využitím čtvrtinového nebo dvoučtvrtinového můstku.“ dle [6]

Vlhkost

Vlhkost prostředí může mít zásadní a negativní dopad na průběh celého měření, ať už v průběhu měření či při samotné instalaci tenzometru na měřící místo. Vlhkost může ovlivňovat přímo parametry tenzometru jako je deformační citlivost tenzometru či nepředvídatelný posuv nulového bodu, vnikat do materiálu podložky či lepidla a díky zvýšenému obsahu vody měnit fyzikální vlastnosti, jako je třeba odpor přívodních kabelů, snížení odporu mezi tenzometrem a měřeným místem, způsobení korozi mřížky a v krajním případě může dokonce dojít k odlepení dříve správně přilepeného tenzometru.

Pro správné měření je zapotřebí použití vhodných krycích prostředků a dodržet správné podmínky aplikace dané výrobcem či zvážit další krycí a ochranné prostředky, které zabrání vlivu okolní vlhkosti na použitou měřící aparaturu.

Vliv křivosti materiálu

Tenzometry je možné použít i pro měření křivých ploch. Mezní hodnoty křivosti jsou dány výrobcem a příslušným druhem tenzometru. Například tenzometry určené pro měření krouťacího momentu, který je často měřen na válcových plochách, mají vyšší přípustné hodnoty než tenzometry určené pro měření tahové či tlakové deformace.

Hydrostatický tlak

Běžné tenzometry jsou schopny odolávat vysokým nebo naopak velmi nízkým hodnotám hydrostatického tlaku, běžné od vakua až po hodnoty 1000 MPa. Hydrostatický tlak však může mít vliv na použité lepidlo. Vrstva lepidla nesmí obsahovat rozpouštědla, která tvoří plynné substance při vytvrzování, nesmí obsahovat bublinky vlivem špatné instalace a vrstva lepidla by měla být co nejvíce stejnoměrná.

Vliv radioaktivního záření

Působení radioaktivního či neutronového záření může negativně ovlivnit organické podložky tenzometrů či podložek. Též byly pozorovány odporové změny měřících mřížek v blízkosti záření. Pro místa ovlivněna zářením je nutné použití speciálních tenzometrů a lepidel.

Magnetické pole

Přítomnost magnetického pole v oblasti měřícího tenzometru může výrazněji ovlivňovat měření těmito jevy:

- Magnetostrikce zkoušeného tělesa
- Magnetostrikce materiálu měřící mřížky příslušného tenzometru
- Magnetorezistivita materiálu měřící mřížky příslušného tenzometru
- Vznik elektrického napětí v tenzometru v důsledku proměnného magnetického pole

Magnetostrikce je fyzikální jev, kdy feromagnetický materiál mění svoje rozměry při působení magnetického pole – přítomnost zdánlivé deformace. Dnešní tenzometry jsou na přítomnost magnetického pole málo citlivé, neboť materiál měřící mřížky je často ze slitin mědi či niklu (například konstantan). V případě ovlivnění je zapotřebí změnit zvolený tenzometr nebo zaručit stínění na oblast tenzometru a přívodní kabeláže.

3.4 ROZDĚLENÍ ODPOROVÝCH TENZOMETRŮ

Odporové tenzometry lze rozdělit podle použitého materiálu na kovové a polovodičové tenzometry. Kovové tenzometry jsou starším druhem tenzometrů. Důvodem je dřívější znalost zákonitostí, jednodušší matematický popis závislosti a lineární chování kovových materiálů na rozdíl od polovodičů.

3.4.1 KOVOVÉ ODPOROVÉ TENZOMETRY

U kovových odporových tenzometrů je mřížka tvořena kovovým materiálem. V závislosti na požadovaných vlastnostech odporového tenzometru a materiálu povrchu se vyrábějí měřící mřížky tenzometrů z různých materiálů, nejčastěji však z konstantanu, platiny, niklu a slitin z mědi. Kovové tenzometry lze dále dělit podle provedení mřížky na drátkové, foliové a vrstevové, dále pak z pohledu konstrukce na nelepivé (příložené) a lepené.

Příložné tenzometry

Jsou snímače, které nejsou přilepené na povrch zkoumaného objektu, ale jsou uchyceny mezi držáky. Při zatížení dochází k jejich deformaci, a tudíž ke změně měrného elektrického odporu. Výhodou těchto tenzometrů je nízká hystereze, odstranění problému přenesení deformace a vysoké pracovní teploty, nevýhodou je jejich komplikovaná mechanická realizace, dlouhá doba ustálené teplotní rovnováhy a také relativně vysoká pořizovací cena oproti lepeným tenzometrům.

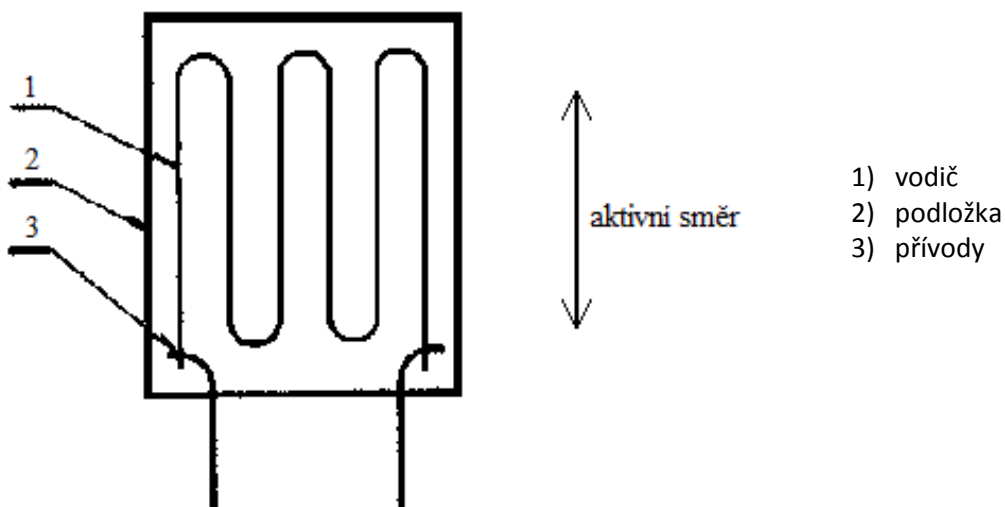
Lepené tenzometry

Jsou snímače, které jsou lepené na povrch zkoumaného objektu pomocí lepidla, které vytváří kvalitní spoj mezi tenzometrem a zkoumaným tělesem. Tenzometry jsou připevněny na povrch přes podložku či nosič, který je pevně spojen s měřicí mřížkou. Špatně přilepený tenzometr může velmi negativně ovlivnit výsledek měření nebo dokonce tenzometr nebude snímat žádnou deformaci.

Drátkové tenzometry

Jsou jedny z nejstarších typů tenzometrů. Na povrch objektu je pomocí lepidla přilepena mřížka tvořená z drátků, které mohou být s podložkou či bez ní. Drátek má nejčastěji tvar mnohanásobné vlásenky. Právě tvar a průměr drátku udává parametry tenzometru. Konce drátku jsou připevněny na silnější vývody pro snadnější a kvalitnější napojení do měřicího obvodu.

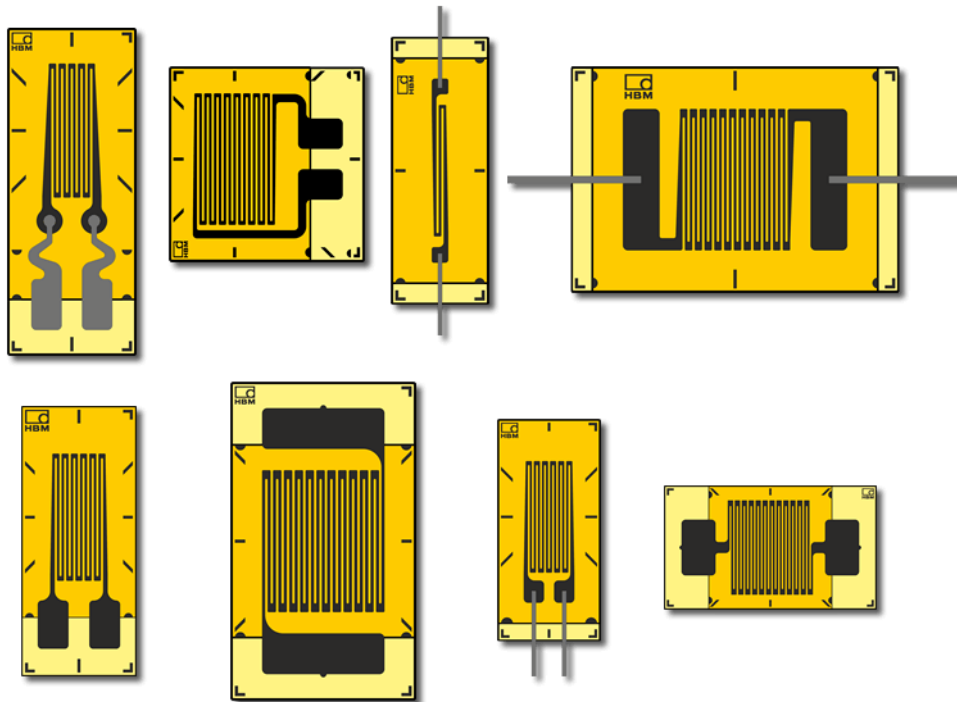
Drátkové tenzometry se vyznačují malým rozptylem elektrického odporu, malým rozptylem K-faktoru a malý rozptyl teplotních součinitelů. Pořizovací náklady nejsou vysoké, poskytují široký sortiment včetně příslušných lepidel pro různé aplikace a různé materiály. Nevýhodou drátkových tenzometrů je omezená hodnota elektrického odporu (dáno rozměry mřížky a průměrem drátku), malá hodnota K-faktoru a při zvýšených teplotách ovlivnění tečením.



Obr. 19.: Schéma drátkového tenzometru [6]

Fóliové tenzometry

Jsou nejrozšířenějším typem kovových tenzometrů v současné době. Měřicí mřížka je nejčastěji vyrobena leptáním z konstantanu a nosič z polyamidu, na které je připevněna folie s mřížkou. U fóliových tenzometrů lze teoreticky vytvořit jakýkoliv tvar měřicí mřížky, tedy i libovolný odpor a tvar tenzometru, nejčastěji však v typických výrobních řadách nominálního odporu. Mezi nejzásadnější výhody oproti drátkovým tenzometrům je lepší přenos tepla a deformace mezi základním materiálem a nosičem, dobrá připevnitelnost, vyšší citlivost a životnost.



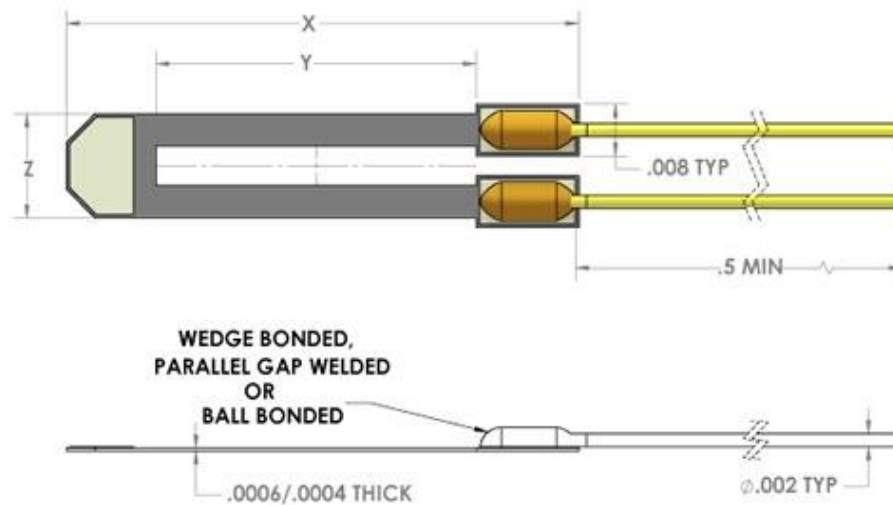
Obr. 20.: Fóliové tenzometry firmy HBM [8]

Vrstvové tenzometry

Jsou určeny převážně pro speciální aplikace, nejčastěji pro měření tlaku. Tenzometry jsou nanášeny ve vrstvě přímo na zadní stranu membrány. Na pružinový materiál se postupně nanáší vrstva dielektrika, kovová vrstva a fotocitlivá maska, díky níž se vytvoří požadovaný obrazec snímače.

3.4.2 POLOVODIČOVÉ TENZOMETRY

Jsou tenzometry využívající piezoelektrického jevu materiálu, mezi které patří například křemík nebo germanium. První polovodičové tenzometry byly vyrobeny na konci 60. letech 20. století v Americe. Jelikož tehdejší Československo bylo pod dovozním embargem, byly polovodičové tenzometry nedostatkovým zbožím až do 80. let, kdy se začali vyrábět i u nás.



Obr. 21.: Polovodičové tenzometry firmy HBM [8]

Ačkoliv jsou polovodičové tenzometry technicky vyspělejší a přináší řadu výhod, nejsou tak rozšířené jako kovové. Důvodem jsou některé negativní vlastnosti vyplývající z materiálových vlastností polovodičů. Výhody a nevýhody v porovnání s kovovými jsou vypsány níže:

Výhody

- Vyšší součinitel citlivosti – až 100x
- Lepší únavová životnost
- Lepší teplotní stabilita
- Menší rozměry
- Vyšší jmenovité odpory

Nevýhody

- Nelineární změna měrného odporu
- Vysoká křehkost
- Složitě měření víceosé napjatosti
- Nejednotný K-faktor
- Komplikovanější instalace

3.4.3 DRUHY A TYPY ODPOROVÝCH TENZOMETRŮ

V dnešní době již existuje vysoká rozmanitost odporových tenzometrů, co se do typů, rozměrů a oblastí použití týče. Pro výběr konkrétního tenzometru je vždy vhodné se řídit pokyny výrobce, který doporučuje pro danou aplikaci daný typ tenzometru na základě požadovaných podmínek. Mezi hlavní kritéria pro výběr tenzometru patří:

- Velikost a směr vyšetřované napjatosti tělesa
- Velikost měřeného objektu
- Oblast a homogenita pole napjatosti tělesa
- Materiál měřeného objektu
- Prostředí a okolní podmínky, ve kterých se měřený objekt nachází

Kritéria pokusu nám určují možné použitelné tenzometry, které mají své klíčové parametry jako typ tenzometru pro danou aplikaci, počet a délka měřících mřížek, maximální možná

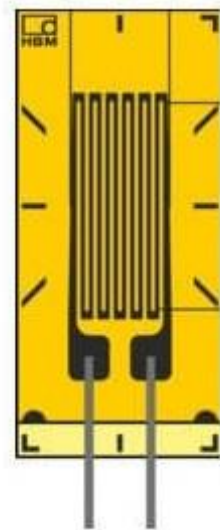
deformace, přípustné napětí, jmenovitý odpor tenzometru, přesnost měření, teplotní rozsah atd... Ačkoliv existuje velká řada výrobců tenzometrů, postupem času se znormalizovaly některé typické parametry tenzometrů používané napříč všemi aplikacemi, jako třeba:

- Typické napájecí napětí: 5V, 10V, 12V, 15V, 20V nebo 23V
- Typický jmenovitý odpor: 120Ω, 240Ω, 300Ω, 350Ω, 600Ω, 700Ω nebo 1000Ω

jistě se však můžeme setkat s dalšími hodnotami.

Jednoosé tenzometry

Jednoosé tenzometry se používají pro měření jednoosé napjatosti. Aktivní mřížka je rovnoběžná s hlavním směrem napětí (Obr. 22). Používají se u jednoduchých aplikací, kde dochází k deformaci v jednom směru a směr této deformace je znám.



Obr. 22.: Foliový tenzometr firmy HBM pro jednoosou napjatost [8]

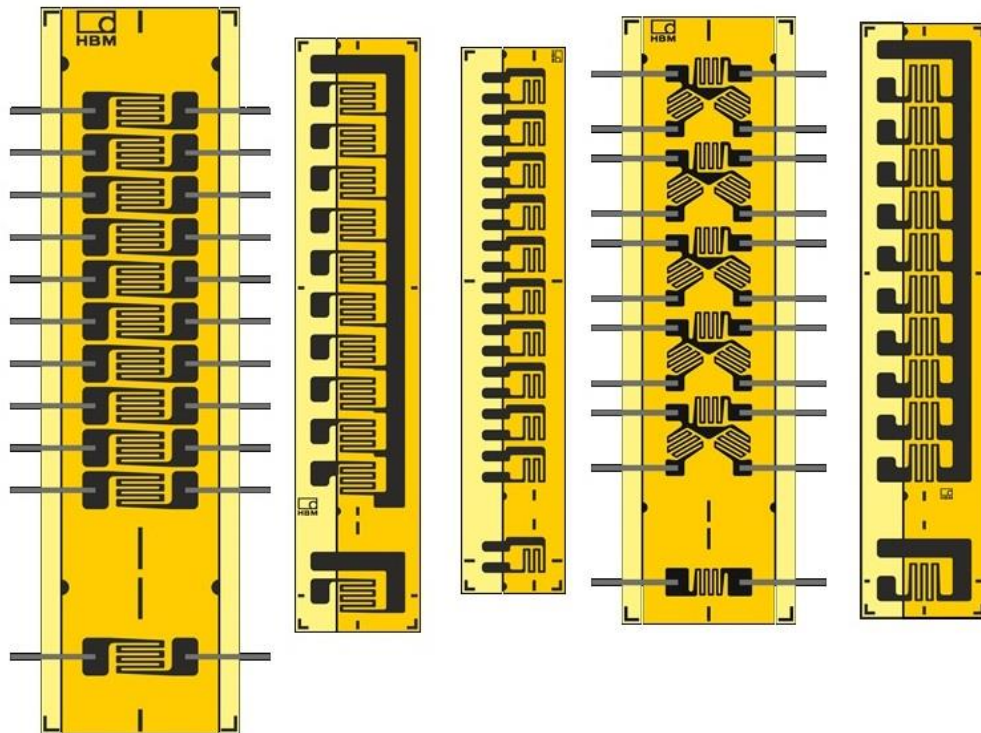
Vícenásobné tenzometry

Vícenásobné tenzometry se skládají z více měřících mřížek na společném nosiči. Orientace, směr a rozteč jednotlivých mřížek je vhodně zvolena pro typické aplikace měření těchto tenzometrů. Mezi nejzásadnější výhody těchto vícenásobných tenzometrů patří možnost rychlá a přesná instalace více měřících mřížek než u skládání jednotlivých mřížek jednotlivě, vyšší přesnost měření než při jednotlivém skládání a ekonomická a časová úspora. Mezi vícenásobné tenzometry patří tenzometrické řetězce, tenzometrické kříže a tenzometrické růžice.

Tenzometrické řetězce

Jedná se o řetězec pravidelně rozmístěných měřících mřížek stejného typu na společném nosiči (Obr. 23). Měřící řetízky se skládají obvykle z počtu okolo 10 a 15 malých měřících mřížek. Tyto řetězce často slouží k měření gradientů napětí či pro nehomogenní pole napětí. Na společném nosiči často bývá též kompenzační mřížka.

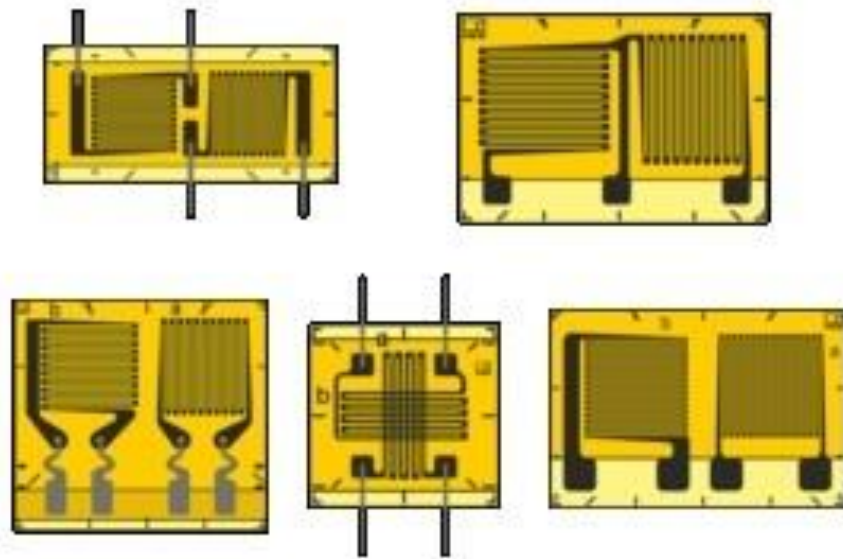
Například firma HBM poskytuje též tenzometrické řetězce s různými nebo se střídajícími se směry měřících mřížek.



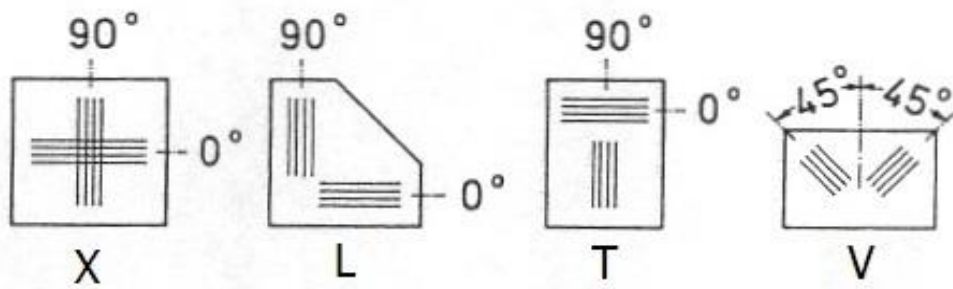
Obr. 23.: Tenzometrický řetězec KY firmy HBM [8]

Tenzometrické kříže

Jedná se o tenzometr s dvěma nezávislými vinutími pootočenými o 90° pro měření stavu dvouosé napjatosti (Obr. 24). Tenzometrické kříže se používají pro aplikace, kdy jsou známy směry hlavním napětí a vyrábí se mnoho druhů a typů, kdy označení vychází z tvaru měřících základů. Mezi tenzometrické kříže patří i tenzometry pro měření krutu/smyku, které mají aktivní mřížky též pootočené o 90° vůči sobě, ale jsou navíc pootočené o 45° vůči ose tenzometru. Na rozdíl od tenzometrických křížů mají navíc pouze 3 vývodní kontakty.



Obr. 24.: Tenzometrické kříže firmy HBM [8]



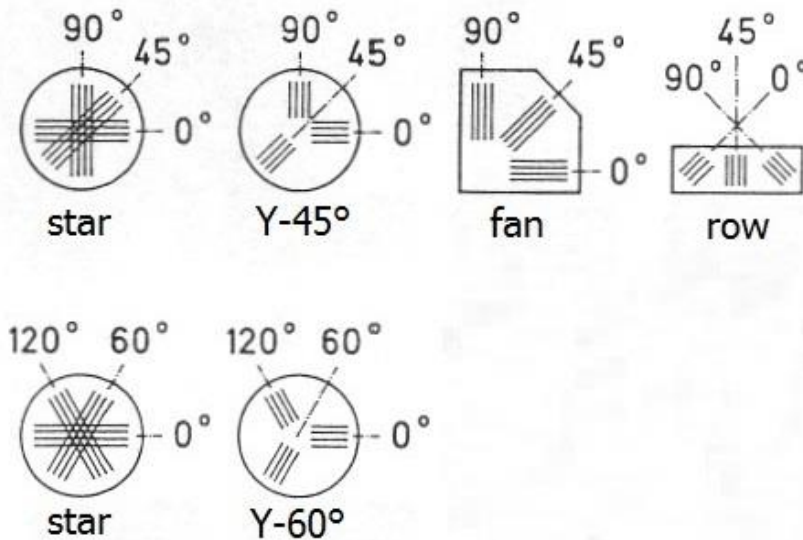
Obr. 25.: Rozložení mřížek u tenzometrických křížů [3]

Zjištění hodnot hlavních napětí z deformací lze určit pomocí Hookeova zákona pro rovinnou napjatost:

$$\sigma_1 = \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_1 - \mu \varepsilon_2) \quad ; \quad \sigma_2 = \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_2 - \mu \varepsilon_1) \quad (20)$$

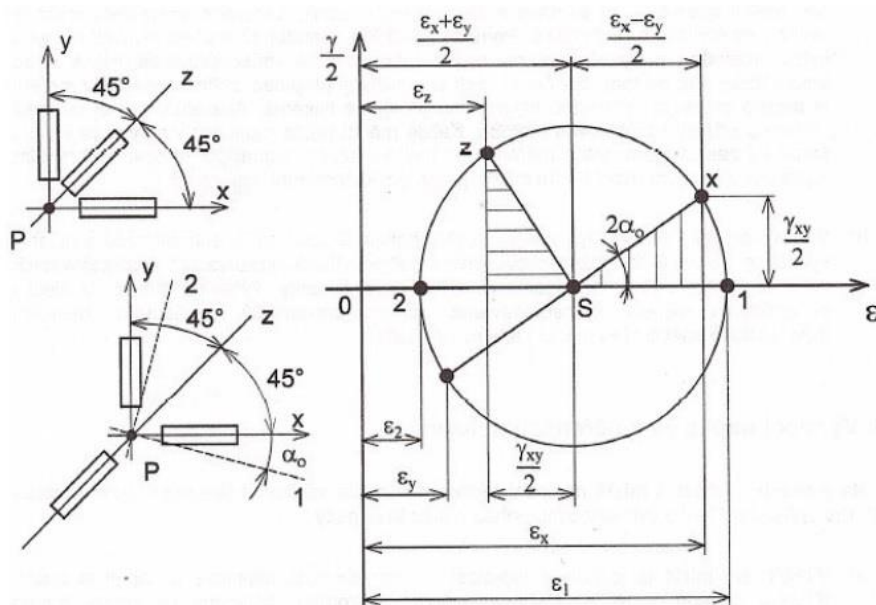
Tenzometrická růžice [11]

Tenzometrické růžice jsou dost podobné tenzometrickým křížům, na rozdíl od nich však mají tři nezávislá vinutí. Používají se u aplikací, kde nejsou známy směry hlavních napětí nebo lze směr predikovat jen částečně. Tenzometrické růžice lze ještě rozdělit do dvou typů v závislosti na pootočení jednotlivých vinutí, a to na pravoúhlé růžice a na delta růžice neboli rovnostranné růžice (Obr. 26).



Obr. 26.: Rozložení mřížek u tenzometrických růžic [3]

Pravoúhlé růžice mají jednotlivá vinutí pootočena o 45° a 90°. Tyto růžice se používají pro aplikace, kde lze směry hlavních napětí alespoň částečně predikovat. Pro deformaci tenzometrických růžic lze použít analogii z Mohrových kružnic souřadnic $\sigma - \tau$ pro plošnou deformaci a transformovat do souřadnic $\varepsilon - \gamma/2$.



