

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**



**EXPERIMENTÁLNÍ URČENÍ  
OSO VÉ SÍLY ŠROUBU**

JAKUB  
SOUKUP  
2020/2021

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Soukup