Obr. 27.: Pravoúhlá tenzometrická růžice [11]

Pro pravoúhlou růžici (Obr. 27) lze zapsat následující vztahy:

$$\frac{\gamma}{2} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} - \varepsilon_z = \frac{(\varepsilon_x - \varepsilon_z) + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)}{2} \quad (21)$$

pro velikost hlavních poměrných deformací pak platí:

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2} \quad (22)$$

pomocí Hookeova zákona lze rovnici (22) zapsat pro tvar hlavních napětí:

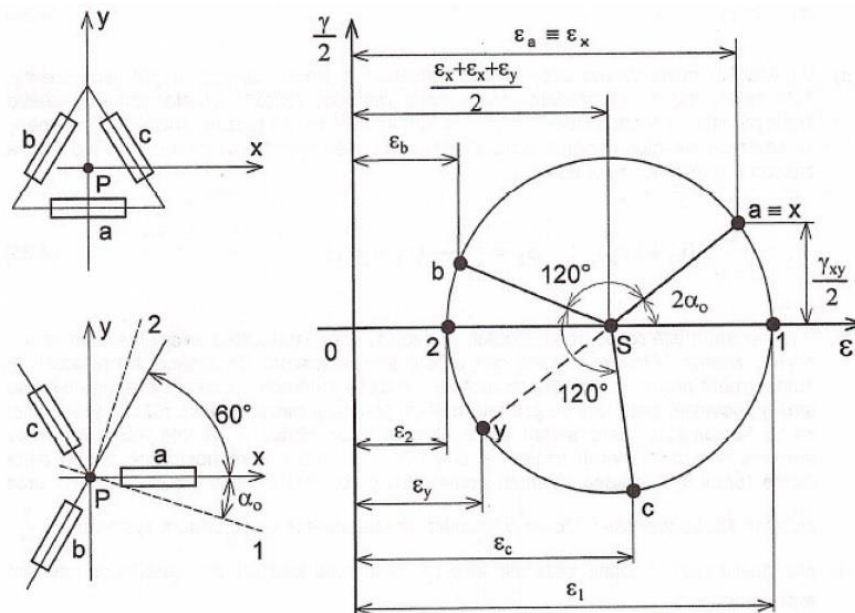
$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{2} \left[\frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{1 - \mu} \pm \frac{\sqrt{2}}{1 + \mu} \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2} \right] \quad (23)$$

pro velikost úhlu α_o mezi osou x a osou hlavního směru napětí platí:

$$\alpha_o = \frac{1}{2} \arctan \frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} = \frac{1}{2} \arctan \frac{(\varepsilon_x - \varepsilon_z) + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} \quad (24)$$

kdy směr úhlu α_o závisí na směru poměrných deformací $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ a ε_z .

Delta (rovnostranné) růžice mají jednotlivé mřížky pootočený o 60° a 120° vůči sobě. Tyto růžice se používají pro aplikace, kde směry hlavních napětí nelze dopředu odhadnout. Stejně jako pro pravouhlé růžice lze pomocí Mohrových kružnic transformovat souřadnice.



Obr. 28.: Rovnostranná tenzometrická růžice [11]

Pro rovnostrannou růžici (Obr. 28) lze zapsat následující vztahy:

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\varphi - \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\varphi \quad (25)$$

velikost zkosu lze vyjádřit jako:

$$\frac{\gamma_{xy}}{2} = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_b}{\sqrt{3}} \quad (26)$$

velikost poměrné deformace pro osu y lze vyjádřit jako:

$$\varepsilon_y = \frac{2(\varepsilon_b + \varepsilon_c) - \varepsilon_a}{3} \quad (27)$$

pomocí rovnic pro rovnostrannou různici lze určit velikost hlavních poměrných deformací jako:

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{3} \pm \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2 + (\varepsilon_a - \varepsilon_c)^2} \quad (28)$$

pomocí Hookeova zákona lze rovnici (28) zapsat pro tvar hlavních napětí:

$$\sigma_{1,2} = \frac{E}{3} \left[\frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{1 - \mu} \pm \frac{\sqrt{2}}{1 + \mu} \sqrt{(\varepsilon_a - \varepsilon_b)^2 + (\varepsilon_b - \varepsilon_c)^2 + (\varepsilon_a - \varepsilon_c)^2} \right] \quad (29)$$

pro velikost úhlu α_0 mezi osou x a osou hlavního směru napětí platí:

$$\alpha_o = \frac{1}{2} \arctan \frac{\gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} = \frac{1}{2} \arctan \frac{\sqrt{3} (\varepsilon_b - \varepsilon_c)}{(\varepsilon_a - \varepsilon_b) + (\varepsilon_a - \varepsilon_c)} \quad (30)$$

kdy pro směr úhlu α_o platí stejné principy jako pro pravoúhlou různici.

Zvláštní skupinou tenzometrických různic je skupina pro měření zbytkového pnutí. K měření zbytkového pnutí v materiálu je možné použití dvou metod, kdy obě pracují s odvrtáváním materiálu měřeného objektu a se stejným typem tenzometrických různic v rozestavení 0° - 45° - 90° . Obě metody fungují na principu přerozdělení pole napjatosti a deformace vyvolané úbytkem materiálu.

Hole drilling method – odvrtání válcové díry ve středu tenzometrické různice

Ring-core method – odvrtání materiálu po obvodu tenzometrické různice prsten. vrtákem

3.5 INSTALACE ODPOROVÝCH TENZOMETRŮ [3,6]

Správná instalace tenzometrů je jednou z klíčových částí celého tenzometrického měření. Při špatné instalaci dostaneme zkreslené hodnoty, popřípadě nemáme hodnoty vůbec žádné. V obou případech je zapotřebí opětovná instalace nových tenzometrů, což výrazně prodlužuje čas měření a zvyšuje finanční náročnost měření. Vždy je zapotřebí dbát pokynů výrobce a pokud je to možné, použít doporučeného příslušenství.

Ke správné instalaci tenzometrů je zapotřebí vhodně připravit podkladovou plochu zkoušeného objektu, správně zvolit typ lepidla, dodržet klimatické podmínky během instalace, nechat dostatečný čas pro vytvrzení lepidla a v neposlední řadě, určitou manuální zručnost a zkušenost s lepením tenzometrů.

3.5.1 PŘÍPRAVA PLOCHY OBJEKTU

Připravená plocha by měla být chemicky a mechanicky očištěna a zbavena nečistot a zdrsňena s doporučenou drsností povrchu. Některé operace z přípravy je možné vynechat, záleží však vždy na stavu zkoušeného objektu, neměli by to však nikdy být finální operace. Je vhodné, aby očištěná plocha byla rozsáhlejší než jen velikost plochy pod tenzometrem, jelikož se k samotným tenzometrům dále lepí pájecí pole a při manipulaci během instalace nedojde k snadnému znečištění od neočištěných ploch.

Hrubé čištění

Je nutné plochu zkoumaného tělesa nejprve zbavit velkých nečistot a vměstků na ploše jako je rez, hluboké rýhy, zbytky laků a barev, zbytků těsnění, lubrikantů a maziv. K odstranění lze použít různé škrabky, špachtle, pilníky, brusné nářadí k mechanickému očištění, dále pak různé louhy, rozpouštědla či univerzální čisticí prostředky k chemickému čištění. Při hrubém mechanickém čištění je zapotřebí dávat pozor, aby nedošlo ke zbytečně velkému poškození ploch. Dostatečně vyčištěný a odmaštěný povrch se projevuje nepřerušným vodním filmem, který povrch vytváří. Místo je vhodné dobře osušit při použití čisticích tekutin.

Vyhlazení

Pokud na povrchu zůstaly rýhy či zářezy z původního stavu materiálu či po hrubém mechanickém čištění, je zapotřebí povrch vyhladit, neboť tyto rýhy se stávají koncentrátoři napětí, které nám zkresluje měření a vede k nesprávným hodnotám. Stejně tak příliš zdrsňený povrch je nutný vyhladit. K vyhlazení je možné použít nářadí přímo od firmy k tomu určené, které lze zakoupit jako sadu, nebo použít vlastní příslušenství jako jsou například různé stěrky s použitím brusné pasty či použití brusných papírů.

Čištění

Ve fázi čištění se zbavujeme zbytku nečistot jako prachu, materiálových zbytků a brusných past. Pro odstranění těchto nečistot je vhodné použít různá organická čistidla. Některé minerální oleje, jako například emulze pro frézování, je vhodné dodatečně odstranit alkalickými čisticími činidly.

Zdrsnění

Zdrsněné povrchu je jednou z finálních fází přípravy povrchu. Pro aplikaci lepidla je zapotřebí specifického povrchu, který je nejen čistý, ale i vhodně zdrsněný. Ačkoliv se předchozí operace mohou zdát zbytečné, kdy hladký povrch opět zdrsnujeme, je nutné vytvořit jemně drsný povrch pro lepší adhezi lepidla. Tohoto kontrolovaného jemně zbrúšeného povrchu lze docílit pouze s předešlými operacemi. Existuje mnoho způsobů metod zdrsnění, vždy je zapotřebí danou metodu vybrat s ohledem na vlastnosti povrchu a možnostem realizace. Součástí této operace bývá ještě vhodné vytvoření různých instalačních značek. Obvykle to bývají vyznačené či vyryté rysky, osy nebo kříže. Tyto značky pomáhají k přesné aplikaci tenzometru co se do polohy a natočení týče.

Zdrsnění pomocí pískování

Pískováním se dosáhne jedním z nejideálnějších zdrsněným povrchem. Čistící médium je v tomto případě stlačený čistý vzduch (bez obsahu vody či olejů) a čistého abrasiva. Typickým abrazivem jsou částičky korundu, které jsou vhodné díky své tvrdosti a ostrými hranami. Pro tvrdší materiály lze použít karbid boru. Velikost zrn abraziva je nutné přizpůsobit tlaku vzduchu, vzdálenosti trysky a tvrdosti materiálu. V Tab. 1 je možné vidět doporučené hodnoty zrnitosti.

Material of specimen	Roughening by sandblasting				Grinding with emery grade
	Air pressure [bar]	Distance [cm]	Carborundum		
			Grain no.	Particle size [μm]	
Hardened steel	4	20	80 ... 100	160 ... 115	80 ... 100
Mild Steel	4	20	100 ... 150	115 ... 75	100 ... 180
Aluminium and alloys	3	25	F 240 ... F 320	45 ... 29	220 ... 360

Tab. 1: Doporučené hodnoty zrnitosti broušících médií pro zdrsnění povrchu [3]

Zdrsnění pomocí broušení

Navzdory výhodám pískování při zdrsnění povrchu je někdy zapotřebí či jedinou možností zdrsnění pomocí broušení – špatný přístup, práce v terénu, čistící plocha je blízko citlivým strojním součástkám, povrchové úpravy okolní oblasti apod... Při broušení se používá smirkového papíru či brusné látky.

Je vhodné povrch brousit krouživými pohyby bez dominantního směru k docílení uceleného povrchu ve všech směrech. Velikost volby zrna je opět vidět v Tab. 1

Zdrsnění pomocí ostatních metod

Někdy dokonce i zdrsnění pomocí broušení může být příliš hrubá metoda, zvláště u více citlivých materiálů či komponent již s finální povrchovou úpravou. Jednou z nejcitlivějších mechanických metod zdrsnění povrchu je použití speciálního gumového pera. Dále lze povrch zdrsnit ještě pomocí mechanických metod jako je například moření či leptání.

Finální čistění

By mělo proběhnout po zdrsnění povrchu pro odstranění zbytků materiálu i těsně před nalepením tenzometrů, pokud dojde k delší prodlevě mezi zdrsněním a nalepením tenzometru, abychom odstranily zbytky možných nově vzniklých vměstků prachu.

Pro finální čistění je vhodné použít čistič k tomu určený a netkanou látku. Látky by neměla být chycena do rukou v důsledku možné kontaminace a tažena po povrchu vždy jen jednou. Plocha je čistá až v případě, kdy se na látce neobjevují stopy nečistot. Na takto připravený se již nesmí sahat ani případná vlákna sfoukávat – vlákna je možné odstranit čistým hedvábným papírem či látkou.

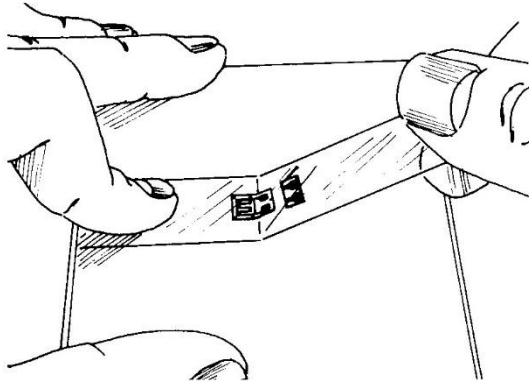
Většina renomovaných firem nabízí kompletní čistící příslušenství, které je vhodné k čistění povrchů pro nabízené tenzometry. V zájmu dobrých výsledků je tyto čistící sety využít.

3.5.2 LEPENÍ TENZOMETRŮ [3,12]

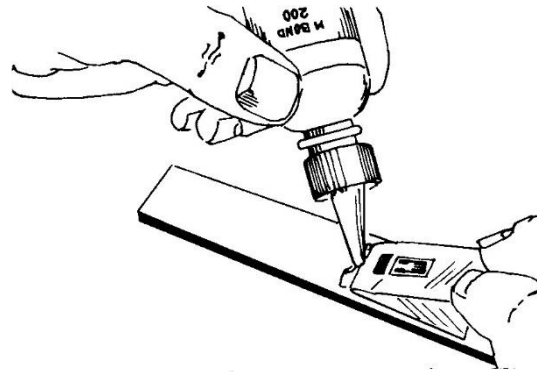
Při instalaci tenzometrů je vždy vhodné dbát rad a pokynů na návodu výrobce. Součástí balení lepidel bývá přiložen tento návod, dodatečně lze tento návod stáhnout na stránkách výrobce. V této kapitole se omezíme na instalaci foliových tenzometrů pomocí lepidel. Existuje více metod lepení tenzometrů, mě osobně se nejvíce líbí doporučovaný postup od firmy Vishay.

Postup lepení

Na vyčištěnou a značkami označenou plochu přiložíme tenzometr tak, jak jej chceme do nalepit. Tenzometr z balení vyndáváme pinzetou, kterou jsme vyčistili. Můžeme zakrytovat pomocí pásky pájecí konektory, aby se během lepení nezničili či nepřilepily. Lepící páskou překryjeme část zkoumaného objektu tak, aby uprostřed byl tenzometr a druhý konec opět zasahoval na zkoumaný objekt (Obr. 29).

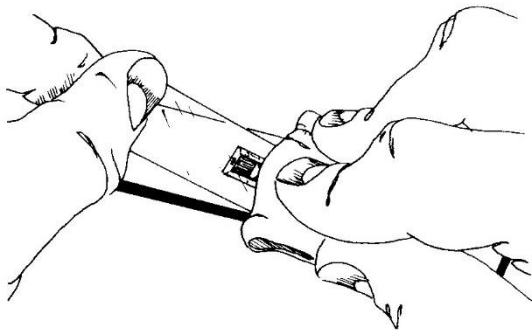


Obr. 29.: Postup instalace dle firmy Vishay

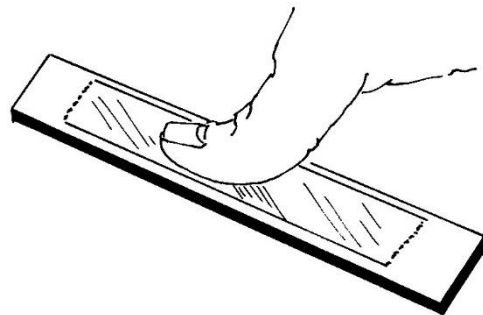


Obr. 30.: Postup instalace dle firmy Vishay

Část pásky i s tenzometrem odlepíme, tenzometr můžeme přelakovat katalyzátorem, pokud ho máme k dispozici, který urychlí tuhnutí lepidla. Přibližně 13 mm (1/2 palce) od instalační oblasti kápneme jednu až dvě kapky lepidla směrem k nalepené části lepicí pásky (Obr. 30), do druhé ruky si vezmeme kousek teflonové folie nebo celofánu a začneme pásku s tenzometrem postupně zpět nalepovat. Již zmíněným kouskem teflonové folie postupným tlakem aplikujeme tenzometr na plochu zkoumaného objektu a palcem vytlačujeme lepidlo pod tenzometrem (Obr. 31).



Obr. 31.: Postup instalace dle firmy Vishay



Obr. 32.: Postup instalace dle firmy Vishay

Kývavým pohybem podpoříme vytlačení lepidla a následně soustavným tlakem držíme palec na tenzometru aspoň minutu, nic méně doba se může lišit v závislosti na druhu lepidla a výrobce (Obr. 32). Tenzometr následně necháme dalších pár minut v klidu a až poté odlepíme pásku. Pásku odlepujeme s co nejvíce možným úhlem od směru lepené plochy. Po odlepení pásky je vhodné nalepený tenzometr vizuálně zkontrolovat a popřípadě jemně zatlačit palcem pro kontrolu adheze. Krom správného nalepení je důležitý i výběr lepidla, který by se vždy měl řídit dle pokynů výrobce. My si zde uvedeme ty nejpoužívanější od firmy HBM.

Lepidlo X60

Jedná se o rychle tuhnoucí dvousložkové lepidlo, kdy jedna složka je prášková pryskyřice a druhá složka tekutina. Lze jej použít na všechny běžně používané kovy i nekovové materiály včetně některých porézních materiálů jako je beton, plastů, skla, porcelánů apod. Teplotní rozsah použití tohoto lepidla je přibližně od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a doba vytvrzování tohoto lepidla při pokojové teplotě jsou přibližně 3 minuty.

Lepidlo Z70

Je jednosložkové rychle tuhnoucí lepidlo na bázi kyanoakrylátů. Toto lepidlo se hodí k nalepení tenzometrů s podložkou na bázi polyamidu a pryskyřic. Lze jej též použít pro běžně používané kovy a některé plasty, nic méně nelze už použít pro porézní materiály či dřevo. Teplotní rozsah lepidla je přibližně od $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$ a vytvrzovací doba přibližně do dvou minut, přičemž některé hodnoty se mohou výrazněji lišit v závislosti na různých aplikacích a typu měření.

3.5.3 OCHRANA TENZOMETRŮ [3,8]

Nainstalované tenzometry musí být chráněny před mechanickými a chemickými vlivy. Zatímco při venkovním použití tenzometrů nebo v prostorách výroby či průmyslových objektech, kde je vysoká koncentrace nečistot ve vzduchu a dochází k velkým změnám teploty a vlhkosti a použití ochranných prostředků je samozřejmostí, je nutné aspoň částečné ochrany tenzometrů i při běžných pokojových či laboratorních podmínkách.

Absolutní ochrana po delší časový horizont je možná pouze pro hermeticky izolovaný prostor. Tento stupeň ochrany nelze dosáhnout žádnými krycími prostředky, dokonce ani těmi nejlepšími, všechny budou poskytovat ochranu jen na omezenou dobu. Doba ochrany bude záviset na druhu zvolené ochrany, množstvím prostředků, a hlavně na okolních podmínkách. Doba takové ochrany může trvat několik hodin i několik let. Postupná degradace bude mít za následek posunutí nulového bodu a změnu velikosti izolačního odporu.

Zatímco před mechanickými vlivy lze tenzometry relativně snadno ochránit, chemické vlivy je daleko těžší eliminovat. Působí totiž značné komplikace nejen pro samotné tenzometry, ale i pro použitá lepidla, kabely nebo způsobovat korozi v okolí měřeného místa. Při použitých ochranných prostředcích nesmí dojít nejen ke změnám mechanických vlastností tenzometru, ale zároveň nesmějí zamezovat deformaci od vnějšího zatížení či od teplotní zdánlivé deformace. Oboje by mělo za následek zkrácení měření.

Při výběru stupně ochrany je vhodné se řídit pokyny výrobce. Nejzásadnější kritéria pro výběr ochranných prostředků jsou:

Okolní podmínky

Chemická a fyzikální agresivita prostředí (pH, teplota, vlhkost apod.) ovlivňující měřené místo. Pro opravdu náročné prostředí, které není možné eliminovat pouze prostředky k tomu určené, je vhodné zvážit přídatné kryty a těsnění, které lze například namontovat mimo měřenou oblast.

Materiál

Materiál zkoumaného tělesa a tenzometru by měli mít velký izolační odpor a zároveň by neměli ochranné přípravky reagovat (koroze, chemická reakce apod.) ani s jedním použitým materiálem. Zároveň je vždy zapotřebí zkontrolovat přilnavost k měřenému objektu.

Délka měření

Tato doba se počítá od instalace až po poslední předpokládané měření. Při určování časového okamžiku je dobré mít jistou časovou rezervu, neboť předpokládaná doba měření se může značně lišit od reálné doby. Podcenění této doby může mít za následek nedokončení měření a částečnou ztrátu naměřených dat, v nejhorším případě nutnost opakování celého tenzometrického měření.

Požadovaná přesnost

S rostoucím stupněm ochrany bude růst i eliminace vnějších vlivů, které by mohly měření ovlivnit. Zároveň však bude docházet k finanční i časové náročnosti měření. Výběr ochranných prostředků je tedy vždy kompromis mezi přesností a finančními náklady.

Kabeláž

Je zapotřebí ochrany i konců kabelů, kde je oholená původní izolace. U více žilových kabelů je zapotřebí odizolovat i vnitřek vnější izolace k eliminaci např. kapilárního jevu.

Ochranných prostředků existuje celá řada, většina z nich je spolu kombinovatelná, pozor však na některé zakázané kombinace krycích prostředků. Mezi nejoblíbenější krycí prostředky lze vypsát pár následujících:

Polyuretanový lak PU 100/120

Jsou laky, které se aplikují přímo v místě měřicí mřížky. Vysušují vzduch v okolí tenzometru a chrání jej před běžnými vlivy jako je prach, pot a sluneční záření. Chrání před běžnými oleji a má dobrou otěruvzdornost. Často se používá jako spodní vrstva před ostatními krycími prostředky.

Nitrilový lak NG 150

Je lak dost podobný PU lakům, aplikuje se též v místě měřicí mřížky a vysušuje okolí vzduchu tenzometru. Používá se hlavně jako ochrana proti olejům a benzínu. Tento lak se nesmí použít s lakem PU 100/120.



Obr. 33.: PU 120 od HBM



Obr. 34.: NG 150 od HBM

Plastický tmel AK 22

Je vysoce přilnavý krycí tmel pro ochranu tenzometrů i příslušenství. Po rozhnětí se snadno aplikuje a v průběhu času netvrdne. Má dobrou ochranu proti vlhkosti a vodě, částečně i proti tlakové vodě, a dokonce i při použití pod vodou.

Lepší ochranu lze zvýšit například pomocí hliníkové folie či tenkého plíšku. Nevýhodou tohoto tmelu je špatná odolnost vůči olejům a rozpouštědlům.

Silikon SG 250

Je krycí prostředek bez rozpouštědel. Je vhodný jako ochrana proti vlhkosti a vodě. Na rozdíl od tmelů má výbornou i mechanickou ochranu. Jeho teplotní stálost se udává od $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $180\text{ }^{\circ}\text{C}$, krátkodobě pak do $250\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obr. 35.: AK 22 od HBM



Obr. 36.: SG 250 od HBM

Vazelíny

Jsou levné a snadno použitelné, nejčastěji jako ochrana proti vodě tak včetně použití pod vodou. Nelze jí však použít jako ochrana proti tekoucí či stříkající vodě.

Dále existuje celá řada obdobných krycích přípravků jako jsou vosky, folie, gummy apod. Nejsnazší je se vždy řídit pokyny výrobce daného tenzometru. Krycí prostředky se velmi často kombinují ke zlepšení ochrany tenzometrů a příslušenství, je však důležité vždy dát pozor na kompatibilitu krycích prostředků.

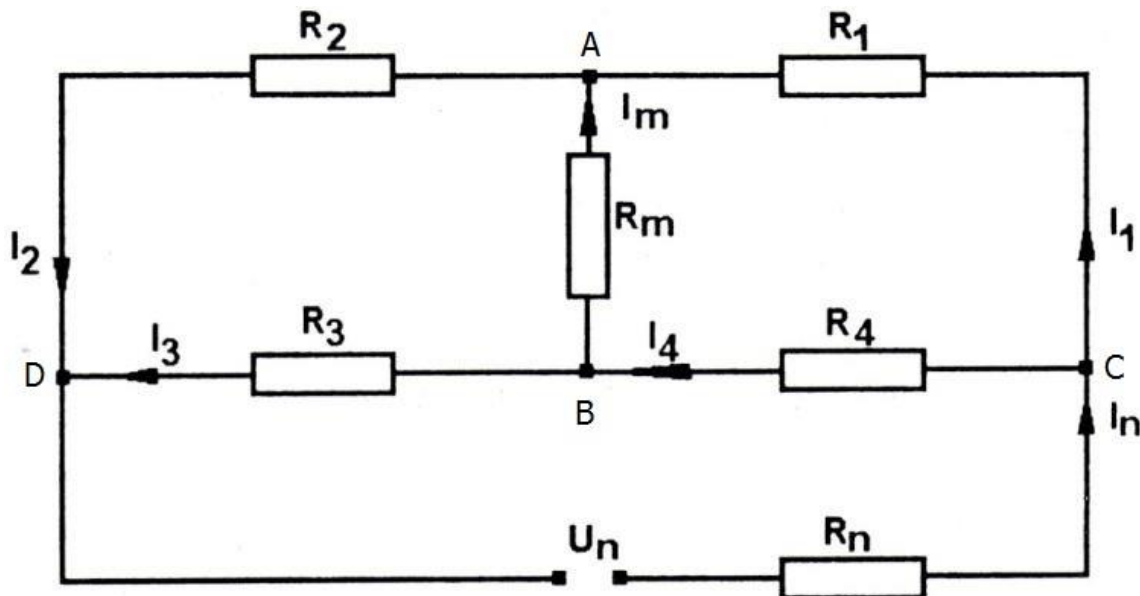
4 PRINCIP TENZOMETRICKÉHO MĚŘENÍ [5,6]

V kapitole [3.1] jsme si vysvětlili základní princip fungování tenzometrů. V reálu je však poměrná změna odporu $\Delta R/R$ špatně měřitelná díky své velikosti, stejně jako velikost deformace. Pro běžné tenzometrické měření se velikost deformace pohybuje v rozmezí

10^{-3} až 10^{-6} [$\mu\text{m}/\text{m}$]. Při použití běžného tenzometru s hodnotou $k = 2$ a $R = 120 \Omega$ je velikost $\Delta R = (2,4 \cdot 10^{-1}$ až $2,4 \cdot 10^{-4}) \Omega$, což je pro praktické měření změna velice malá. Proto pro měření je zapotřebí tohoto jevu zesílit. Toho se využívá v zapojení do tzv. Wheatstonova můstku.

4.1 WHEATSTONŮV MŮSTEK

Pomocí tohoto zapojení převedeme změnu odporu na měření změny velikosti napětí. Využitím Ohmova zákona a Kirchhoffových zákonů jsme schopni tento jev zesílení a převedení matematicky popsat a nadále využívat. Schéma zapojení můstku je na (Obr. 37)



Obr. 37.: Schéma zapojení Wheatstonova můstku [5]

,kde odpory R_1 až R_4 jsou ramena můstku a reprezentují tenzometry či jejich náhrady. Můstek je napájen konstantním napětím U_n mezi body C-D, výstupní napětí mezi body A-B, kde R_M je vnitřní odpor měřícího přístroje kde protéká proud I_M . Podle Ohmova zákon pro vodič s odporem R s rozdílným potenciálem U platí:

$$U = R \cdot I \quad (31)$$

S pomocí prvního a druhého Kirchhoffova zákona pro náš můstek (Obr. 37) lze zapsat:

pro proud

$$I_2 = I_1 + I_m \quad (32)$$

$$I_4 = I_3 + I_m \quad (33)$$

$$I_n = I_2 + I_3 \quad (34)$$

pro napětí

$$I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 - I_3 \cdot R_3 - I_4 \cdot R_4 = 0 \quad (35)$$

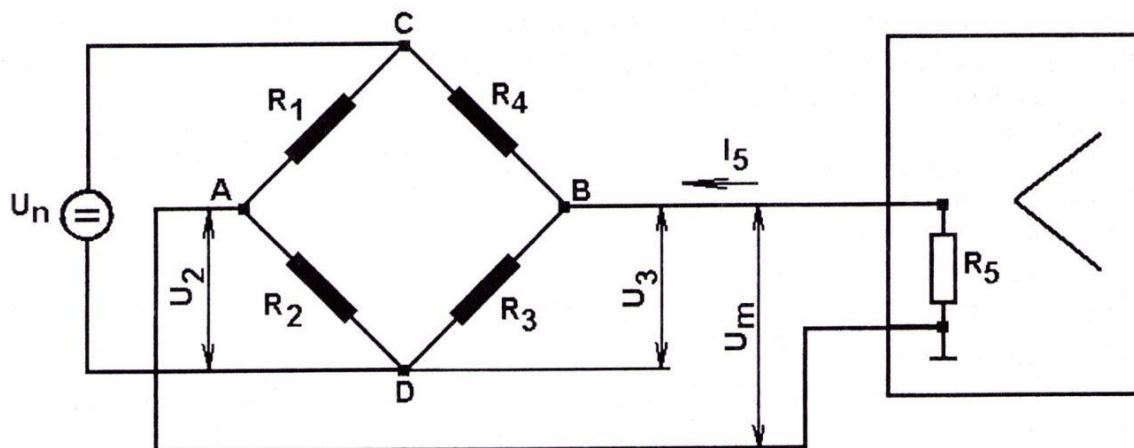
$$I_4 \cdot R_4 + I_m \cdot R_m - I_1 \cdot R_1 = 0 \quad (36)$$

$$I_2 \cdot R_2 + I_m \cdot R_m - I_3 \cdot R_3 = 0 \quad (37)$$

Následnou úpravou a dosazením pro poměr výstupního napětí k vstupnímu napětí lze dostat:

$$\frac{U_m}{U_n} = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (38)$$

Abychom mohli měřit velikost změny odporu snímačů, je zapotřebí tuto veličinu převést na veličinu měřitelnou elektrickými přístroji. K tomu se využívá dvou způsobů, děliče či mostu. My vyjdeme z rovnováhy mostu (Obr. 38):



Obr. 38.: Schéma celého Wheatstonova můstku [5]

Z Obr. 38 je patrné, že budou-li poměry odporů pravého a levého děliče shodné, bude potenciál mezi body A-B a C-D nulový, most tedy bude vyvážen. Již při malé změně jednoho z odporů R_1 až R_4 detekujeme výraznou změnu výstupního napětí, tedy při malé změně poměrného odporu – neboli již při malé deformaci alespoň jednoho tenzometru.

Vezměme si zjednodušený případ, kdy velikost vnitřního odporu měřícího přístroje

$R_5 = \infty \Omega$, a proto lze považovat velikost proudu $I_5 = 0 \text{ A}$. Pro jednotlivé děliče lze dostat vztahy mezi napájecím a měřícím napětím:

$$U_m = U_3 - U_2 \quad (39)$$

$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_n \quad ; \quad U_3 = \frac{R_3}{R_3 + R_4} \cdot U_n \quad (40)$$

Jelikož vnitřní odpor měřících aparatur ve vždy dostatečně veliký, lze tento konkrétní zjednodušený předpoklad brát jako obecně platný. Z těchto rovnic lze zapsat základní rovnici pro výpočet mostových zapojení:

$$U_m = \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \cdot U_n \quad (41)$$

Pokud platí, že most byl před změnou poměrné deformace vyvážen a byly použity 4 stejné tenzometry, lze rovnici (41) upravit pomocí rovnice (38) a (12) na:

$$\frac{\Delta U_m}{U_n} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (42)$$

$$\frac{\Delta U_m}{U_n} = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (43)$$

Pro poměrnou deformaci tenzometrů v příčném směru lze použít vztahu (7). Pro výsledné přetvoření tedy platí:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 \quad (44)$$

Do vztahu (43) lze integrovat vztah (44) a vyjádřit tak celkové přetvoření jako funkcí K-faktoru, napájecího napětí a změně výstupního napětí:

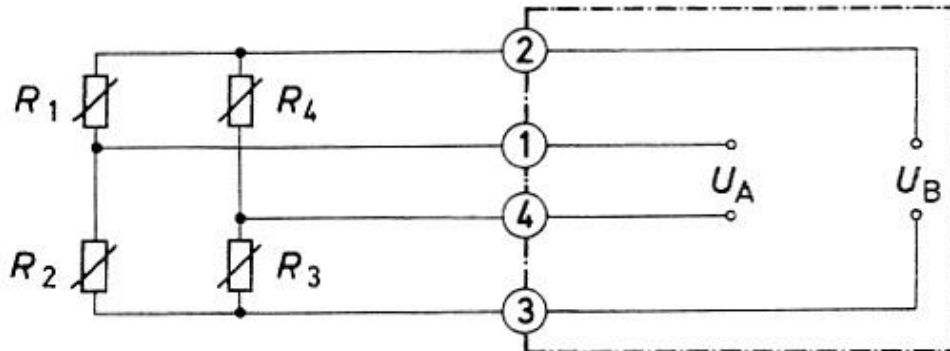
$$\varepsilon_v = \frac{4}{k} \cdot \frac{\Delta U_m}{U_n} \quad (45)$$

Tenzometry lze zapojit do více konfigurací mostu, ať už podle počtu použitých tenzometrů, způsobu napájení či zapojení teplotní kompenzace. Existují čtyři základní konfigurace dle počtu zapojených tenzometrů.

4.1.1 ZAPOJENÍ DO PLNÉHO MOSTU [3]

Je typ zapojení můstku, pro které byly odvozeny předchozí vztahy v kapitole 4.1, tedy kdy všechny větve mostu mají na místech R_1 až R_4 zapojený tenzometry se stejným odporem. Všechny čtyři tenzometry jsou tedy aktivní. Pro toto zapojení je kompenzována teplotní závislost odporu tenzometrů. Zároveň se zde dosahuje nejvyšší citlivosti, naměřené napětí je tedy maximální, proto se toto zapojení se používá pro nejpřesnější měření s velmi dobrou

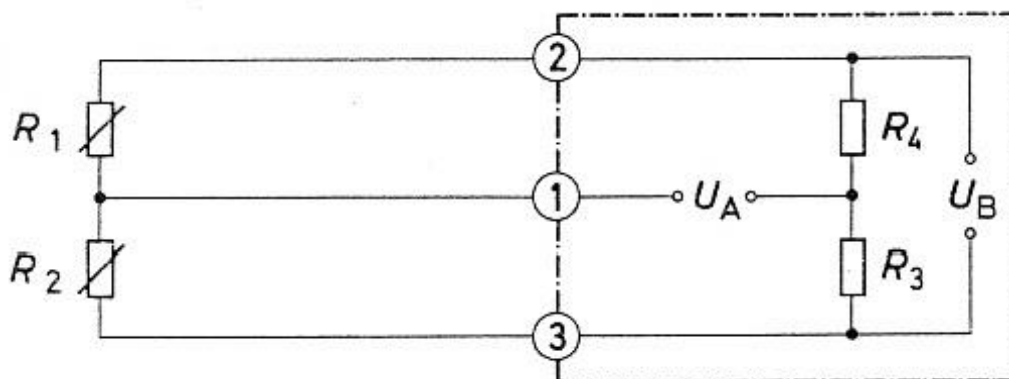
stabilitou v delším časovém horizontu. Toto zapojení však potřebuje všechny čtyři tenzometry.



Obr. 39.: Zapojení plného Wheatstonova můstku [3]

4.1.2 ZAPOJENÍ DO PŮL MOSTU

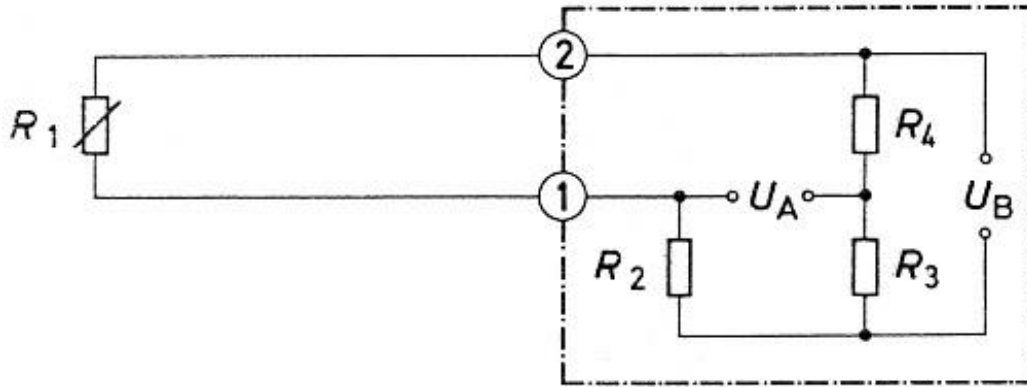
V tomto zapojení jsou aktivní dva tenzometry na diagonále výstupního napětí (Obr. 40). Zbylé dva měřící členy jsou konstantní odpory, nejčastěji jsou tyto náhradní odpory součástí měřící aparatury. Toto zapojení má poloviční citlivost oproti plnému mostu, je však zapotřebí pouze polovičního množství tenzometrů. Nelinearita zapojení lze zajistit stejně velkými deformacemi opačných směrů při použití tenzometrů se stejným odporem. Pokud je zapotřebí, lze jeden z aktivních tenzometrů použít jako teplotně kompenzační, dojde však ke ztrátě nelinearity jako u čtvrt mostového zapojení.



Obr. 40.: Zapojení půl mostu Wheatstonova můstku [3]

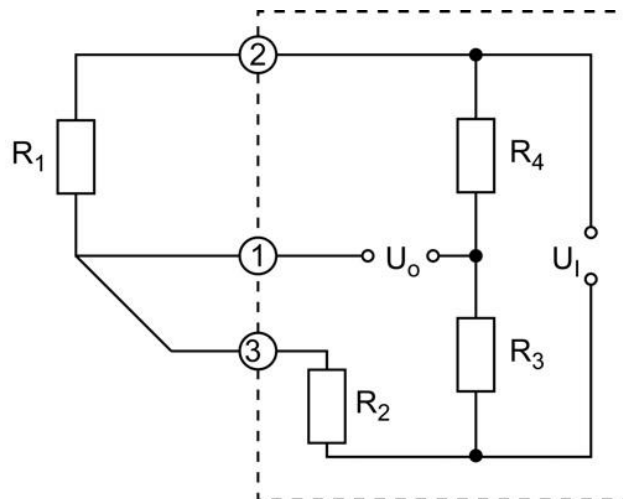
4.1.3 ZAPOJENÍ DO ČTVRT MOSTU

V tomto zapojení je aktivní pouze jeden tenzometr, ve zbytku můstku jsou zapojeny pasivní odbory (Obr. 41). Velikou nevýhodou tohoto zapojení je nelinearita a teplotní nestabilita. I přes tyto nevýhody se čtvrt mostové zapojení využívá díky své jednoduchosti a finanční nenáročnosti.



Obr. 41.: Zapojení čtvrt mostu Wheatstonova můstku [3]

Teplotní nestabilita lze částečně kompenzovat tzv. třívodičovým zapojením, kdy dochází k teplotní kompenzaci teplotní závislosti odporů k přívodům tenzometru pomocí zapojení dalšího vodiče (Obr. 42)



Obr. 42.: Třívodičové zapojení čtvrt mostu Wheatstonova můstku [3]

4.2 POUŽITÍ JEDNOTLIVÝCH KONFIGURACÍ DLE ZATÍŽENÍ [13]

V kapitole (4.1) jsme si ukázali jednotlivé konfigurace Wheatstonova můstku. Kromě těchto konfigurací záleží také na směru deformace, druhu vnějšího zatížení, jenž deformaci způsobil a orientaci tenzometrů vzhledem ke směru deformace. Existuje mnoho kombinací ohledně způsobu měření konkrétní deformace s konkrétní konfigurací Wheatstonova mostu. Velmi užitečný přehled poskytuje Tab. 2, kde jsou vypsané běžně používané kombinace v praxi.

1		$\varepsilon = \varepsilon_n + \varepsilon_b = \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E} - \varepsilon_s$	<table border="1"><tr><th>T</th><th>FN</th><th>Mb</th><th>Md</th></tr><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	T	FN	Mb	Md	1	1	1	0		
T	FN	Mb	Md										
1	1	1	0										
2		$\varepsilon = \varepsilon_n + \varepsilon_b = \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E}$	<table border="1"><tr><th>T</th><th>FN</th><th>Mb</th><th>Md</th></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr></table>	T	FN	Mb	Md	0	1	1	0		
T	FN	Mb	Md										
0	1	1	0										
3		$\varepsilon = \varepsilon_n + \varepsilon_b = \frac{1}{(1+\mu)} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E}$	<table border="1"><tr><th>T</th><th>FN</th><th>Mb</th><th>Md</th></tr><tr><td>0</td><td>1+ν</td><td>1+μ</td><td>0</td></tr></table>	T	FN	Mb	Md	0	1+ν	1+μ	0		
T	FN	Mb	Md										
0	1+ν	1+μ	0										
4		$\varepsilon = \varepsilon_b = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E}$	<table border="1"><tr><th>T</th><th>FN</th><th>Mb</th><th>Md</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>2</td><td>0</td></tr></table>	T	FN	Mb	Md	0	0	2	0		
T	FN	Mb	Md										
0	0	2	0										
5		$\varepsilon = \varepsilon_n = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E} - \varepsilon_s$	<table border="1"><tr><th>T</th><th>FN</th><th>Mb</th><th>Md</th></tr><tr><td>2</td><td>2</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	T	FN	Mb	Md	2	2	0	0		
T	FN	Mb	Md										
2	2	0	0										
6		$\varepsilon = \varepsilon_n + \varepsilon_b = \frac{1}{2(1+\nu)} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E}$	<table border="1"><tr><th>T</th><th>FN</th><th>Mb</th><th>Md</th></tr><tr><td>0</td><td>2(1+ν)</td><td>2(1+ν)</td><td>0</td></tr></table>	T	FN	Mb	Md	0	2(1+ν)	2(1+ν)	0		
T	FN	Mb	Md										
0	2(1+ν)	2(1+ν)	0										
7		$\varepsilon = \varepsilon_n = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E}$	<table border="1"><tr><th>T</th><th>FN</th><th>Mb</th><th>Md</th></tr><tr><td>0</td><td>2</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	T	FN	Mb	Md	0	2	0	0		
T	FN	Mb	Md										
0	2	0	0										
8		$\varepsilon = \varepsilon_b = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E}$	<table border="1"><tr><th>T</th><th>FN</th><th>Mb</th><th>Md</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>4</td><td>0</td></tr></table>	T	FN	Mb	Md	0	0	4	0		
T	FN	Mb	Md										
0	0	4	0										
9		$\varepsilon = \varepsilon_n = \frac{1}{2(1+\mu)} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E}$	<table border="1"><tr><th>T</th><th>FN</th><th>Mb</th><th>Md</th></tr><tr><td>0</td><td>2(1+ν)</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	T	FN	Mb	Md	0	2(1+ν)	0	0		
T	FN	Mb	Md										
0	2(1+ν)	0	0										
10		$\varepsilon = \varepsilon_b = \frac{1}{2(1-\mu)} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E}$	<table border="1"><tr><th>T</th><th>FN</th><th>Mb</th><th>Md</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>2(1+ν)</td><td>0</td></tr></table>	T	FN	Mb	Md	0	0	2(1+ν)	0		
T	FN	Mb	Md										
0	0	2(1+ν)	0										
11		$\varepsilon = \varepsilon_b = \frac{1}{2(1+\mu)} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E}$	<table border="1"><tr><th>T</th><th>FN</th><th>Mb</th><th>Md</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>2(1+ν)</td><td>0</td></tr></table>	T	FN	Mb	Md	0	0	2(1+ν)	0		
T	FN	Mb	Md										
0	0	2(1+ν)	0										
12		$\varepsilon = \varepsilon_b = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E}$	<table border="1"><tr><th>T</th><th>FN</th><th>Mb</th><th>Md</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>2</td><td>0</td></tr></table>	T	FN	Mb	Md	0	0	2	0		
T	FN	Mb	Md										
0	0	2	0										
13		$\varepsilon = \varepsilon_d = \frac{1}{4} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E}$	<table border="1"><tr><th>T</th><th>FN</th><th>Mbx</th><th>Mby</th><th>Md</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>4</td></tr></table>	T	FN	Mbx	Mby	Md	0	0	0	0	4
T	FN	Mbx	Mby	Md									
0	0	0	0	4									
14		$\varepsilon = \varepsilon_d = \frac{1}{4} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E}$	<table border="1"><tr><th>T</th><th>FN</th><th>Mbx</th><th>Mby</th><th>Md</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>4</td></tr></table>	T	FN	Mbx	Mby	Md	0	0	0	0	4
T	FN	Mbx	Mby	Md									
0	0	0	0	4									
15		$\varepsilon = \varepsilon_d = \frac{1}{4} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E}$	<table border="1"><tr><th>t</th><th>FN</th><th>Mbx</th><th>Mby</th><th>Md</th></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>4</td></tr></table>	t	FN	Mbx	Mby	Md	0	0	0	0	4
t	FN	Mbx	Mby	Md									
0	0	0	0	4									

Tab. 2: Orientace tenzometrů ve Wheatstonově můstku s měřitelnými veličinami [13]

, kde

- T - tenzometr pro teplotní kompenzaci
- FN - normálové zatížení – tah/tlak
- Mb - ohybový moment
- Mby, Mbx - ohybový moment dle souřadnice y, x
- Md - krut

aktivní tenzometr

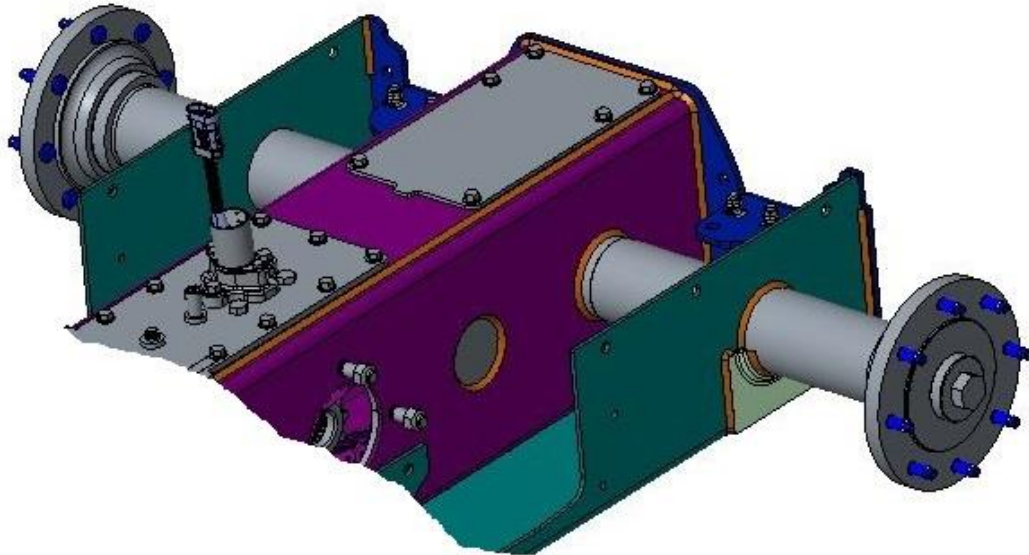
tenzometr pro teplotní kompenzaci

pasivní odpor

U jednotlivých případů z Tab. 2 je vždy dobře vidět typ konfigurace Wheatstonova mostu, počet zapojených aktivních a teplotně kompenzujících tenzometrů a pasivních odporů, orientace těchto tenzometrů s ohledem na měřitelné zatížení, velikost celkové deformace a podíl jednotlivých deformací v přetvoření. Tabulka je zároveň dobrým průvodcem při rozhodování konkrétního typu zapojení pro měření dané veličiny, popřípadě veličin. V tabulce je totiž zároveň vidět i ovlivnitelnost jednotlivých druhů zatížení pro součet celkové deformace.

5 EXPERIMENTÁLNÍ TESTOVÁNÍ [2]

Součástí diplomové práce je i praktická část ověřující správné porozumění základům tenzometrického měření, včetně vyzkoušení si přípravy plochy a samotné instalace tenzometrů. Při návrhu měřicího snímače jsme vycházeli z konstrukce podvozku nakladače (Obr. 43), který je konstrukčně a principiálně stejný pro všechny druhy nakladače.



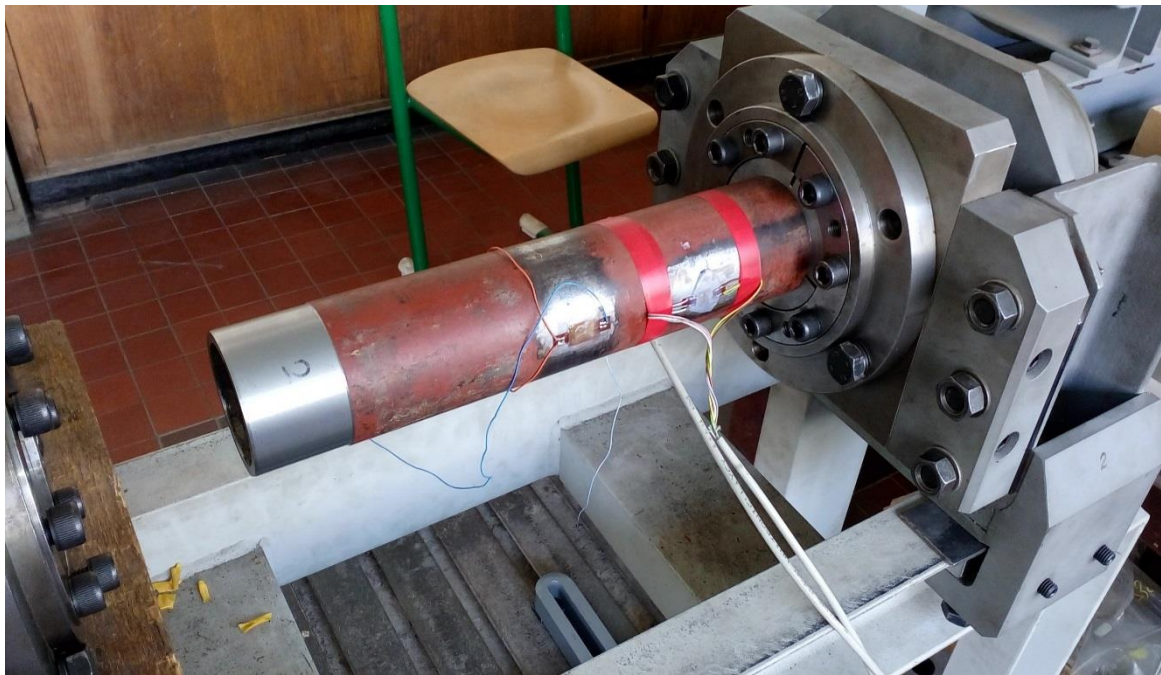
Obr. 43.: Podvozek nakladače s přípojnou přírubou pro kola

Jelikož má být přípravek vyměnitelný, je logickou volbou zkonstruovat přípravek jako mezičlen mezi přípojnou přírubu podvozku a nasazovacím kolem s ráfkem. Protože jsou obě tyto části kruhových průřezů a jedná se o rotační součástky, rozhodnul jsem se pro měřicí přípravek též v kruhovém průřezu. Proto i pro náš experiment použijeme obdobný tvar budoucího snímače, a tím bude trubka.

Cílem prvního experimentu bude ověření základních poznatků tenzometrie, ověření si správného pochopení některých konfigurací Wheatstonova můstku, srovnání analytických výpočtů a hodnot měření na jednoduchém případě zatěžování, potvrzení nezávislosti měřících konfigurací a v neposlední řadě vyzkoušení praktické aplikace tenzometrů. Nejpodstatnějším sledovaným faktorem je nezávislost konfigurací, v našem případě to bude působení kroutícího momentu a ohybového momentu zároveň. Při známých hodnotách zatížení a geometrických a materiálových hodnotách trubky bychom měli tyto hodnoty verifikovat.

5.1 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

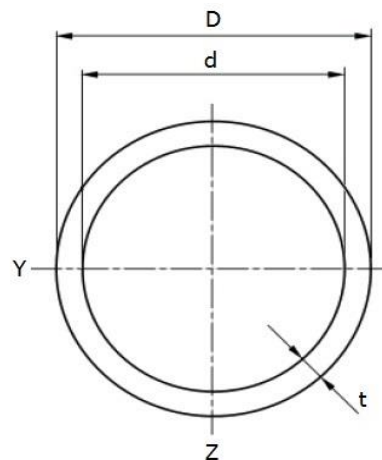
Jak bylo řečeno výše, součástí testování bude zatěžování trubky ohybovým a kroutícím momentem. Trubku si lze představit jako nosník kruhového průřezu, který je upevněn ve svěrném pouzdru měřicího standu. Za svěrným pouzdrum došlo ještě k bodovému podepření trubky, aby nedocházelo k otačení svěrných pouzder. Vzhledem k povaze zkušebny experiment by měl být jednoduchý, rychlý a hlavně bezpečný. Jelikož by tahová složka výrazně navyšovala náročnost testování, nebude toto zatížení součástí experimentu. Testování bude probíhat na jednoduchém testovacím standu, který je vidět na Obr. 44.



Obr. 44.: Testovací stand s upevněnou trubkou

5.1.1 PARAMETRY MĚŘENÍ

V našem experimentu chceme zatěžovat trubku ohybovým a kroutícím momentem. Naším testovacím vzorkem bude ve výsledku kus obyčejné trubky. Je zapotřebí znát rozměry a materiál trubky, která pro nás představuje deformující člen pro měření. Stejně tak místa, kam budou umístěny tenzometry. Tato místa byla řádně upravena před lepením dle 3.5.1 a tenzometry nalepeny dle 3.5.2.



Obr. 45.: Průřez trubky

Parametry trubky:

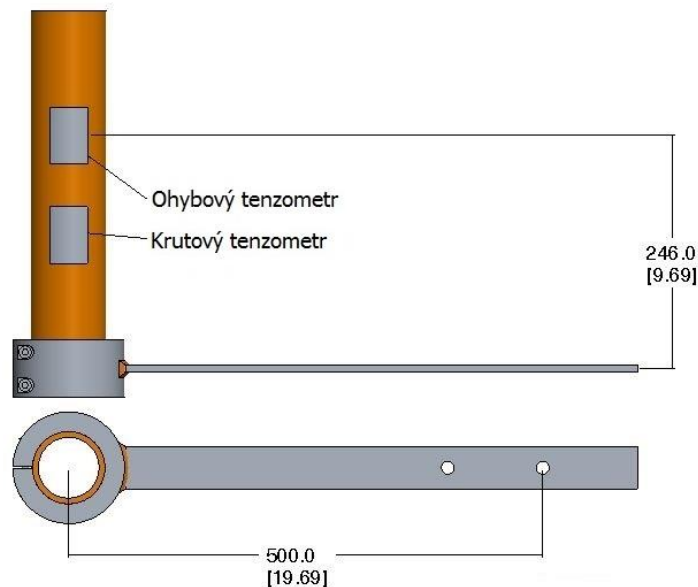
Předpokládaný materiál:	ČSN 11 500
Vnější průměr D:	76,1 mm
Vnitřní průměr d:	64,9 mm
Modul průřezu v ohybu W_o :	20 379,44 mm ³
Modul průřezu v krutu W_k :	40 758,88 mm ³
Modul pružnosti v tahu E:	1,9.10 ⁵ N/mm ²
Poissonovo číslo μ :	0,29
Vzdálenost ohybového tenzometru l_o :	246,0 mm

, kde moduly v průřezu pro trubku se určí jako:

$$W_o = \frac{\pi \cdot D^3}{32} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right] \quad (46)$$

$$W_k = \frac{\pi \cdot D^3}{16} \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right] \quad (47)$$

Při znalostech geometrických parametrů trubky můžeme určit polohu pro tenzometry. Poloha tenzometru pro měření krutu nehraje roli, neboť zkrut je v celé své délce stejný. Nic méně pro měření ohybové deformace je dané tenzometry výhodné umístit co nejdále od působícího síly, kde je deformace největší. Umístění tenzometrů je vidět na Obr. 46:

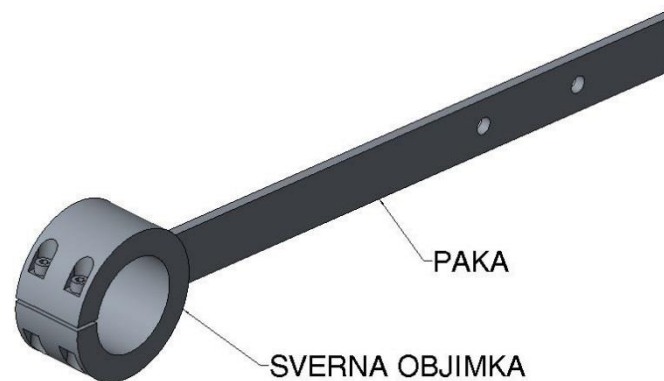


Obr. 46.: Schéma rozložení tenzometrů a přípojně síly

Abychom byli schopni tuto sílu přenést na náš vzorek, bude zapotřebí vytvořit přípravek. Přípravek připomíná svěrné pouzdro. Jedná se o opracovanou část trubky, kterou jsme příčně rozřízli na jedné straně a podél této drážky vyrobili dvě díry s závitem. Pomocí šroubů dojde

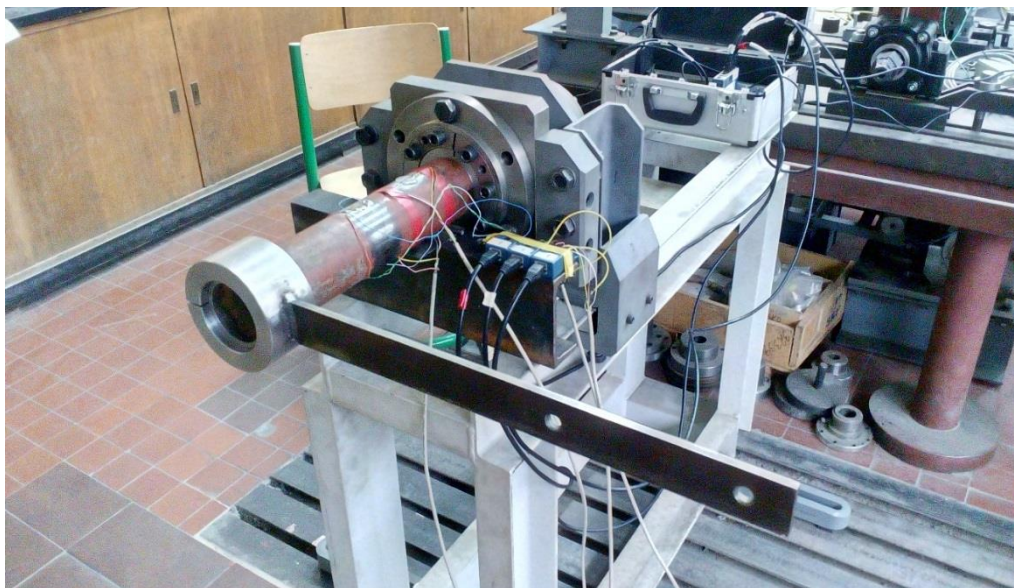
ke stažení a vytvoření svěrné síly. Na tento přípravek byla dále navařena pásovina na opačnou stranu, kam se budou ukládat jednotlivá závaží k vyvození korigované síly na testovací vzorek (Obr. 47). Parametry přípravku jsou:

Vnější průměr D:	118,0 mm
Vnitřní průměr d:	76,5 mm
Délka svěrné části b:	60,0 mm
Osová délka připojení:	500 mm
Velikost a počet šroubů:	M8, 2ks
Předpokládaný materiál:	ČSN 11 500



Obr. 47.: Přípravek pro testování

Vzhledem k možnostem laboratoře a důvodu bezpečnosti svěrných pouzder bylo stanoveno maximální přípustné zatížení v závažích na 60 kg. Pro lepší představu testování byla pořízena další fotografie z testování (Obr. 48):



Obr. 48.: Upnutá trubka ve standu s nasazeným přípravkem

Jednotlivé konfigurace:

Krutové tenzometry

- Počet kusů: 2ks
- Konfigurace zapojení: plný most
- Vzájemná poloha tenzometrů: Pootočení o 180° (bez uvažování nepřesností)
- Typ tenzometrů: 1-XY21-6/120
- K-faktor: 2,03
- Excitační napájení: 2,5 V
- Jmenovitý odpor: 120 Ω
- Pájecí body: 1-LS5

Ohybové tenzometry

- Počet kusů: 2ks
- Konfigurační zapojení: půl most
- Vzájemná poloha tenzometrů: Pootočení o 180° (bez uvažování nepřesností)
- Typ tenzometrů: 1-XY91-6/120
- K-faktor: 2,04
- Excitační napájení: 2,5 V
- Jmenovitý odpor: 120 Ω
- Pájecí body: 1-LS5

V následujících tabulkách jsou zapsány hodnoty z laboratorního měření, kde SG je běžně používaná zkratka pro strain gauge (tenzometr) s příslušnými indexy a dále vypočtené a naměřené hodnoty napětí pro ohyb „ σ “ a krut „ τ “. Dále jsou vypočteny absolutní odchylky naměřených a vypočtených hodnot včetně vyjádření rozdílu v procentech:

Závaží [kg]	SG _{krut} [$\mu\text{m}/\text{m}$]	τ_{kvyp} [N. mm^{-2}]	τ_{knam} [N. mm^{-2}]	$\Delta\tau_k$ [N. mm^{-2}]	$\Delta\tau_k$ [%]
0	0,000	0	0	0	0
9,9	6,396	1,191	1,215	0,024	1,96
19,8	12,765	2,383	2,425	0,043	1,76
29,6	19,083	3,562	3,626	0,064	1,76
39,3	25,315	4,729	4,809	0,080	1,67
49,25	31,682	5,927	6,019	0,093	1,54
58,95	37,933	7,094	7,207	0,113	1,57
49,25	31,661	5,927	6,016	0,089	1,48
39,3	25,305	4,729	4,808	0,079	1,63
29,6	19,011	3,562	3,612	0,050	1,38
19,8	12,752	2,383	2,423	0,040	1,66
9,9	6,335	1,191	1,203	0,012	1,02
0	0,027	0	0,005	0,005	-

Tab. 3.: Naměřené a vypočtené hodnoty pro krut z experimentu

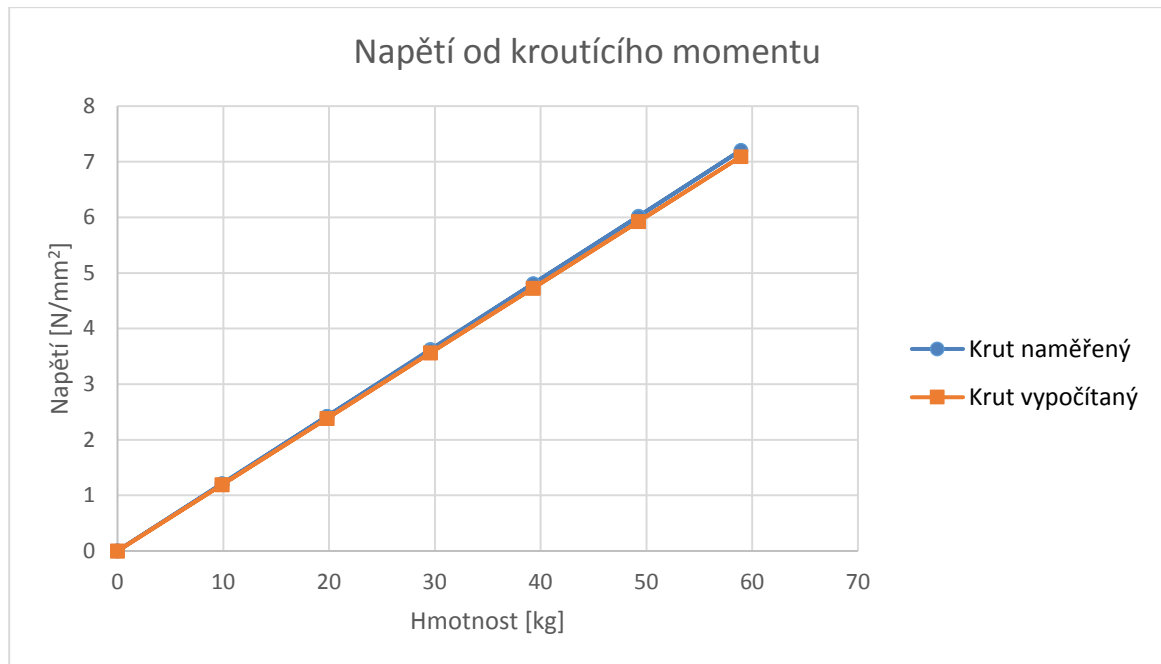
Závaží [kg]	SG1 _{ohyb} [μm/m]	SG2 _{ohyb} [μm/m]	SG _{ohyb} [μm/m]	σ _{ovyp} [N.mm ⁻²]	σ _{onam} [N.mm ⁻²]	Δσ _o [N.mm ⁻²]	Δσ _o [%]
0	0,000	0,000	0,000	0	0	0	0
9,9	-7,021	5,753	6,387	1,172	1,213	0,041	3,39
19,8	-13,945	11,477	12,711	2,344	2,415	0,070	2,92
29,6	-20,169	17,411	18,790	3,505	3,570	0,065	1,82
39,3	-26,358	23,078	24,718	4,654	4,696	0,043	0,91
49,25	-32,681	28,905	30,793	5,832	5,850	0,019	0,32
58,95	-38,737	34,589	36,33,	6,981	6,966	0,015	0,21
49,25	-32,987	28,766	30,877	5,832	5,866	0,035	0,59
39,3	-26,997	22,858	24,928	4,654	4,736	0,083	1,74
29,6	-21,203	17,094	19,149	3,505	3,638	0,133	3,66
19,8	-15,270	11,331	13,301	2,344	2,527	0,182	7,22
9,9	-9,176	5,383	7,280	1,172	1,383	0,211	15,24
0	-0,304	0,022	1,411	0	0,268	0,268	-

Tab. 4.: Naměřené a vypočtené hodnoty pro ohyb z experimentu

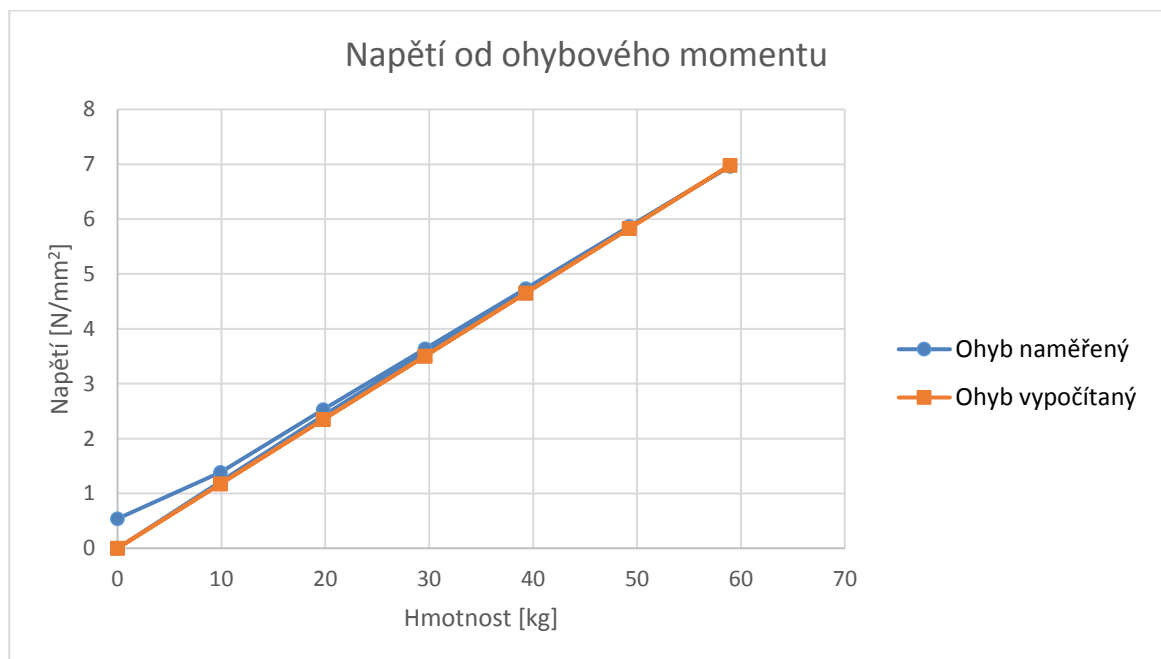
Z naměřených a zpracovaných dat lze vysledovat následující:

- Velikost vypočítaného τ_{kvyp} a naměřeného τ_{knam} napětí pro krut se neliší v řádu o více než dvanáct setin N.mm⁻² a dvě procenta, tuto část měření lze považovat za úspěšnou. Rozdíl v procentech je relativně konstantní.
- Velikost vypočítaného σ_{ovyp} a naměřeného σ_{onam} napětí pro ohyb se neliší v řádu o více než dvacet sedm setin N.mm⁻², což z absolutního hlediska není tolik, v procentech je však tato chyba větší než 15 %. Odchyłka naměřeného a vypočteného napětí se liší nejvíce při malém zatížení. Na druhou stranu v případě většího zatížení okolo 40 kg se odchyłka zmenší pod 2 % a okolo 50 kg pod 0,5 %. Tato chyba může být způsobena nedodržením vzájemné polohy ohybových tenzometrů, které nejsou pootočený přesně o 180°.
- Při působení kroutícího momentu a ohybového momentu nedochází k vzájemnému ovlivnění tenzometrů v případě zapojení konfigurací do plných mostů, čímž jsme potvrdili teoretický poznatek z Tab. 2. Tento poznatek bude velice důležitý při vlastním návrhu víceosého senzoru.
- Tenzometry jsou nalepeny a zapojeny správně, ačkoliv v menším zatížení docházelo ke zhoršeným výsledkům u ohybového napětí, to však není chyba aplikace. Stejně tak teoretická příprava ohledně materiálových charakteristik a principů přetvoření koresponduje s experimentem.

Předchozí hodnoty (Tab. 3 a Tab. 4) jsou ještě vyneseny do grafů pro lepší přehlednost:



Obr. 49.: Závislost napětí od kroutícího momentu na hmotnosti



Obr. 50.: Závislost napětí od ohybového momentu na hmotnosti

6 NÁVRH SENZORU PRO MĚŘENÍ ZATÍŽENÍ

V předchozích kapitolách jsme si shrnuli základní poznatky ohledně tenzometrického měření, od principu přetvoření až po experimentální pokus včetně instalace. Tyto poznatky budou zohledněny při návrhu senzoru. Jelikož se nejedná o jednoduchý přípravek pro měření jednoho typu zatížení, byla provedena rešerše těchto měřících senzorů s cílem inspirace a urychlení návrhu tohoto senzoru. V následujícím textu budou zmíněny některé firmy poskytující víceosé snímače. Mezi další kvalitní výrobce patří například francouzská firma Garos nebo americká firma Honeywell.

6.1 VÝROBCI VÍCEOSÝCH SNÍMAČŮ

Firma GTM [14]

Firma GTM je jednou z předních firem ohledně měřící techniky v oblasti více komponentního měření. Disponuje akreditací pro kalibraci více komponentních snímačů. Firma GTM nabízí více než jednu produktovou řadu víceosých snímačů, mezi nejpoužívanější patří řady MKA, MPF a RLS. Za zmínku stojí řada RLS, zkušební stolice pro měření podvozků a os automobilů. Nahrazuje měřící kola používaná při jízdě na silnici a mezi hlavní výhody patří: neomezená únavová pevnost, vysoká tuhost, přesnost a nízkou hmotnost, která vede k malému zkreslení naměřených hodnot v případě přítomnosti tohoto senzoru. Pro zpracování naměřených hodnot firma nabízí vícekanálový měřící zesilovač MCMpro. Výhodou firmy je individuální přístup k jednotlivým aplikacím zákazníka, lze si tedy objednat napůl sériově vyráběný senzor modifikovaný přímo na míru co se do připojovacích rozměrů a velikosti zatížení týče.



Obr. 51.: Víceosé snímače firmy GTM [14]

Firma HBM [8]

Víceosé snímače firmy HBM umožňují měření všech šest zatížení, tedy měření sil ve třech osách a měření točivého momentu podél třech os. Tento 3D snímač poskytuje trojrozměrné zobrazení zatížení na zkoumané sestavě. Produktová řada MCS10 se vyrábí ve více variantách a díky sériové výrobě se jedná o snímač, který je běžně dostupný, ekonomicky přijatelný pro spoustu firem a v neposlední řadě produkt s ustálenými technickými parametry. Dále má tato produktová řada stupeň krytí IP67, což je nezbytný parametr při použití mimo laboratorní podmínky. Určitá nevýhoda snímače je omezená použitelnost, co se do připojovacích a zástavbových rozměrů týče oproti na míru navrženým senzorům.

Senzory MCS10 se běžně používají k monitorování montážních procesů letadel, testování pneumatik a náprav, testovacích stolicích či obecně v robotice.



Obr. 52.: Víceosé snímače MCS10 firmy HBM [8]

Firma Interface [15]

Je americká firma nabízející víceosý snímač produktové řady 6AXX. Snímače se běžně používají v nejrůznějších oblastech průmyslu a vědeckých aplikací jako je letectví, automobilový průmysl, robotika a biomechanika. Snímače využívají šesti konfigurací plných mostů, což vede k dobré citlivosti, neovlivnitelnosti zatížení a výstup v 6 nezávislých kanálech.



Obr. 53.: Víceosý snímač firmy Interface [15]

Detailní informace ohledně fungování či metodiky víceosých senzorů je know-how každé firmy. Jedná se totiž o sofistikované produkty, u kterých byly vynaloženy značné finanční prostředky na vývoj, a to nejen na samotnou konstrukci, ale i zpracování a vyhodnocování naměřených dat.

Nabízí se tedy otázka, proč vyvíjet vlastní produkt na měření sil a momentů namísto nákupu hotových a osvědčených produktů. Odpověď je jednoduchá. Při vývoji vlastního snímače není cílem pouze vytvoření finální měřicí aparatury, ale také získání důležitých zkušeností. Díky pozorování a vývoji na vlastní půdě firmy se totiž získávají další informace při průběhu návrhu jako je poučení z chyb, prohloubení znalostí problematiky, lepší srovnání samotných konfigurací a konstrukcí snímače apod. Tyto a další poznatky tvoří již zmiňované know-how firmy ohledně dané problematiky. Poznatky a zkušenosti se dále uplatňují u dalších měření a dochází k lepšímu vývoji i samotných zkoumaných dílů a sestav za menších finančních nákladů.

6.2 KONSTRUKČNÍ KONCEPTY VÍCEOSÉHO SENZORU

Návrh samotného senzoru není jednoduchou záležitostí, proto při návrhu bylo využito poznatků z rešerše ohledně nabízených senzorů na trhu [6.1] a poznatků z vlastního jednoduchého experimentálního testování [5.1]. Koncepty dále musí respektovat připojovací a zástavbové rozměry nakladačů. Při návrhu a dimenzování senzoru bylo využito výpočtového doplňku Simulate v softwaru Creo 3.0, ve kterém byly návrhy modelovány. V následující tabulce (Tab. 5) lze přehledně vidět parametry zadávané do softwaru:

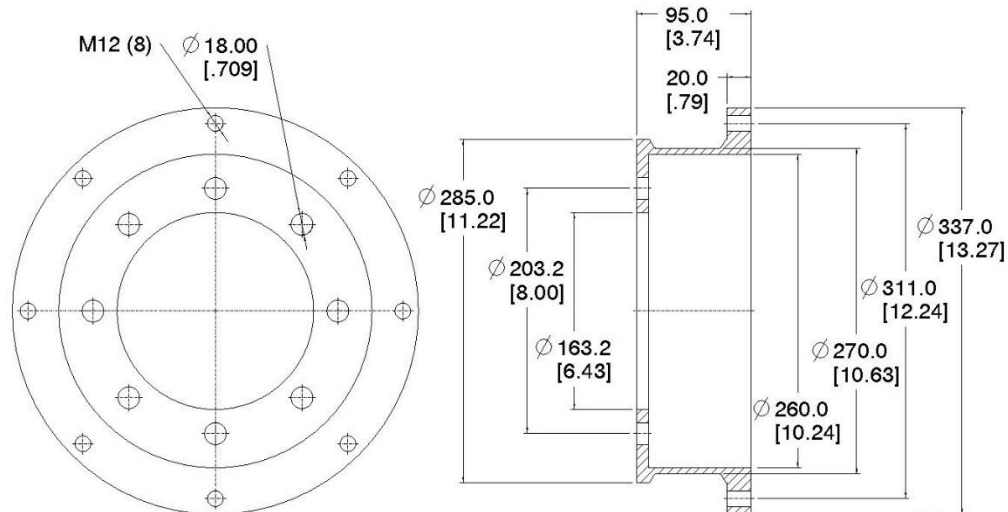
Výchozí materiál	S355J2H (EN 10210-1) [17]
Youngův modul E	200 GPa [15]
Mez kluzu $R_{p0,2}$	355 N/mm ²
Poissonovo číslo μ	0.29 [15]
Hustota ρ	7 850 kg/m ³ [16]
Boční síla F_z	15 000 N
Vertikální síla F_y	20 000 N
Podélná síla F_x	20 000 N
Kroutící moment M_z	10 000 N
Klopný moment M_x	10 000 N
Klopný moment M_y	10 000 N
<i>Tab. 5.: Výchozí hodnoty pro koncepty senzoru</i>	

Předpokládaný materiál pro trubku bude S355J2H (EN 10210-1), což bývá materiál pro bezešvé tlustostěnné trubky společnosti Feron a.s. [17]. Vymodelované koncepty pro MKP analýzu budou zjednodušeny ohledně přírub, které při fyzickém prototypu budou navařeny a sestava bude tvořena ze tří částí, nyní je budeme brát jako jeden díl. Ráfky na kolech, které se nyní používají, jsou tvořeny z tloušťky plechu 5 mm. My použijeme

přípojnou tloušťku příruby rovnu 10 mm, abychom zajistili dostatečnou tuhost z pohledu bezpečnosti.

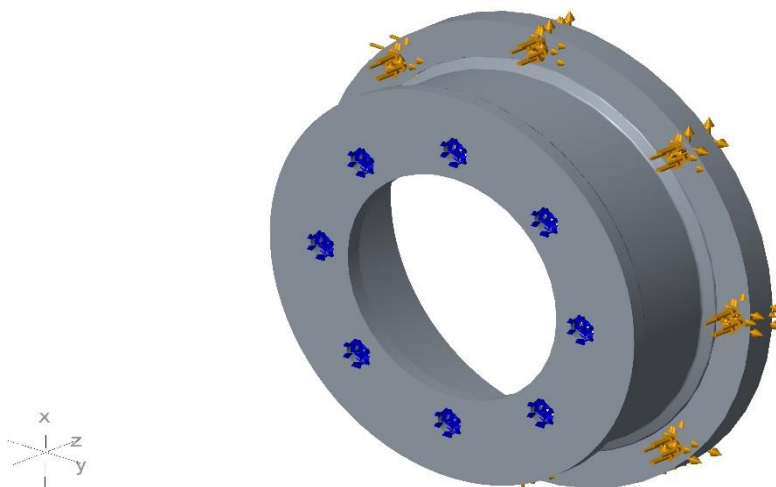
6.2.1 KONCEPT Č.1

Vzhledem k nulovým zkušenostem dimenzování víceosého měřicího přípravku byla jako startovní model vybrána trubka se zúženou částí v oblasti potenciálních tenzometrů. Počáteční parametry deformační části trubky jsou (Obr. 54):



Obr. 54.: Rozměry konceptu č.1

Jako první je zapotřebí ověřit návrh koncové části příruby. Byla zesílena tloušťka oproti počáteční přírubě, jelikož byly zmenšeny šrouby na M12, počet šroubů byl zachován 8 kusů. Celý model jsme zatížili všemi silami v závitech koncové příruby, vetknuli díry počáteční příruby a porovnali napětí v dírách obou přírub pro šrouby (Obr. 55, Obr. 56):

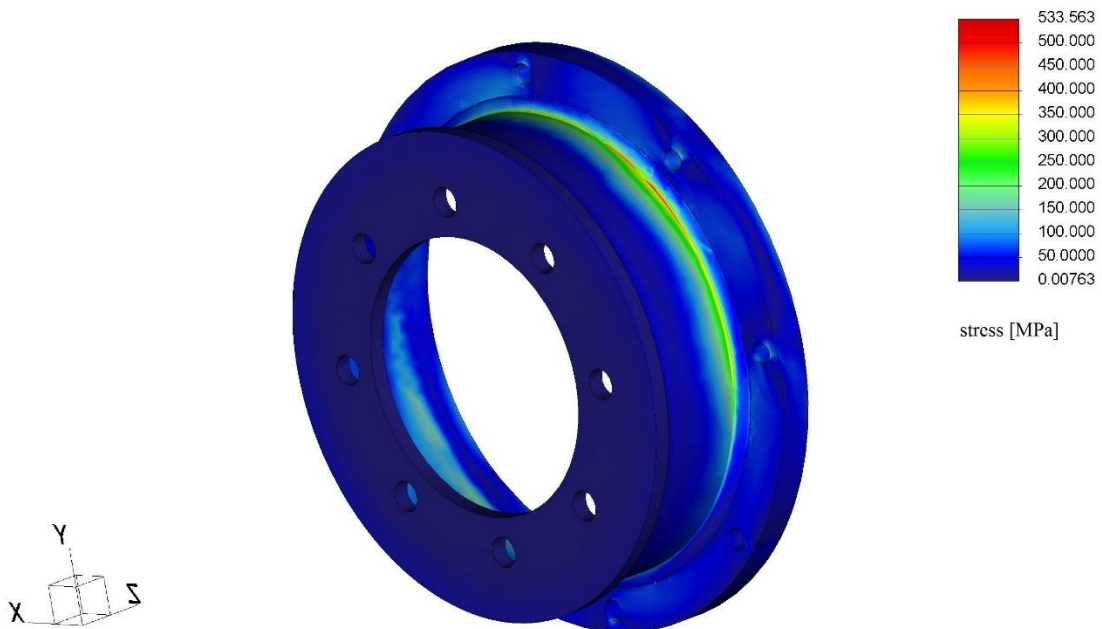


Obr. 55.: Vetknutí a zatížení konceptu č.1



Obr. 56.: Porovnání děr přírub konceptu č.1

Ze simulace lze vyvodit, že parametry koncové příruby budou dostatečné z pohledu dimenzování. Protože je v našem případě přípojná příruba tužší, než je současně používaný ráfek na kolech, lze pro budoucí výpočty vetknout celou plochu dosedací příruby – v reálu dojde k dolehnutí velké části plochy na hřídel podvozku nakladače (Obr. 43). Při změně podmínek vetknutí dostaneme již napětí v zúžené části (Obr. 57).



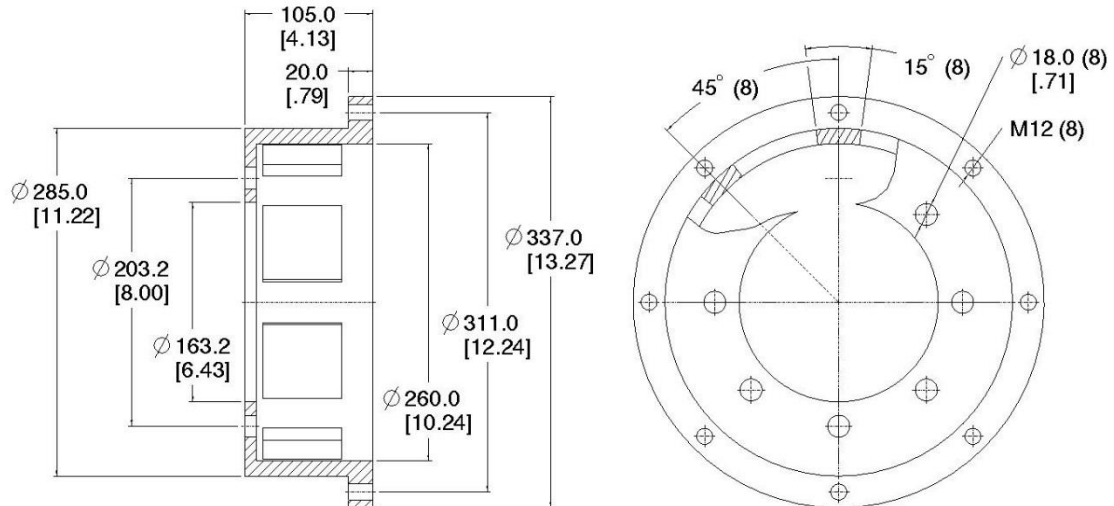
Obr. 57.: Napětí při celkovém zatížení konceptu č.1

Z prvního konceptu lze vysledovat následující:

- Navržená koncová příruba přípravku by měla do budoucna zvládnout přenést kompletní zatížení od všech sil dle MKP analýzy. Navržené rozměry budou použity i pro další koncepty.
- Vetknutá dosedací plocha přípojné příruby deformuje přípravek ve chtěném stavu tak, jak by v reálu byla namontována na podvozek nakladače.
- Maximální napětí přípravku se projevuje u přechodové části průměrů, která obsahuje významné koncentrátoři napětí. Tuto oblast lze částečně zanedbat vlivem chyby MKP analýzy.
- Je zapotřebí lépe usměrnit deformační energii a vykreslit špičky pro jednotlivá zatížení, jednotná deformační plocha není pro toto úplně vhodná. Je zapotřebí ještě zmenšit deformační část pro navýšení deformace.

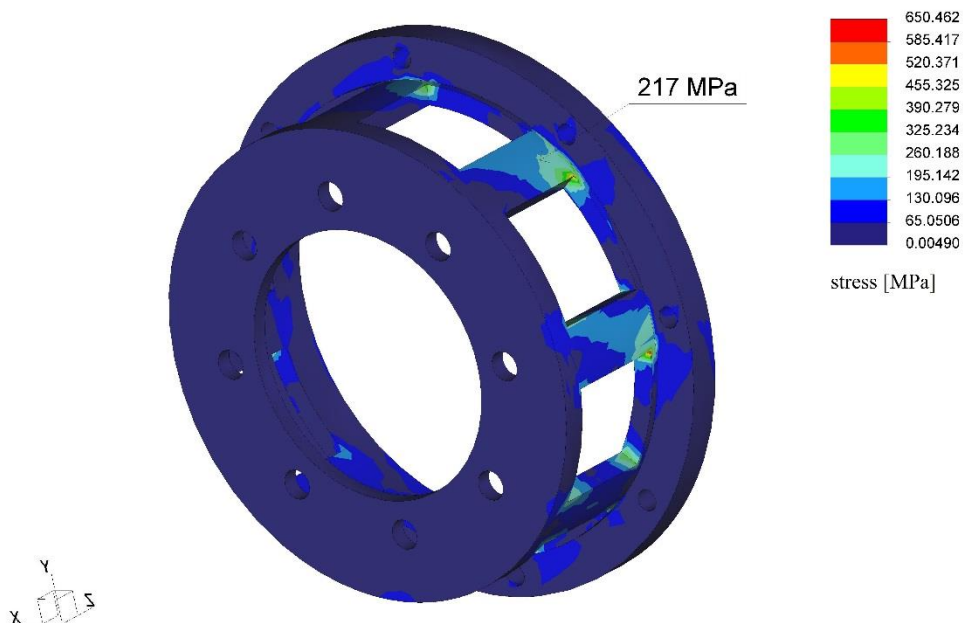
6.2.2 KONCEPT Č.2

Vyjdeme ze zkušeností a ze závěrů MKP analýzy z konceptu č.1. Byla zachována většina rozměrů, avšak místo zúžení na průměru byly do kruhové části zakomponovány vybrání tak, aby v ploše vznikly deformační drážky a přípravek byl prodloužen (Obr. 58):



Obr. 58.: Rozměry konceptu č.2

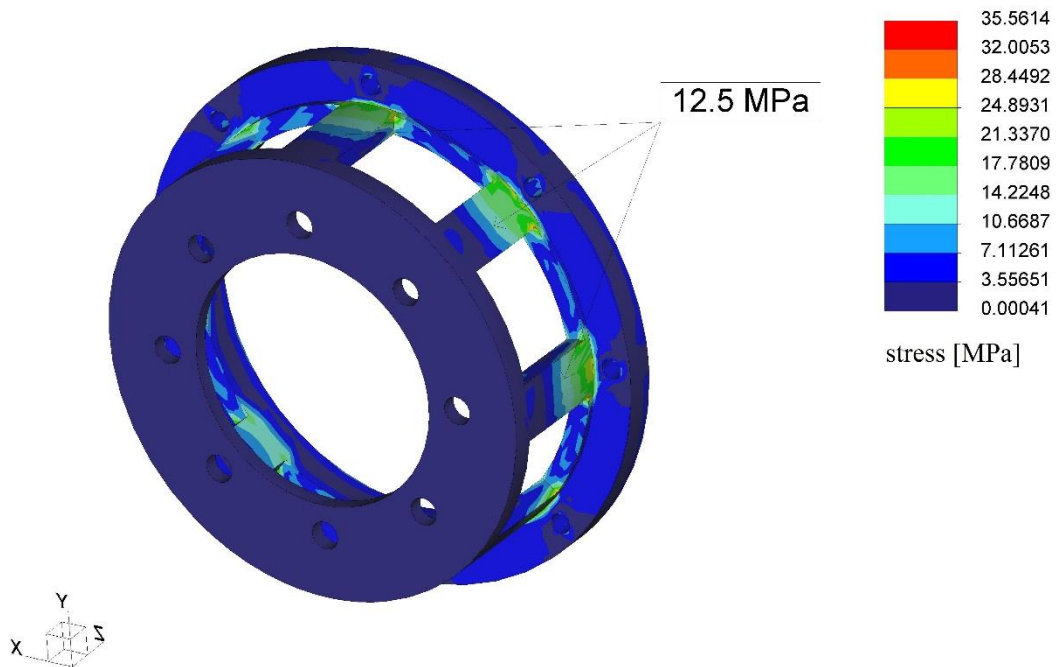
Nejprve je zapotřebí zkontrolovat maximální možné napětí. To se pohybuje okolo 217 N/mm^2 (Obr. 59), pokud nebudeme počítat nezaoblené části, které jsou výraznými koncentráty napětí, které by byly reálu odstraněny zaobleními.



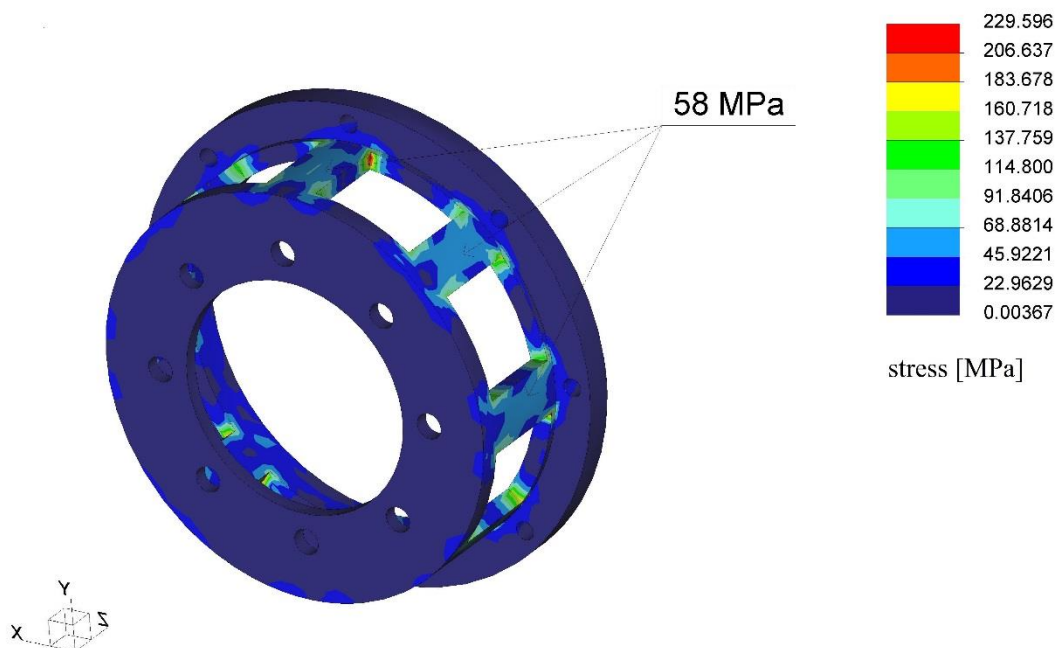
Obr. 59.: Maximální napětí od zatížení konceptu č.2

Maximální hodnota napětí je pro zvolený materiál přijatelná. Dále je zapotřebí vysledovat, jak a v jaké míře jednotlivá zatížení deformují náš přípravek.

Axiální síla F_z a kroutící moment M_z budou způsobovat v deformačních drážkách stejné napětí v rozdílných hodnotách bez rozdílu na natočení (Obr. 60 a Obr. 61)

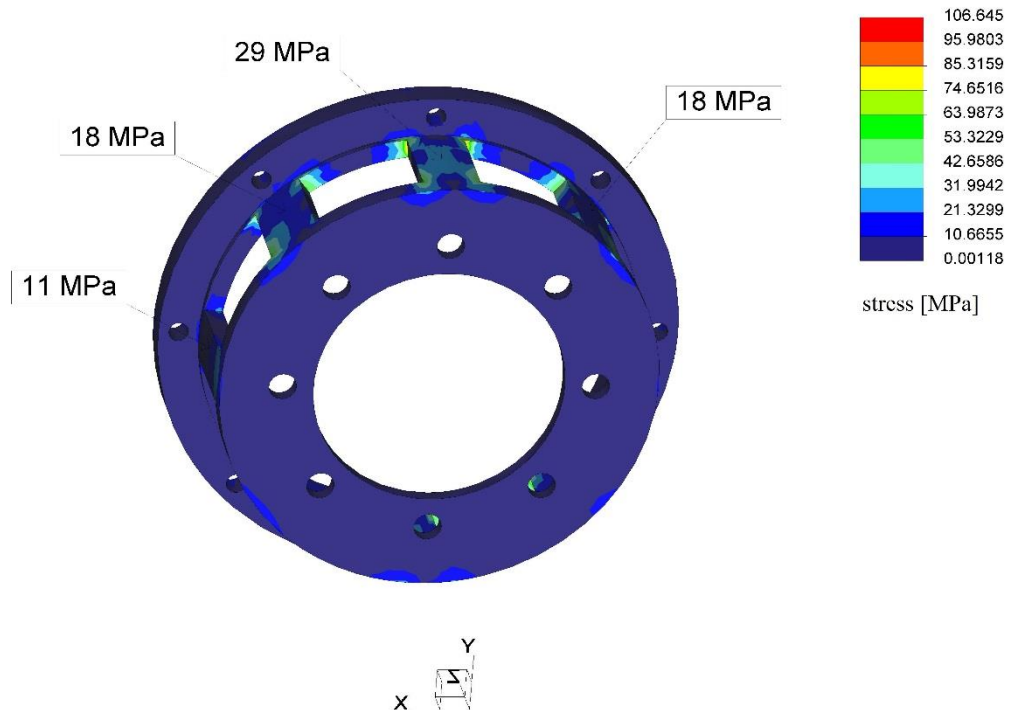


Obr. 60.: Napětí od axiální síly F_z konceptu č.2

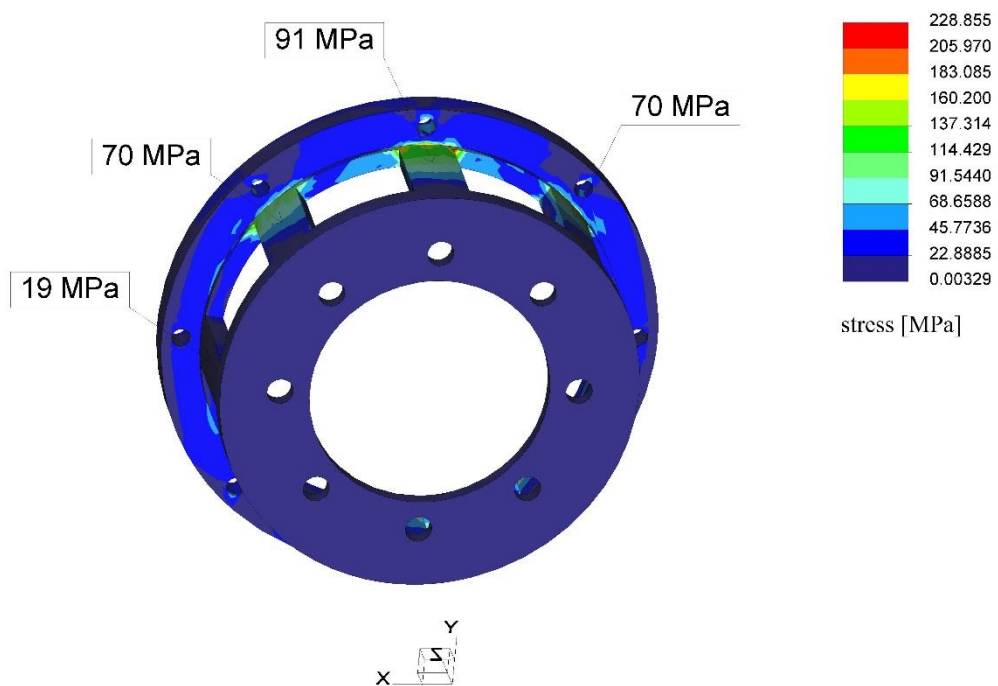


Obr. 61.: Napětí od kroutícího momentu M_z konceptu č.2

Dále lze seskupit vertikální sílu F_x a klopný moment M_x , které nám deformují drážky ve stejných směrech, avšak v jiných hodnotách celkového napětí (Obr. 62 a Obr. 63). To samé bude platit pro dvojici podélné síly F_y a klopný momentu M_y .



Obr. 62.: Napětí od vertikální síly F_x konceptu č.2



Obr. 63.: Napětí od klopného momentu M_x konceptu č.2

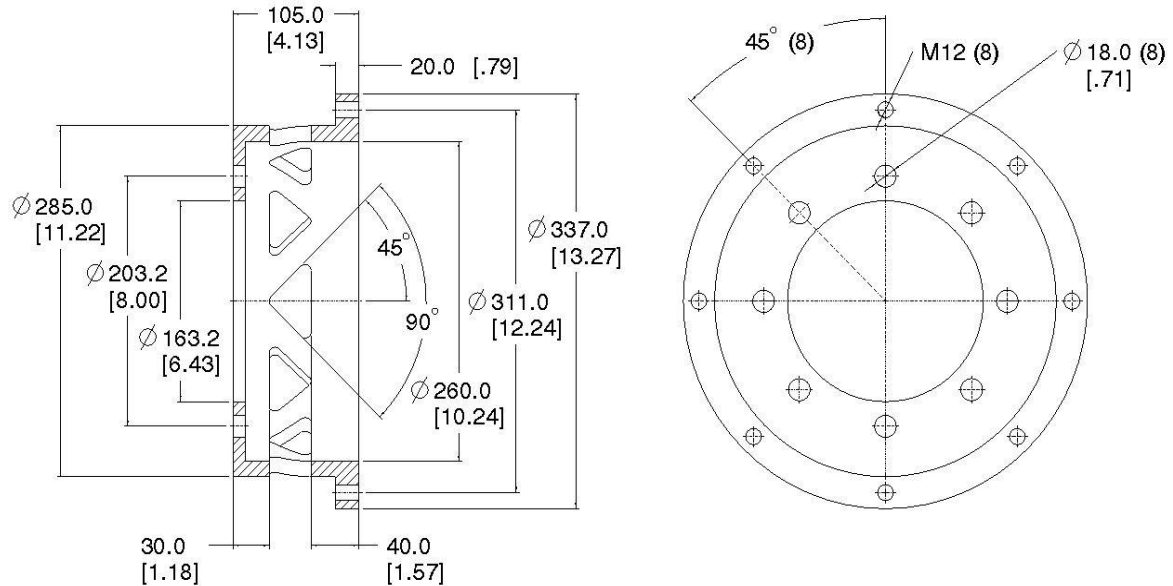


Z druhého konceptu lze vysledovat následující:

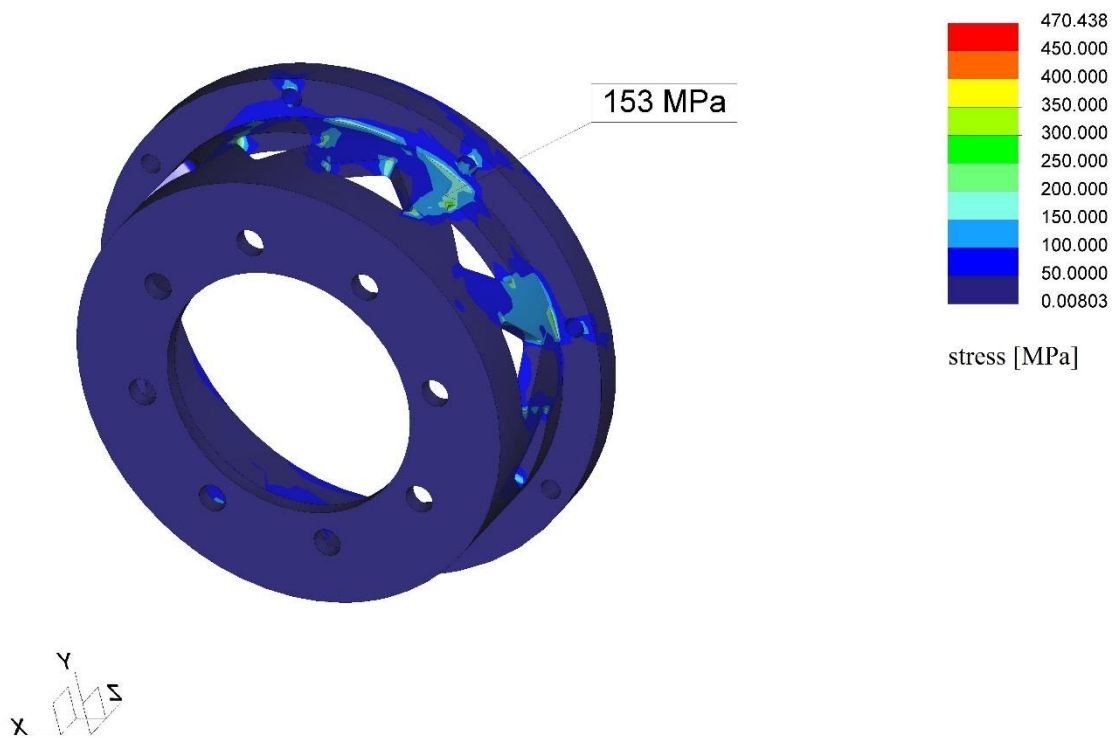
- Axiální síla F_z nám bude způsobovat malé deformace oproti ostatním zatížením. Její měřitelnost bude tedy zřejmě komplikovaná, ačkoliv je dobře předvídatelná.
- Kroutící moment M_z nám způsobuje deformace ve všech deformačních drážkách stejné. Velikost této deformace bude dobře měřitelná.
- Klopný moment M_x , respektive M_y , nám způsobuje symetrickou deformaci podél roviny YZ , respektive podél roviny XZ . Velikost této deformace je největší ze všech zatížení a bude tedy dobře měřitelná.
- Vertikální síla F_x , respektive podélná síla F_y , nám způsobuje symetrickou deformaci podél roviny YZ , respektive podél roviny XZ . Velikost této deformace není tak velká jako u ohybových zatížení a způsobuje smykovou deformaci, která se obtížně měří.
- Kombinace zatížení F_x a M_x , respektive F_y a M_y , by nám v tomto případě tekly stejnou cestou a způsobovaly stejné deformace. To je pro tenzometrické měření nevhodné, neboť by docházelo ke zkreslování naměřených deformací. Je snaha tento jev eliminovat, neboť by se ho nemuselo podařit eliminovat pouhou kalibrací přípravku.

6.2.3 KONCEPT Č.3

Tento koncept vytvoříme jako určitou modifikaci předchozího konceptu. Zachováme většinu rozměrů, jen drážky vyosíme oproti ose celého přípravku o 45° zrcadlově podél osy procházející středem. Sousedící drážky tak budou svírat pravý úhel (Obr. 64):



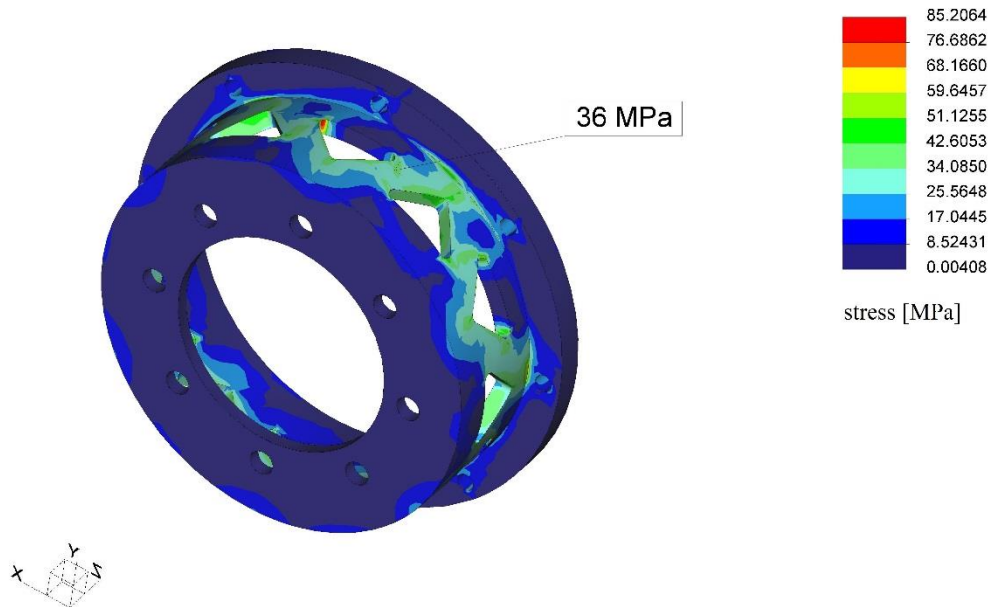
Obr. 64.: Rozměry konceptu č.3



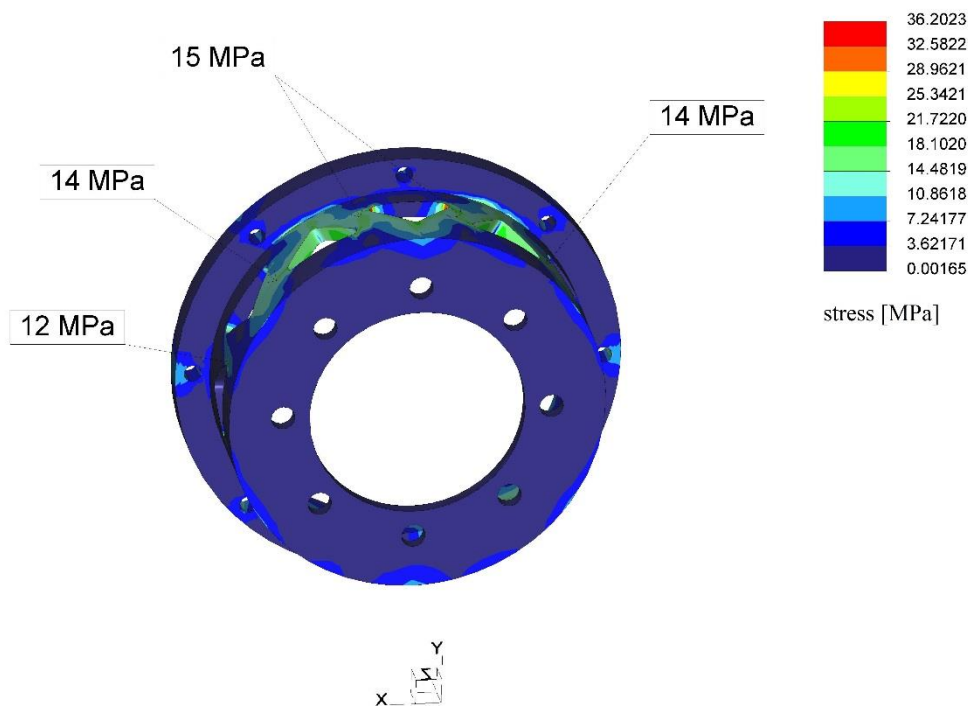
Obr. 65.: Maximální napětí od zatížení konceptu č.3

Na začátku jsme opět zkontrolovali maximální možné napětí. To se pohybuje okolo 153 N/mm^2 (Obr. 65) opět při zanedbání koncentrátorů. Toto snížení napětí je však způsobeno menším odebráním materiálu. Opět se podíváme jak a v jaké míře jednotlivá zatížení deformují náš nově navržený přípravek.

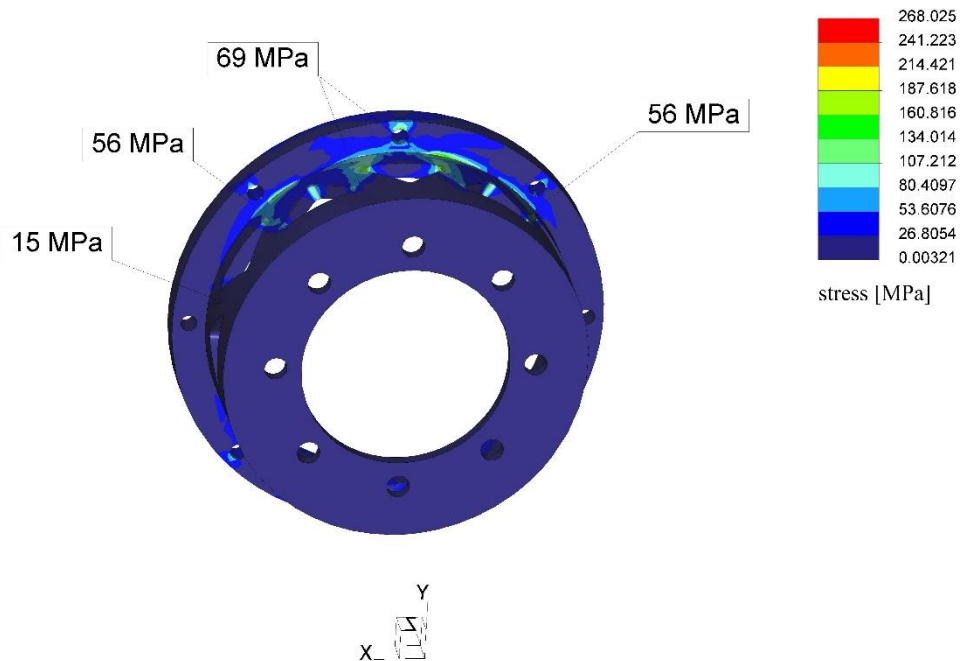
Axiální síla F_z a kroutící moment M_z opět způsobují stejné napětí ve všech drážkách, nyní je lze spojit jako kombinované namáhání (Obr. 66):



Obr. 66.: Napětí od axiální síly F_z a kroutícího momentu M_z konceptu č.3



Obr. 67.: Napětí od vertikální síly F_x konceptu č.3



Obr. 68.: Napětí od klopného momentu M_x konceptu č.3

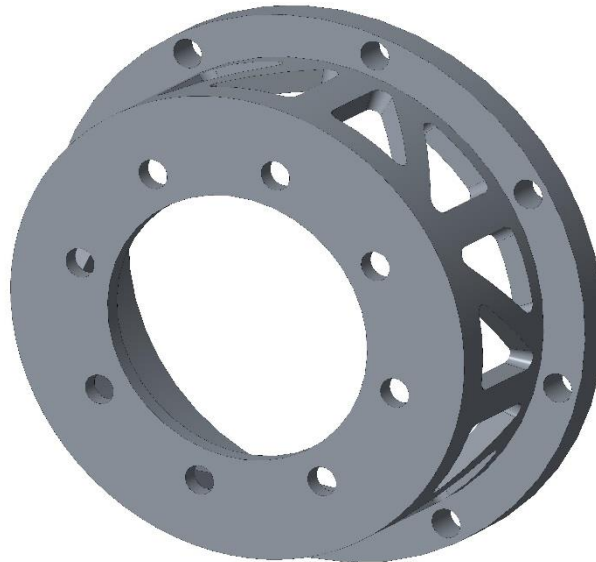
Na Obr. 67 lze opět vidět účinky od síly F_x , které jsou očekávaně menší, než je tomu u druhého konceptu. Došlo však k zajímavému přerozdělení poměrů napětí podél vertikální roviny, kdy sousedící deformační drážky nevykazují tak velké odchylky. Na Obr. 68 jsou vidět účinky od klopného momentu M_x , i zde došlo k zajímavému přerozdělení napětí. Vzhledem k symetričnosti přípravku lze obdobné výsledky očekávat i od horizontální síly F_y a klopného momentu M_y vzhledem k horizontální rovině.

Ze třetího konceptu lze vysledovat následující:

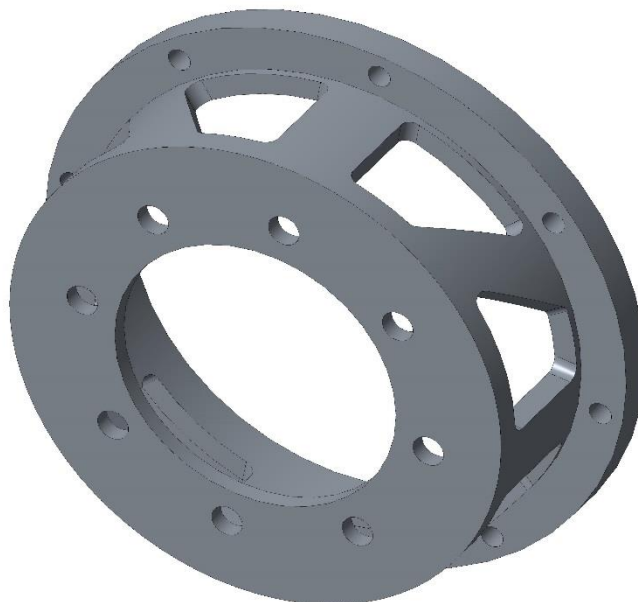
- Vyosené deformační drážky nám nezměnili konstantní přerozdělení u axiální síly F_z a kroučícího momentu M_z , stejně tak se nijak výrazněji nezměnily podíly těchto napětí na celkovém napětí.
- Vyosené deformační drážky způsobují lepší přerozdělení napětí od síly F_x a momentu M_x , respektive síly F_y a momentu M_y vzhledem k rovině symetrie přípravku.
- Kombinace zatížení F_x a M_x , respektive F_y a M_y nám stále vykazuje podobné deformace přípravku. Síly F_x a F_y budou zřejmě nejvíce problematickými veličinami k měření.

6.2.4 DALŠÍ KONCEPTY

Vzhledem k neuspokojivým výsledkům z prvních tří konceptů došlo ještě k několika různým úpravám, co se do polohy a počtu deformačních drážek týče, změna tloušťky jednotlivých drážek apod. Konceptů bylo navrženo ještě několik, není však zapotřebí jednotlivé případy detailněji uvádět a vykreslovat jednotlivé deformace. Pro stručnost jsou uvedeny pouze pohledy na jednotlivé tvary.



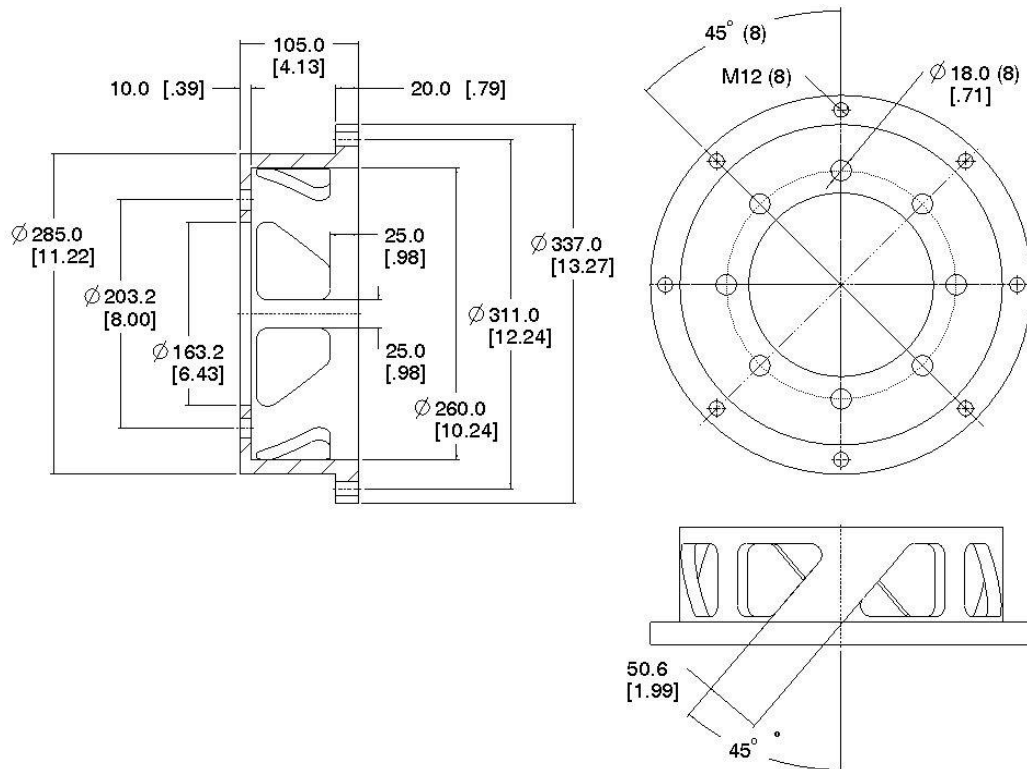
Obr. 69.: Pohled na koncept č.4



Obr. 70.: Pohled na koncept č.5

6.2.5 FINÁLNÍ KONCEPT

Postupnou optimalizací předchozích konceptů byl navržen takový tvar, který nejlépe distribuuje jednotlivé deformace a zároveň vyhovuje z hlediska maximálního napětí při maximálním zatížení. Návrh připomíná koncept č.5, došlo však ke změně tloušťky podélných a vyosených drážek. Rozměry přírub a průměrů byly zachovány. Nejdůležitější parametry finálního tvaru jsou vidět na Obr. 71

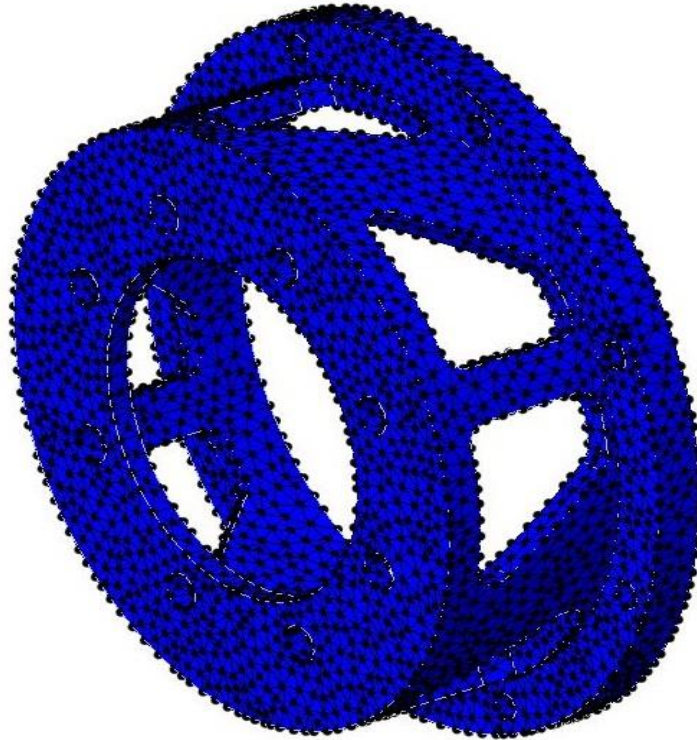


Obr. 71.: Rozměry finálního konceptu

Pro výpočty MKP byly upraveny i parametry sítě včetně zjemnění (Tab. 6) (Obr. 72):

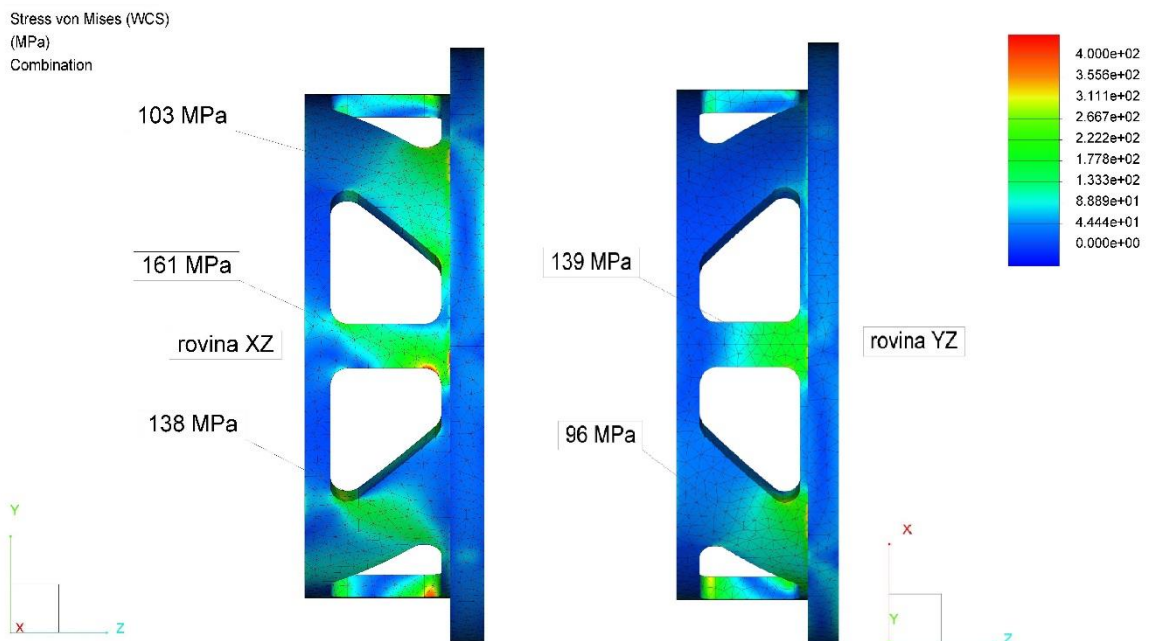
Druh prvku	Počet prvků
Beam elements	0
Tri elements	0
Quad elements	0
Tetra elements	28 321
Wedge elements	0
Brick elements	0
Points	7 528
Edges	41 077
Faces	61 846
Solids	28 321

Tab. 6.: Výchozí mesh-sít pro MKP finálního konceptu



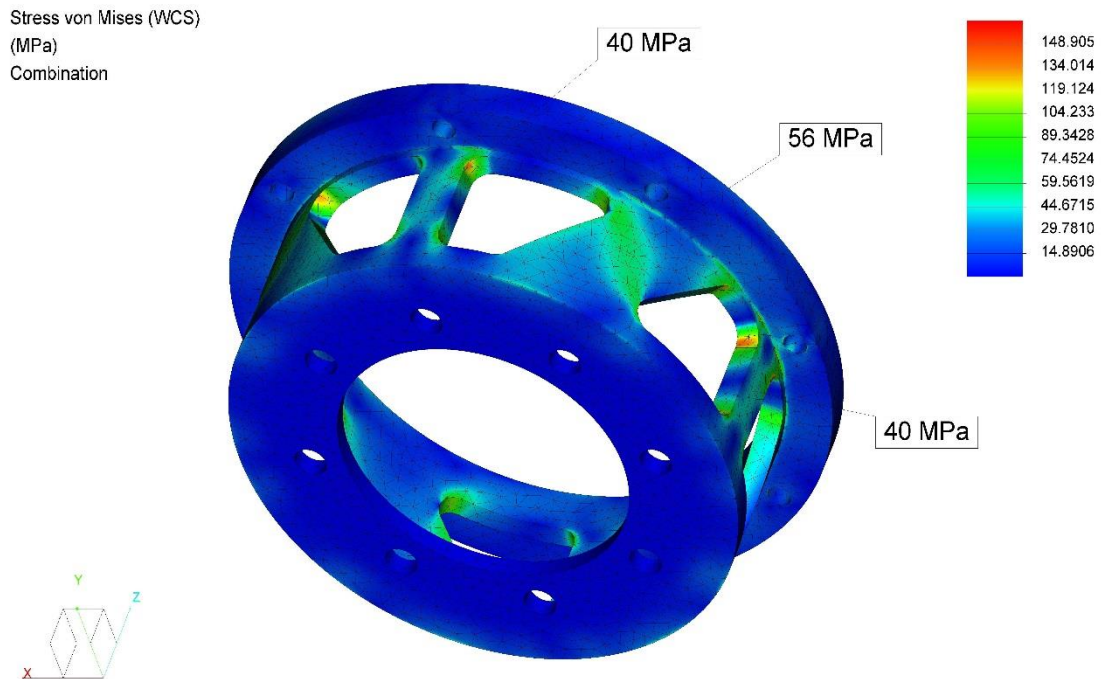
Obr. 72.: Pohled na MKP síť finálního konceptu

Na následujícím obrázku (Obr. 73) jsou vidět některé důležité hodnoty včetně maximální hodnoty napětí z plného zatížení.

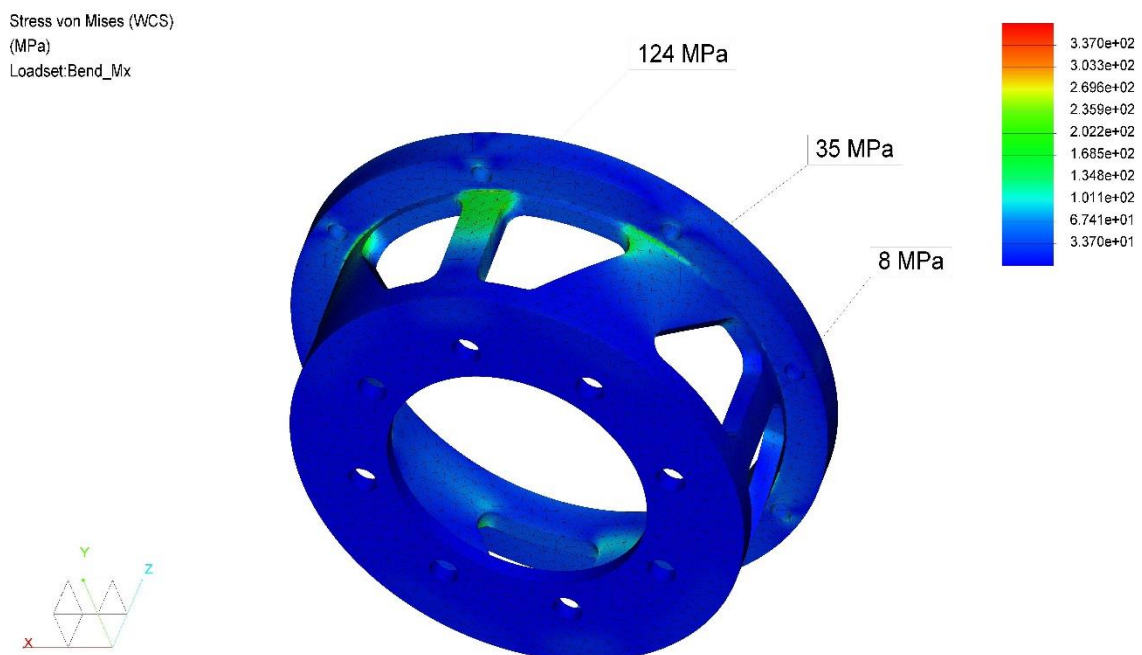


Obr. 73.: Hodnoty napětí plně zatíženého finálního konceptu

Pro deformaci od kroutícího momentu M_z už neplatí přerozdělení jako pro předchozí koncepty. Kroutící moment M_z deformuje přípravek hlavně v oblastech podélných drážek, kde vytváří nápadité křížové oblasti, kdežto u axiální síly F_z k přerozdělení nedošlo, energie teče vždy podél drážek. Vzniklé napětí od těchto dvou sil vidíme na Obr. 74.

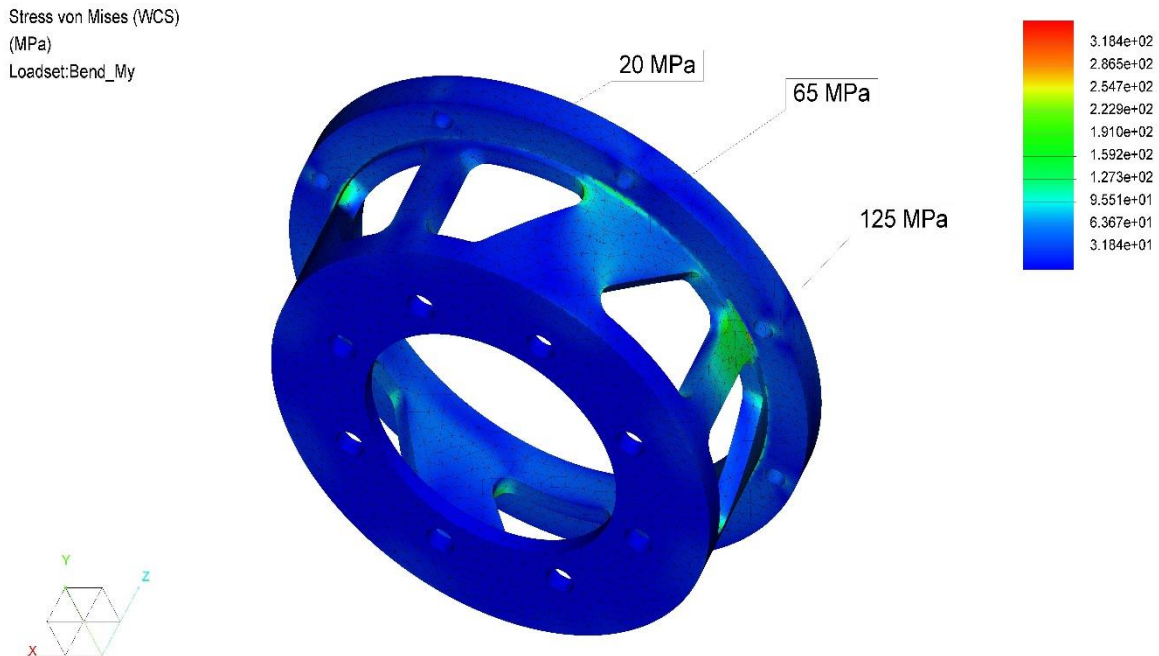


Obr. 74.: Napětí pro axiální sílu F_z a kroutící moment M_z finálního konceptu



Obr. 75.: Napětí od klopného momentu M_x finálního konceptu

Při pohledu na zatížení od klopného momentu M_x (Obr. 75) je vidět příznivé rozdělení napětí, které se projevuje hlavně v podélné drážce podél roviny YZ. Velmi obdobné rozdělení napětí bude od klopného momentu M_y (Obr. 76).

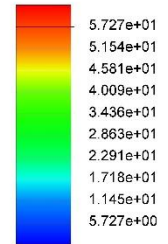
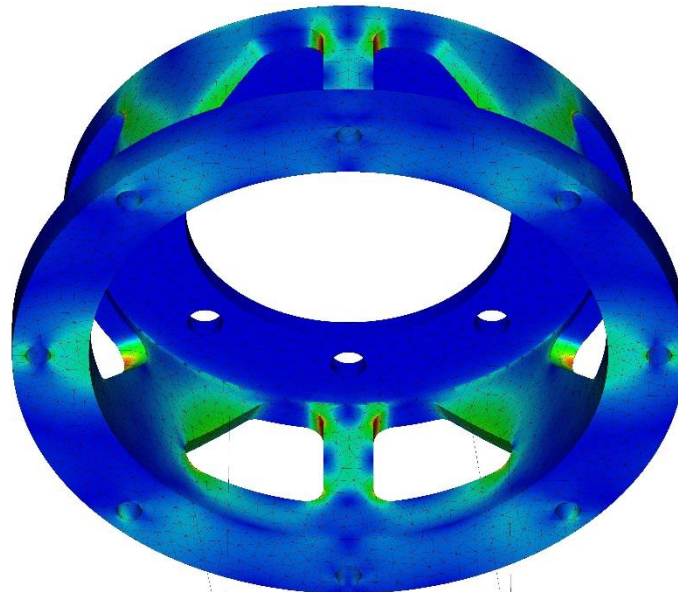
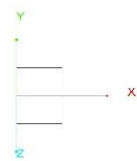


Obr. 76.: Napětí od klopného momentu M_y finálního konceptu

Tyto 4 zatížení by u tohoto přípravku měli být dobře měřitelné. Způsobují takovou velikost deformace, která je dobře měřitelná a tok energie od těchto zatížení je dobře separuje.

V poslední řadě nám chybí vykreslení pro sílu F_y a F_x . Už na začátku bylo jasné, že tyto síly bude velmi obtížné měřit, neboť nám vždy aspoň z nějaké části způsobují stejný typ a směr deformace jako ostatní zatížení. Jediná odchylka oproti ostatním zatížení je vnitřní strana vyosených drážek. Síla F_x nám způsobuje deformaci podél vnitřní drážky blíže k rovině YZ (Obr. 77), zatímco síla F_y nám způsobuje deformaci napříč tuto vyosenou drážku (Obr. 78). Tento typ deformace není však příliš vhodný, bohužel se nepodařilo nalézt lepší tvar k měření těchto sil.

Stress von Mises (WCS)
(MPa)
Loadset:Side_Fx

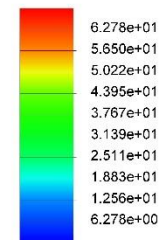
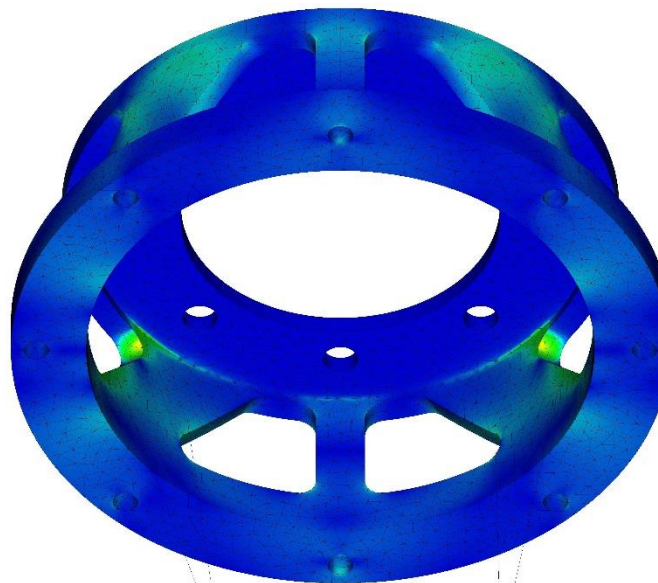
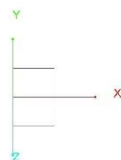


28 MPa

22 MPa

Obr. 77.: Napětí od síly Fx finálního konceptu

Stress von Mises (WCS)
(MPa)
Loadset:Vert_Fy



22 MPa

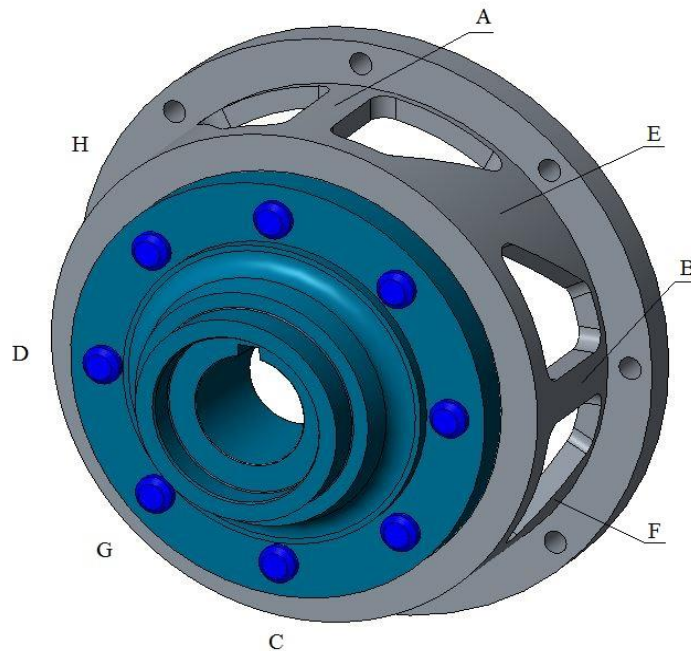
22 MPa

Obr. 78.: Napětí od síly Fy finálního konceptu

6.3 ZAPOJENÍ TENZOMETRŮ

V kapitole 6.2 jsme navrhli konstrukční návrh víceosého senzoru. Ten byl od začátku úmyslně navržen alespoň s dvěma rovinami symetrie. První důvod je takový, že senzor je rotační součástka s dvěma dvojicemi zatížení pootočený o 90° , tudíž se tyto složky budou sinusově střídát. Druhý důvod této symetrie je příprava na párování tenzometrů, jelikož se snažíme o zapojení plných mostů. Při určování poloh a konfigurace tenzometrů budeme vycházet hlavně z Tab. 2. Pro lepší přehlednost byly označeny jednotlivé deformační drážky písmeny. Drážky rovnoběžné s osou senzoru budou značeny „A“, „B“, „C“ a „D“, vyosené drážky jako „E“, „F“, „G“ a „H“. Vzestupnost drážek určuje pravotočivý systém, kdy kladný směr osy otáčení určuje směr z nakladače směrem ke kolům u pravé strany podvozku (z pohledu řidiče). Písmenem „A“ začíná drážka, která je rovnoběžná s drážkou pro pero v přípojné hřídeli podvozku. Písmenem „E“ začíná ta vyosená drážka, která je první po rovnoběžné drážce, tedy mezi „A“ a „B“ (Obr. 79). Pro směrová zatížení, tedy pro síly F_x a F_y a klopné momenty M_x a M_y bude zapotřebí použití inkrementálního čidla, které snímá natočení polohy vůči stacionární části nakladače – ideálně rám, podvozek či kabina.

Jelikož se předpokládá výroba střední části ze silnostěnné trubky, která bude po obou průměrech soustružena, je možné využít vnitřní i vnější stranu.

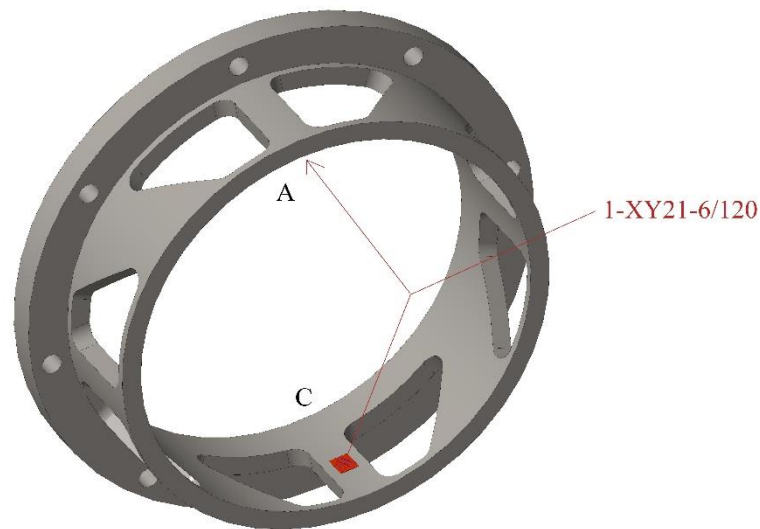


Obr. 79.: Značení deformačních drážek

6.3.1 MĚŘENÍ KROUTÍCÍHO MOMENTU

K měření kroučícího momentu M_z využijeme vnitřní stranu drážek „A“ a „C“. To je pro nás velice výhodné, neboť neobsadíme rovnoběžné drážky na vnější straně. Vzhledem k rovnoměrnosti napětí na těchto drážkách si můžeme dovolit i ty největší typy tenzometrů pro měření kroučícího momentu od firmy HBM včetně místa pro pájecí pole.

Typ tenzometrů	1- XY21-6/120
Počet tenzometrů	2 ks
Konfigurace zapojení	Plný most
Jmenovitý odpor	120 Ω
Maximální excitační napájení	11 V
<i>Tab. 7.: Parametry můstku pro kroučící moment M_z</i>	



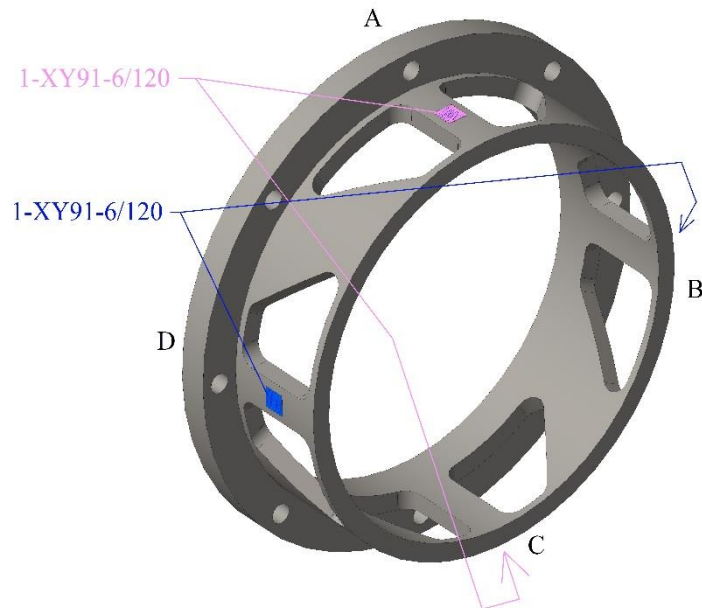
Obr. 80.: Tenzometry pro kroučící moment M_z

6.3.2 MĚŘENÍ KLOPNÝCH MOMENTŮ

K měření klopného momentu M_x využijeme opět drážek „A“ a „C“, tentokrát však vnější plochu. I zde máme velmi dobré zástavbové prostory jak pro tenzometry, tak i pro pájecí pole. K měření klopného momentu M_y využijeme vnějších ploch drážek „B“ a „D“.

Typ tenzometrů	1- XY91-6/120
Počet tenzometrů	2 ks
Konfigurace zapojení	Plný most
Jmenovitý odpor	120 Ω
Maximální excitační napájení	5,5 V
<i>Tab. 8.: Parametry můstku pro klopný moment M_x</i>	

Typ tenzometrů	1- XY91-6/120
Počet tenzometrů	2 ks
Konfigurace zapojení	Plný most
Jmenovitý odpor	120 Ω
Maximální excitační napájení	5,5 V
<i>Tab. 9.: Parametry můstku pro klopný moment M_y</i>	



Obr. 81.: Tenzometry pro klopné momenty M_x a M_y

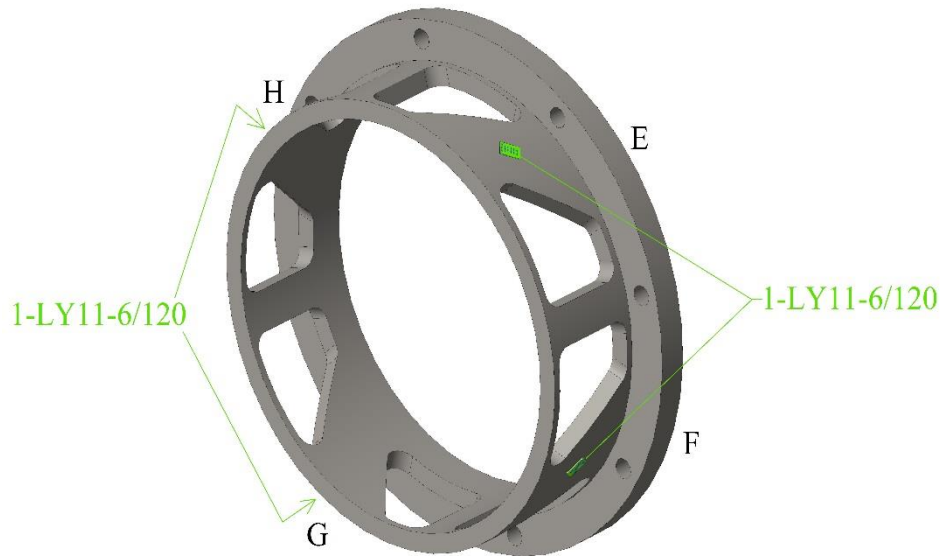
6.3.3 MĚŘENÍ AXIÁLNÍ SÍLY

K měření axiální síly F_z jsou primárně určeny vnější plochy vyosených drážek „E“ až „H“. Poloha pro jednoosé tenzometry na šikmých drážkách budou uprostřed drážek rovnoběžně s nimi. Konfigurace zapojení by byla opět do plného mostu a k použití se nabízí lineární neboli jednoosé tenzometry.

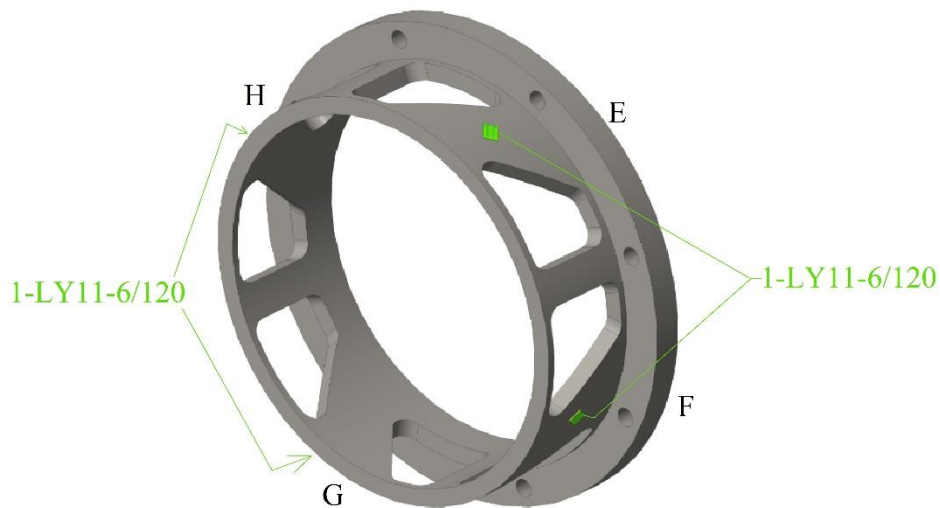
Nabízí se alternativní cesty k měření axiální síly F_z . Druhá možnost je zachování polohy tenzometrů původního návrhu, jen stočení o 45° tak, aby příčný směr byl podél této vyosené drážky.

Třetí možnost je taková, že by šlo ještě využít vnitřních ploch drážek „B“ a „D“. V tomto případě bychom však mohli využít pouze půl mostové konfigurace, která má poloviční citlivost oproti plnému mostu. Vzhledem k tomu, že deformace od této síly jsou ze všech nejmenší, mohl by to být problém. Pro reálné použití je zapotřebí tyto varianty vyzkoušet.

Typ tenzometrů	1- LY11-6/120
Počet tenzometrů	4 ks
Konfigurace zapojení	Plný most
Jmenovitý odpor	120 Ω
Maximální excitační napájení	8 V
<i>Tab. 10.: Parametry 1. a 2. varianty můstku pro axiální síly F_z</i>	

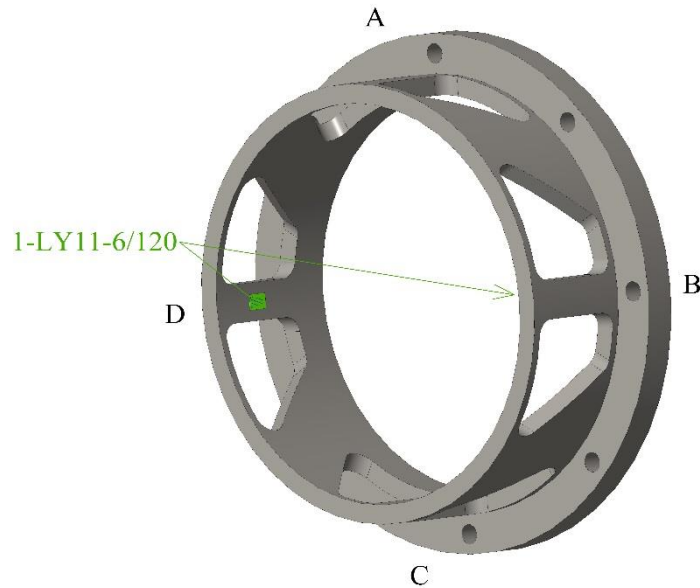


Obr. 82.: Varianta č.1 pro tenzometry pro axiální sílu F_z



Obr. 83.: Varianta č.2 pro tenzometry pro axiální sílu F_z

Typ tenzometrů	1- LY11-6/120
Počet tenzometrů	2 ks
Konfigurace zapojení	Půl most most
Jmenovitý odpor	120 Ω
Maximální excitační napájení	8 V
<i>Tab. 11.: Parametry 3. varianty můstku pro axiální síly F_z</i>	



Obr. 84.: Varianta č.3 pro tenzometry pro axiální sílu F_z

6.3.4 MĚŘENÍ SVISLÉ A PODÉLNÉ SÍLY

Jak bylo řečeno dříve, měření sil F_x a F_y není vůbec jednoduché. K první variantě by šlo použít čtyř tenzometrických křížů XY11, které by se umístily na vnitřní stranu vyosených drážek blíže vždy podél vyoseného vybrání.

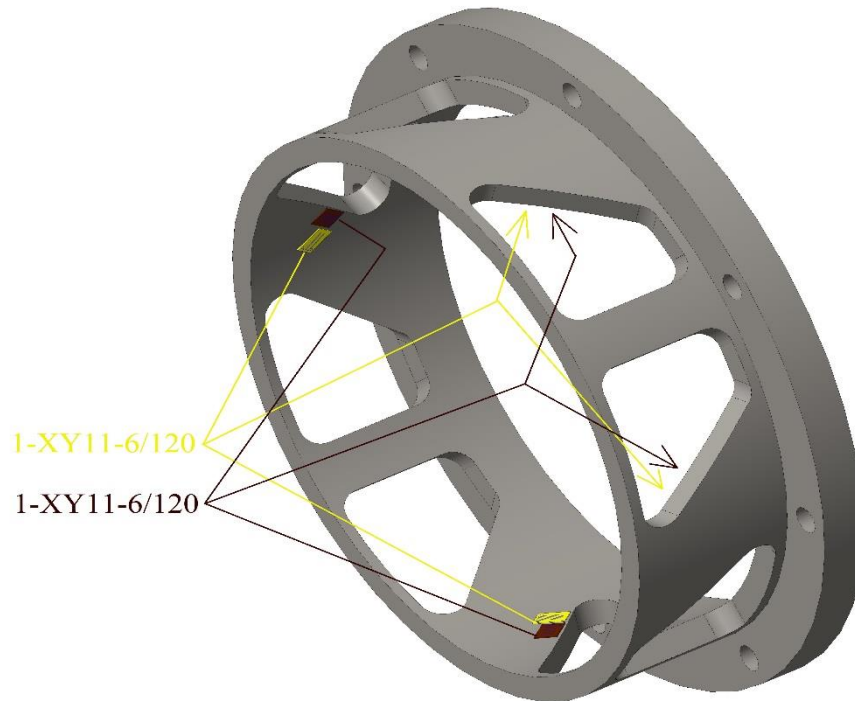
Druhá varianta je umístění tenzometrů XY91 doprostřed drážek tak, aby jeden směr byl rovnoběžný s rovinou drážky a druhý na tento směr kolmý. Oba způsoby měření se však vymykají běžnému měření a je zapotřebí je vyzkoušet.

Typ tenzometrů	1- XY11-6/120
Počet tenzometrů	4 ks
Konfigurace zapojení	Plný most
Jmenovitý odpor	120 Ω
Maximální excitační napájení	12 V

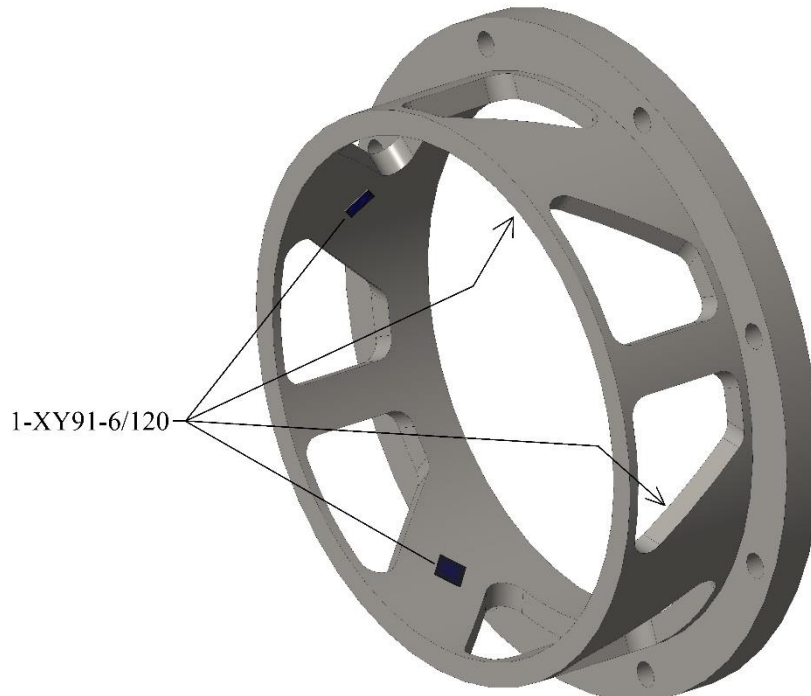
Tab. 12.: Parametry 1. varianty můstku pro síly F_x a F_y

Typ tenzometrů	1- XY91-6/120
Počet tenzometrů	4 ks
Konfigurace zapojení	Plný most
Jmenovitý odpor	120 Ω
Maximální excitační napájení	5.5 V

Tab. 13.: Parametry 2. varianty můstku pro síly F_x a F_y

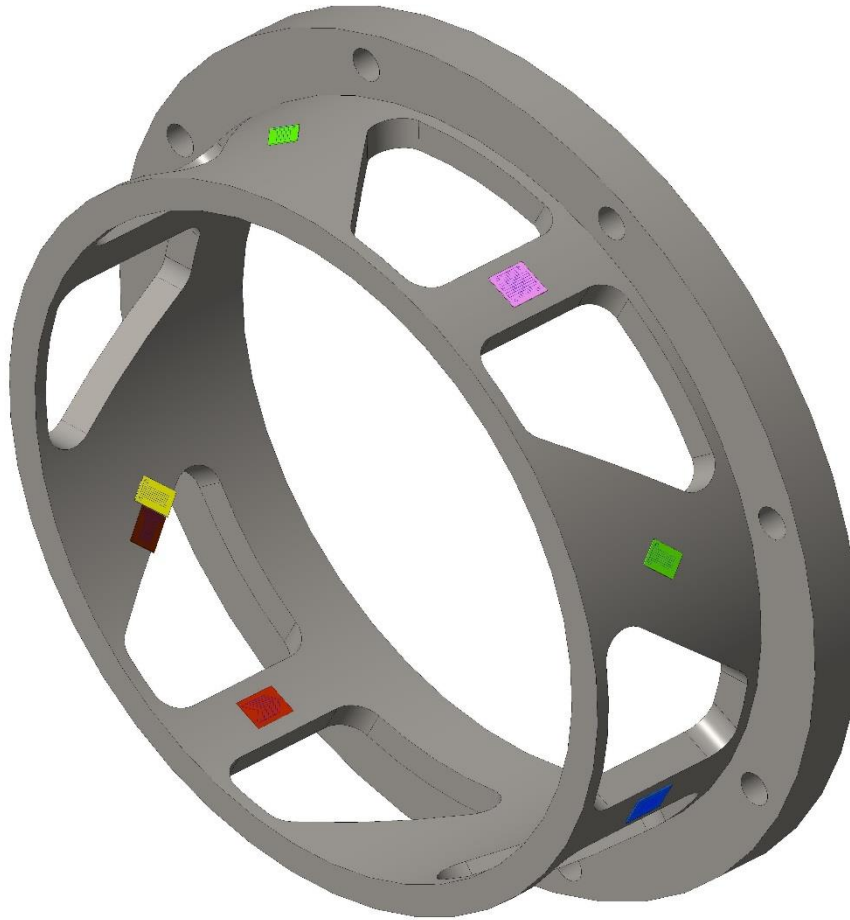


Obr. 85.: Varianta č.1 pro tenzometry pro síly F_x a F_y



Obr. 86.: Varianta č.2 pro tenzometry pro síly F_x a F_y

Na následujícím obrázku (Obr. 87) je možná varianta rozmístění všech tenzometrů.



Obr. 87.: Možná varianta pro rozmístění tenzometrů

Určení varianty, která je nejlepší, je možné pouze fyzickou realizací. Je zapotřebí provést kalibraci tohoto zařízení a poté zkušebním zatížením, u kterého známe přesnou hodnotu, porovnat odchylky naměřených hodnot a stanovit citlivost a přesnost senzoru.

7 KALIBRACE [18]

Součástí návrhu senzoru je i kalibrace tohoto zařízení. Je to nedílná součást návrhu, neboť bez kalibrace a verifikace výsledků nejsme schopni určit správnost návrhu. Ačkoliv byla vynaložena maximální snaha o konstrukci takového tvaru, aby se jednotlivé složky vzájemně neovlivňovali, respektive nedocházelo k ovlivnění ostatních tenzometrů prostřednictvím jiných zatížení, reálná odezva měřicího zařízení se vždy liší od teoretického modelu.

7.1 PRINCIP KALIBRACE

Kalibraci jako takovou obecně rozumíme proces, kdy za specifikovaných podmínek stanovíme vzájemný vztah a rozdíl mezi naměřenými hodnotami a etalonovými hodnotami, tedy hodnotami, které jsou odvozené od teoreticky přesných hodnot. Tato korekce se běžně provádí přes kalibrační konstanty. Pro náš případ se bude jednat o vyjádření mezi vstupními veličinami \underline{P} , výstupními veličinami \underline{U} a souborem kalibračních konstant \underline{C} a zbytkovými nelineárními vazbami \underline{e} . Matematicky můžeme tuto závislost zapsat jako:

$$P = CU + e(u) \quad (48)$$

Při zanedbání nelineárních vazeb dostáváme zjednodušený vztah:

$$P = CU \quad (49)$$

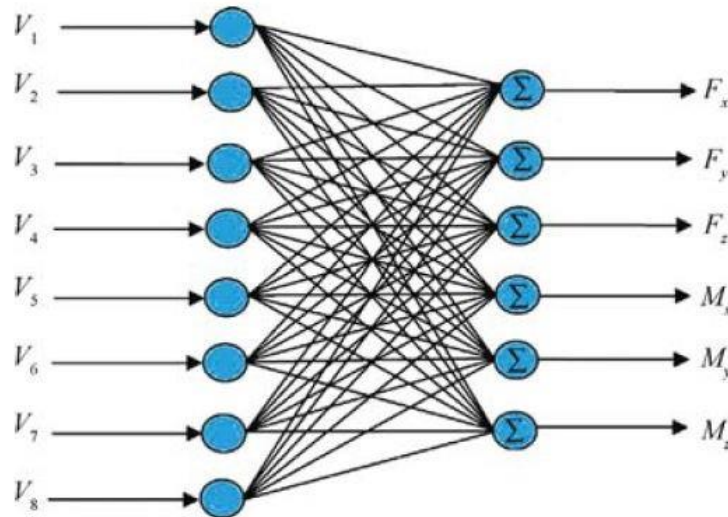
Pro náš případ 6 zatížení by tato rovnice mohla vypadat následovně:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{18} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{28} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{61} & c_{62} & \cdots & c_{68} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_8 \end{bmatrix}$$

Obr. 88.: Možná podoba vztahu pro kalibraci [18]

Při kalibraci je tedy nezbytné znát i přesné vstupní hodnoty, které jsou reprezentovány jednotlivými zatíženími. Kompletní matice „C“ by měla mít lineárně nezávislé řádky i sloupce. Toho lze docílit pouze postupným zatěžováním senzoru jednotlivě tak, aby do systému vždy vstupovala pouze jedna veličina. Pro projetí všech zátěžných veličin, v našem případě tedy třemi silami a třemi momenty, bychom měli dostat koeficienty matice „C“. V ideálním případě by měla matice „C“ vyjít taková, že při zatížení obecnou veličinou p_i a vynásobením bychom měli dostat hodnotu pouze u_i , ostatní veličiny u by měli být nulové.

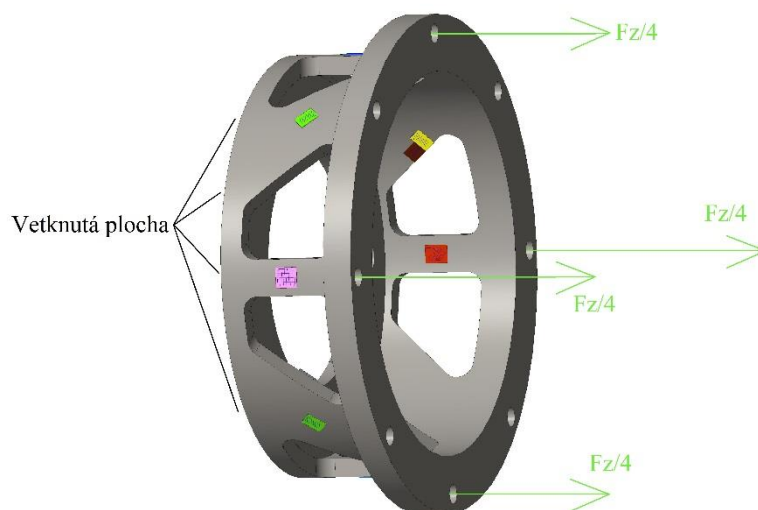
Takový případ je však velmi ojedinělý. To, jak moc je senzor dobře navržený se dá vyhodnocovat právě dle zbytkových hodnot matice „U“. Na Obr. 89 je vidět princip získávání naměřených hodnot.



Obr. 89.: Princip selekce jednotlivých veličin [18]

7.2 REALIZACE KALIBRACE

Podstatnou částí kalibrace je i fyzická realizace vstupních hodnot. Ty musí mít správný směr i hodnotu. Navíc je důležité dát si pozor na to, aby do experimentu nevstupovali parazitní síly od kalibrace jako např. vlastní tíha či velká odchylka hodnot zatížení. Součástí firemní laboratoře jsou dvojčinné pracovní válce, siloměry a dynamometr. Tato výbava plně postačí k realizaci kalibrace. Jak by mohla vypadat část takové kalibrace je vidět na Obr. 90. Tímto stylem bychom přivedli do senzoru prostou axiální sílu.



Obr. 90.: Příklad zatížení axiální síly F_z



Pokud bychom modifikovali směry zatížení, mohli bychom takto kalibrovat i zbylá zatížení kromě kroutícího momentu M_z . Ten by byl kalibrován pomocí dynamometru.

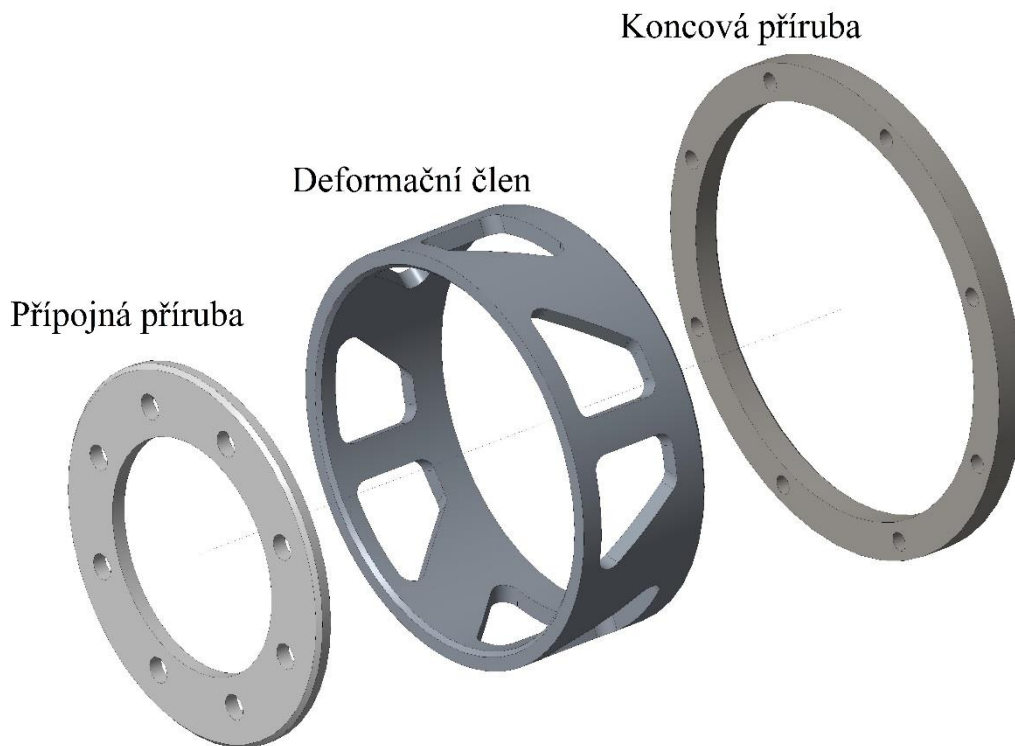
Konkrétní realizace a použití daných přípravků či jiných však bude z velké části v režii testovacího oddělení prototypové laboratoře. Toto oddělení svými znalostmi a zkušenostmi dalece přesahují ty moje.

8 VÝROBA KONCEPTU A INSTALACE

Jak už bylo párkrát zmíněno v předchozích kapitolách, hlavní část senzoru, tedy deformační díl, bude vyráběn jako svařenec ze tří kusů. Tento svařenec se dále upevní na přírubu podvozku (Obr. 43), která je neměnná od sériově vyráběného podvozku pro nakladače. Na tento se svařenec se pomocí adaptéru pro konkrétní ráfek připevní modifikovaný ráfek a dále se celé kolo zakrytuje speciálně navrženým krytem.

8.1 SVAŘENEC KONCEPTU

Přípojná a koncová část příruby bude vypálena z plechů, střední část bude obrobek ze silnostěnné trubky. Jednotlivé části lze vidět na rozpadu celé součásti na Obr. 91:



Obr. 91.: Rozpad svařence

Jelikož lze očekávat deformace vlivem svařování, je vhodné díly vypálit s technologickým přesahem tak, aby mohl být celý přípravek ještě soustružen do požadovaných rozměrů. U přípravku je zapotřebí dodržení sousosti všech tří částí a rovnoběžnost dosedacích ploch. Doporučené přídavky na obrábění pro jednotlivé komponenty:

Přípojná příruba – plech

- Vnitřní průměr: 150 mm oproti 163,2 mm
- Vnější průměr: 273,5 mm oproti 260 mm
- Tloušťka plechu: 14 mm oproti 10 mm

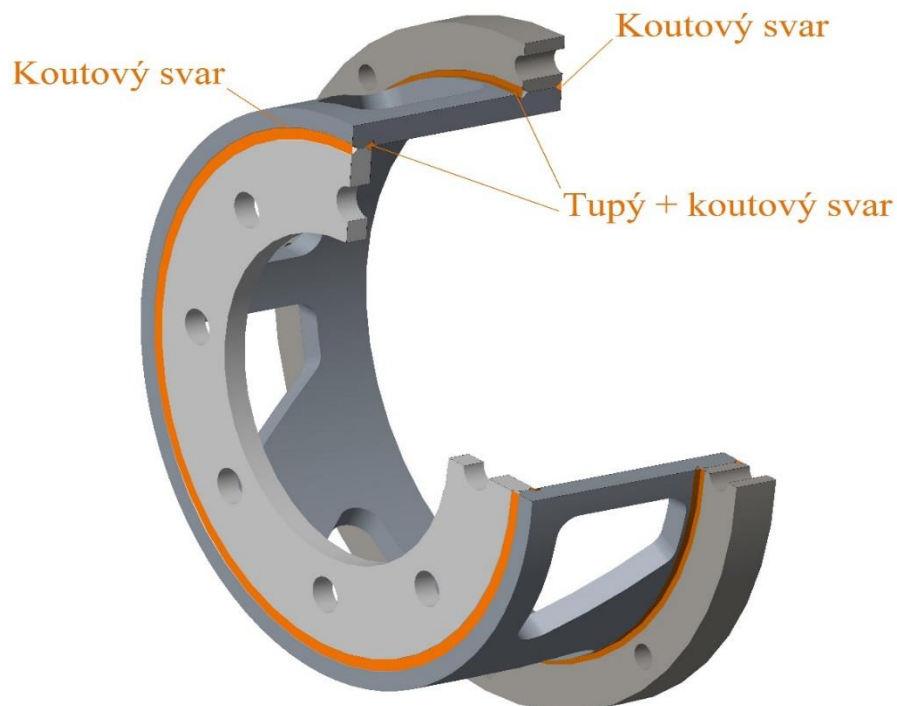
Deformační člen – silnostěnná trubka (popř. kruhová tyč)

- Vnitřní průměr: 253,7 mm oproti 260 mm (dáno rozměrem kupované trubky)
- Vnější průměr: 293,7 mm oproti 285 mm (dáno rozměrem kupované trubky)
- Délka: 120 mm oproti 105 mm

Koncová příruba – plech

- Vnitřní průměr: 274 mm oproti 285 mm
- Vnější průměr: 350 mm oproti 337 mm
- Tloušťka plechu: 24 mm oproti 20 mm

Svařenec dále bude svařen čtyřmi obvodovými svary – dva mezi deformačním členem a přípojnou přírubou a dva mezi deformačním členem a koncovou přírubou. Jelikož současné ráfky jsou svařeny ze dvou plechů nejčastěji tloušťky 5 mm a jedním obvodovým koutovým svarem 4 mm, rozhodnul jsem se pro zachování velikosti svaru 4 mm. Vzhledem ke dvojnásobnému počtu svarů lze tento přípravek prohlásit za dostatečně nadimenzovaný co se napětí ve svarech týče. U obráběných ploch musí být použito koutových svarů, aby po obrobení na svařenci svary zůstaly. Svařenec ve tříčtvrtinovém řezu lze vidět na Obr. 92:



Obr. 92.: Svařenec ve 3/4 řezu

8.2 INSTALACE

Poslední částí této kapitoly je samotná instalace nejen senzoru, ale všech doplňkových komponent. Vzhledem k povaze pracovního terénu je nutné nejen tenzometry opatřit krycími prostředky, ale i celý senzor nějakým způsobem chránit. Pro ochranu tenzometrů a příslušenství budou pravděpodobně použity ochranné tmely a silikony firmy HBM, které budou doplněny o lak. Stejně tak je zapotřebí znát aktuální natočení hřídele, k čemuž použijeme již zmiňovaný rotační inkrementální snímač. Dále byly vytvořeny dodatečné kryty pro lepší ochranu měřící aparatury. Zároveň aby bylo možné na senzor namontovat kolo, je nutné modifikovat ráfek. Úprava na ráfku není nikterak komplikovaná, je však zapotřebí provádět takové změny, aby kolo zůstalo vzhledem k podvozku ve stejné pozici jako kdyby měřící senzor nainstalován vůbec nebyl.

Možná úprava ráfku včetně nasazené pneumatiky je vidět na následujícím Obr. 93



Obr. 93.: Upravený ráfek pro senzor

Střední část ráfku, se kterou je běžně spojená příruba podvozku byla odebrána a na koncovou část ráfku přijde plech, který je po obvodu svařen. Do tohoto plechu j vytvořena skupina děr a skupina závitů na dvou různých roztečných průměrech. Na menším průměru jsou vytvořeny díry o $\varnothing 13$ mm, skrz které přijdou šrouby M12 a připevňují ráfek s koncovou přírubou samotného senzoru. Na větším průměru jsou připraveny závity M6 pro budoucí kryt. Uprostřed ráfku je ještě navařený plech, kam přijde těsnění, které bude chránit vnitřek kola z druhé strany. Všechny tyto úpravy je možné provést na prototypové dílně firmy nebo si od dodavatele s prodlouženou dobou dodání nechat takto navržená kola dodat.

Takto modifikovaný ráfek s kolem přijde nasadit na již zmíněnou koncovou přírubu senzoru a stáhne se šrouby M12.



Obr. 94.: Nasazený ráfek na senzoru

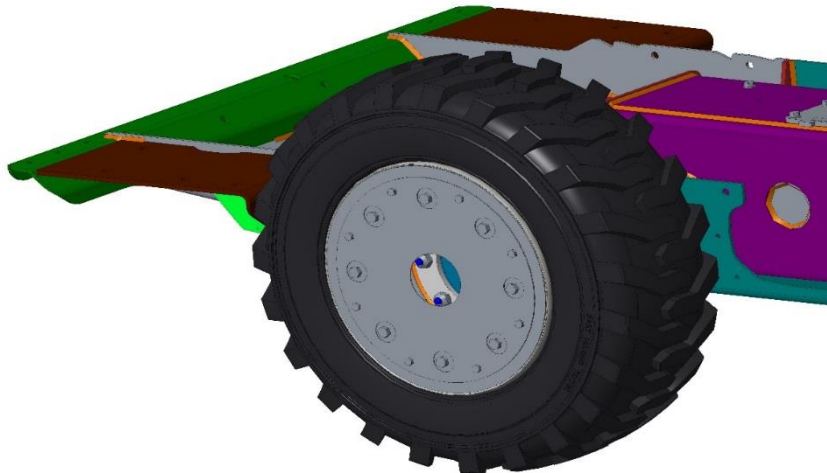
Tato celá sestava přijde nasadit na připojovací přírubu podvozku a utáhne se kolovými palcovými šrouby.



Obr. 95.: Senzor s ráfkem na přírubě podvozku

Dále zbývá namontovat krycí plech na modifikovaný ráfek. Uprostřed tohoto plechu je díra o průměru 100 mm – do této díry přijde stahovatelná průchodka nebo systém průchodek, které umožní průchod kabelů, ale zároveň těsní vnitřní prostor před nečistoty. Dalšího těsnění bude použito na opačnou stranu ráfku, kde by mohlo být použito „V-kroužku“ nebo silikonového těsnění. Součástí instalace musí buď sběrné kroužky, které nám převádí signál z rotujícího senzoru na stacionární část nakladače jako je například rám nebo

další variantou je možnost přenesení signálu pomocí bezdrátového Wi-Fi přenosu. Zvolený druh přenosu signálu bude konzultován s testovacím oddělením firmy a vybrán způsob odpovídající zvyklostem testování. Na následujících dvou obrázcích je vidět pohled na sestavený přípravek a na přípravek v rozpadu, na kterém je dobře vidět jednotlivé části.



Obr. 96.: Nasazený krycí plech na ráfku



Obr. 97.: Nasazený krycí plech na ráfku

9 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce byl na základě rešerše návrh vyměnitelného měřicího senzoru pro měření zatížení kol u smykově řízených nakladačích S400⁴ firmy Bobcat. Nejprve byla vypracovaná teorie ohledně přetvoření a důsledcích deformace na měření napjatosti. Součástí rešerše bylo také sepsání problematiky ohledně odporové tenzometrie, která se zabývala jak samotnými tenzometry, tak i instalací, ochranou a jednotlivými konfiguracemi zapojení. Při samotném návrhu byla dále provedena rešerše ohledně nabízených víceosých snímačů na trhu a prozkoumání některých možností řešení.

Velmi důležitou částí práce byla experimentální část, kde bylo vyzkoušeno teoretických poznatků, prohloubení znalostí ohledně měření, verifikace principů měření a v neposlední řadě praktická stránka věci, kdy bylo vyzkoušeno aplikace tenzometrů, správné zapojení a následné sledování provázanosti teoretických poznatků a reálného měření. Realizovaný pokus byl úmyslně zjednodušen a neobsahoval všechny složky možných zatížení, avšak byly na něm verifikovány teoretické poznatky a např. dokázána vzájemná neovlivnitelnost mezi kroutícím momentem a ohybovým momentem při daném zapojení.

V další části již probíhal samotný návrh konstrukčního provedení snímače, kdy pomocí MKP analýzy v nástavbě softwaru Creo 3.0 Simulate byly vytvořeny možné koncepty snímače a porovnány jednotlivé výhody a nevýhody daných konceptů. Postupnou optimalizací byl navržen výsledný tvar přípravku, který byl potom podrobněji popsán co se jednotlivých zatížení týče a byla provedena optimalizace ohledně umístění tenzometrů. Jelikož nejsou známy přesné velikosti možných zatížení, ale byl stanoven pouze předpokládaný rozsah, je možné, že naměřené veličiny nebudou dosahovat zadaných parametrů. Přesto pokud však dojde k fyzické realizaci, bude mít tento návrh značný význam ohledně lepšího stanovení možného zatížení. Finální tvar přípravku splňuje klíčovou vlastnost, a tou je možnost vyměnitelnosti mezi jednotlivými nakladači. Součástí návrhu jsou též varianty umístění tenzometrů včetně zvolené konfigurace zapojení a použití jednotlivých typů tenzometrů.

Součástí práce byl také stručně popsán princip kalibrace a vysvětlení důležitosti kalibračních konstant včetně nastínění možného způsobu fyzické realizace.

V poslední části práce byla vypracována potencionální výroba finálního konceptu měřicího čidla s ohledem na technologické požadavky a popsána instalace celého zařízení včetně modifikace ráfku a navržení krytů pro lepší ochranu.

Výsledkem tohoto návrhu by měla být fyzická realizace senzoru a následná instalace na nakladač, který by měl na definovaných polygonech sbírat cenné údaje ohledně zatížení na jednotlivých kolech nakladače při různých režimech jízdy a práce. Toto zjištěné zátěžné spektrum by později mělo být přeneseno na testovací stand, který bude simulovat toto zatížení, čímž by mělo dojít k úspoře financí, času a faktoru lidské práce.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [1]

1. Generator.citace.com. Citace.com [online]. 2018 [cit. 2018-07-04]. Dostupné z WWW: <<https://www.citacepro.com/>>
2. MICHALEC, Jiří a kolektiv. Pružnost a pevnost I. 3. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 9788001042243.
3. HBM, Karl Hoffmann: Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen a HBM, Karl Hoffmann: An Introduction to Stress Analysis using Strain Gauges. [online]. [cit. 2018-07-04]. Dostupné z: <https://www.hbm.com/en/>
4. <http://people.fsv.cvut.cz/~machacek/prednaskyNerez/Nerez-2.pdf> [online]. [cit. 2018-07-04]
5. ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. Strojírenská metrologie. Skriptum FSI VUT v Brně, 4. přeprac. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2005, 176 s. ISBN 80-214-3070-2.
6. VLK, Miloš, Lubomír HOUFEK, Pavel HLAVOŇ, Petr KREJČÍ, Vladimír KOTEK a Jiří KLEMENT. Experimentální mechanika[online]. Brno, 2003 [cit. 2018-07-04]. Dostupné z WWW: http://ean2011.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/opory/Experimentalni_mechanika.pdf
7. Interní podklady z firmy Doosan Bobcat EMEA s.r.o
8. Příručky a katalogy dostupné z www.hbm.com a www.hbm.cz
9. Měření malých deformací pomocí odporových tenzometrů [online]. [cit. 2018-07-04]. Dostupné z: www.fm.tul.cz/esf0247/index.php?download=724
10. Odporové tenzometry – princip, provedení, použití, historie [online]. [cit. 2018-07-04]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/foliove-odporove-tenzometry-princip-provedeni-pouziti-historie.html>
11. Experimentální metody v mechanice - VŠB [online]. [cit. 2018-07-04]. Dostupné z: http://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_007/Experimentalni%20metody%20v%20mechanice/02%20Text%20pro%20e-learning/Experimentalni%20metody%20v%20mechanice%209%20.pdf
12. Strain Gage Installations with M-Bond 200 Adhesive [online]. [cit. 2018-07-04]. Dostupné z: www.vishaypg.com/doc?11129

13. Practical hints for the installation of strain gages, by Karl Hoffmann. [cit. 2018-07-04]. Dostupné z: www.hbm.com
14. Příručky a katalogy dostupné z www.gtm-gmbh.com a www.gtm-gmbh.com/cz
15. Steel material properties [online]. [cit. 2018-07-04]. Dostupné z: https://www.steelconstruction.info/Steel_material_properties
16. S355J2H Euronorm [online]. [cit. 2018-07-04]. Dostupné z: <https://www.metaldatabank.com/reports/S355J2H.pdf>
17. Katalog dostupný na www.ferona.cz
18. YINGKUN, Ma, Xie SHILIN, Zhang XINONG a Luo YAJUN. Hybrid calibration method for six-component force/torque transducers of wind tunnel balance based on support vector machines [online]. [cit. 2018-08-02]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936113001076>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZNAČEK

a	[mm]	Okamžitá šířka tělesa
a ₀	[mm]	Původní šířka tělesa
Δa	[mm]	Absolutní zúžení tělesa
b	[mm]	Okamžitá výška tělesa
b ₀	[mm]	Původní výška tělesa
Δb	[mm]	Absolutní snížení tělesa
<u>C</u>	[-]	Matice kalibračních konstant
d	[mm]	Vnitřní průměr trubky
D	[mm]	Vnější průměr trubky
E	[MPa]	Youngův modul
F	[N]	Síla obecného charakteru
F _x	[N]	Podélná síla
F _y	[N]	Vertikální síla
F _z	[N]	Axiální síla
g	[m.s ⁻²]	Tíhové zrychlení
I	[A]	Elektrický proud
K	[-]	K-faktor
k _l	[-]	Deformační součinitel v aktivním směru
k _t	[-]	Deformační součinitel v příčném směru
l	[mm]	Okamžitá délka tělesa
l ₀	[mm]	Původní délka tělesa
Δl	[mm]	Absolutní prodloužení tělesa
m	[kg]	Hmotnost
M	[Nm]	Moment obecného charakteru
M _x	[Nm]	Klopný moment roviny x
M _y	[Nm]	Klopný moment roviny y
M _z	[Nm]	Krouťící moment
<u>P</u>	[-]	Matice vstupních veličin
q	[-]	Součinitel příčné citlivosti
R	[Ω]	Elektrický odpor
R _{p0,2}	[N.mm ⁻²]	Dohodnutá hodnota mezi kluzu
T	[°C]	Teplota
U	[V]	Elektrické napětí
<u>U</u>	[-]	Matice výstupních hodnot
U _M	[V]	Výstupní napětí Wheatstonova můstku
U _N	[V]	Vstupní napětí Wheatstonova můstku
W _o	[mm ³]	Modul průřezu v ohybu
W _k	[mm ³]	Modul průřezu v krutu

α_C	[-]	Teplotní součinitel délkové roztažnosti zkoušeného materiálu
α_M	[-]	Teplotní součinitel délkové roztažnosti materiálu mřížky
α_R	[-]	Teplotní součinitel elektrického odporu materiálu mřížky
α_0	[deg]	Úhel mezi hlavním napětím a napětím ve směru x
γ	[-]	Zkos
γ_{XY}	[-]	Zkos v rovině z
ε	[-]	Relativní prodloužení tělesa
ε_x	[-]	Relativní prodloužení tělesa ve směru osy x
ε_y	[-]	Relativní prodloužení tělesa ve směru osy y
ε_z	[-]	Relativní prodloužení tělesa ve směru osy z
ε_{ZT}	[-]	Zdánlivá deformace vyvolaná změnou ΔT
ε_1	[-]	Deformace v prvním směru hlavního napětí
ε_2	[-]	Deformace ve druhém směru hlavního napětí
μ	[-]	Poissonovo číslo
ρ	[kg.m ⁻³]	Hustota
σ	[N.mm ²]	Napětí obecné velikosti
σ_E	[N.mm ²]	Napětí mezi pružnosti
σ_{Kt}	[N.mm ²]	Napětí mezi kluzu
σ_{onam}	[N.mm ²]	Naměřené ohybové napětí
σ_{ovyp}	[N.mm ²]	Vypočtené ohybové napětí
σ_U	[N.mm ²]	Napětí mezi úměrnosti
σ_x	[N.mm ²]	Normálové napětí roviny x
σ_y	[N.mm ²]	Normálové napětí roviny y
σ_z	[N.mm ²]	Normálové napětí roviny z
σ_1	[N.mm ²]	Hlavní napětí v jednom směru
σ_2	[N.mm ²]	Hlavní napětí ve druhém směru
τ_k	[N.mm ²]	Obecné krutové napětí
τ_{knam}	[N.mm ²]	Naměřené krutové napětí
τ_{kvyp}	[N.mm ²]	Vypočtené krutové napětí
τ_x	[N.mm ²]	Smyková složka napětí roviny x
τ_y	[N.mm ²]	Smyková složka napětí roviny y
τ_z	[N.mm ²]	Smyková složka napětí roviny z
u_x	[N.mm ²]	Obecná napjatost roviny x
u_y	[N.mm ²]	Obecná napjatost roviny y
u_z	[N.mm ²]	Obecná napjatost roviny z
ČSN		Česká státní norma
EMEA		Europe Middle East and Africa
EN		Evropská norma
LDR		Loader
MKP		Metoda konečných prvků
SG		Strain gauge

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.: Smykem řízený nakladač firmy Bobcat [7].....	1
Obr. 2.: Smykem řízený nakladač firmy Bobcat [2].....	4
Obr. 3.: Pracovní diagram měkké ocele [2]	5
Obr. 4.: Pracovní diagram tvrdé ocele [4].....	6
Obr. 5.: Elementární hranolek s vyznačenou rovinou ξ [2].....	7
Obr. 6.: Prostorová napjatost určená šesti složkami napětí [2].....	8
Obr. 7.: Odporové tenzometry firmy HBM [8].....	9
Obr. 8.: Části foliového tenzometru [3]	10
Obr. 9.: Deformace tenzometrů [10]	10
Obr. 10.: Schéma vodiče při zatížení [9]	11
Obr. 11.: Deformace mřížek s ohledem na směr zatížení [3]	12
Obr. 12.: Rozložení deformací u vrubové součástky pod zatížením [3]	14
Obr. 13.: Mechanická hystereze [3].....	14
Obr. 14.: Závislost snížené citlivosti vlivem krátké délky měřící mřížky [3]	15
Obr. 15.: Odchylka měřené deformace k teoreticky lineární měřené deformaci [3]	17
Obr. 16.: Příklady zdánlivé deformace pro různé materiály [3].....	18
Obr. 17.: Závislost elektrického odporu mřížky na teplotě [3]	19
Obr. 18.: Závislost zdánlivé deformace na teplotě pro různé materiály [3]	19
Obr. 19.: Schéma drátkového tenzometru [6].....	22
Obr. 20.: Foliové tenzometry firmy HBM [8]	23
Obr. 21.: Polovodičové tenzometry firmy HBM [8]	24
Obr. 22.: Foliový tenzometr firmy HBM pro jednoosou napjatost [8].....	25
Obr. 23.: Tenzometrický řetězec KY firmy HBM [8]	26
Obr. 24.: Tenzometrické kříže firmy HBM [8]	27
Obr. 25.: Rozložení mřížek u tenzometrických křížů [3]	27
Obr. 26.: Rozložení mřížek u tenzometrických růžic [3]	28
Obr. 27.: Pravoúhlá tenzometrická růžice [11].....	28
Obr. 28.: Rovnostranná tenzometrická růžice [11].....	29
Obr. 29.: Postup instalace dle firmy Vishay	34
Obr. 30.: Postup instalace dle firmy Vishay	34
Obr. 31.: Postup instalace dle firmy Vishay	34
Obr. 32.: Postup instalace dle firmy Vishay	34
Obr. 33.: PU 120 od HBM	37
Obr. 34.: NG 150 od HBM	37
Obr. 35.: AK 22 od HBM.....	37
Obr. 36.: SG 250 od HBM.....	37
Obr. 37.: Schéma zapojení Wheatstonova můstku [5]	38
Obr. 38.: Schéma celého Wheatstonova můstku [5]	39
Obr. 39.: Zapojení plného Wheatstonova můstku [3]	41
Obr. 40.: Zapojení půl mostu Wheatstonova můstku [3]	41
Obr. 41.: Zapojení čtvrt mostu Wheatstonova můstku [3].....	42
Obr. 42.: Třívodičové zapojení čtvrt mostu Wheatstonova můstku [3]	42
Obr. 43.: Podvozek nakladače s přípojnou přírubou pro kola	45
Obr. 44.: Testovací stand s upevněnou trubkou.....	46
Obr. 45.: Průřez trubky	46
Obr. 46.: Schéma rozložení tenzometrů a přípojných sil.....	47
Obr. 47.: Přípravek pro testování	48
Obr. 48.: Upnutá trubka ve standu s nasazeným přípravkem	48
Obr. 49.: Závislost napětí od kroutícího momentu na hmotnosti	51
Obr. 50.: Závislost napětí od ohybového momentu na hmotnosti]	51
Obr. 51.: Víceosé snímače firmy GTM [14].....	52

Obr. 52.: Víceosé snímače MCS10 firmy HBM [8]	53
Obr. 53.: Víceosý snímač firmy Interface [15]	53
Obr. 54.: Rozměry konceptu č.1	55
Obr. 55.: Vetknutí a zatížení konceptu č.1.....	55
Obr. 56.: Porovnání děr přírub konceptu č.1	56
Obr. 57.: Napětí při celkovém zatížení konceptu č.1	56
Obr. 58.: Rozměry konceptu č.2	58
Obr. 59.: Maximální napětí od zatížení konceptu č.2	58
Obr. 60.: Napětí od axiální síly F_z konceptu č.2.....	59
Obr. 61.: Napětí od kroutícího momentu M_z konceptu č.2.....	59
Obr. 62.: Napětí od vertikální síly F_x konceptu č.2	60
Obr. 63.: Napětí od klopného momentu M_x konceptu č.2.....	60
Obr. 64.: Rozměry konceptu č.3	62
Obr. 65.: Maximální napětí od zatížení konceptu č.3	62
Obr. 66.: Napětí od axiální síly F_z a kroutícího momentu M_z konceptu č.3	63
Obr. 67.: Napětí od vertikální síly F_x konceptu č.3	63
Obr. 68.: Napětí od klopného momentu M_x konceptu č.3.....	64
Obr. 69.: Pohled na koncept č.4	65
Obr. 70.: Pohled na koncept č.5	65
Obr. 71.: Rozměry finálního konceptu.....	66
Obr. 72.: Pohled na MKP síť finálního konceptu.....	67
Obr. 73.: Hodnoty napětí plně zatíženého finálního konceptu	67
Obr. 74.: Napětí pro axiální sílu F_z a kroutící moment M_z finálního konceptu	68
Obr. 75.: Napětí od klopného momentu M_x finálního konceptu	68
Obr. 76.: Napětí od klopného momentu M_y finálního konceptu	69
Obr. 77.: Napětí od síly F_x finálního konceptu	70
Obr. 78.: Napětí od síly F_y finálního konceptu	70
Obr. 79.: Značení deformačních drážek.....	71
Obr. 80.: Tenzometry pro kroutící moment M_z	72
Obr. 81.: Tenzometry pro klopné momenty M_x a M_y	73
Obr. 82.: Varianta č.1 pro tenzometry pro axiální sílu F_z	74
Obr. 83.: Varianta č.2 pro tenzometry pro axiální sílu F_z	74
Obr. 84.: Varianta č.3 pro tenzometry pro axiální sílu F_z	75
Obr. 85.: Varianta č.1 pro tenzometry pro síly F_x a F_y	76
Obr. 86.: Varianta č.2 pro tenzometry pro síly F_x a F_y	76
Obr. 87.: Možná varianta pro rozmístění tenzometrů.....	77
Obr. 88.: Možná podoba vztahu pro kalibraci [18].....	78
Obr. 89.: Princip selekce jednotlivých veličin [18]	79
Obr. 90.: Příklad zatížení axiální síly F_z	79
Obr. 91.: Rozpad svařence.....	81
Obr. 92.: Svařenec ve 3/4 řezu	82
Obr. 93.: Upravený ráfek pro senzor	83
Obr. 94.: Nasazený ráfek na senzoru	84
Obr. 95.: Senzor s ráfkem na přírubě podvozku	84
Obr. 96.: Nasazený krycí plech na ráfku	85
Obr. 97.: Nasazený krycí plech na ráfku	85

SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Doporučené hodnoty zrnitosti brousicích médií pro zdrsnění povrchu [3]	32
Tab. 2: Orientace tenzometrů ve Wheatstonově můstku s měřitelnými veličinami [13].....	43
Tab. 3.: Naměřené a vypočtené hodnoty pro krut z experimentu	49
Tab. 4.: Naměřené a vypočtené hodnoty pro ohyb z experimentu	50
Tab. 5.: Výchozí hodnoty pro koncepty senzoru.....	54
Tab. 6.: Výchozí mesh-sít pro MKP finálního konceptu	66
Tab. 7.: Parametry můstku pro kroutící moment M_z	72
Tab. 8.: Parametry můstku pro klopný moment M_x	72
Tab. 9.: Parametry můstku pro klopný moment M_y	72
Tab. 10.: Parametry 1. a 2. varianty můstku pro axiální síly F_z	73
Tab. 11.: Parametry 3. varianty můstku pro axiální síly F_z	74
Tab. 12.: Parametry 1. varianty můstku pro síly F_x a F_y	75
Tab. 13.: Parametry 2. varianty můstku pro síly F_x a F_y	75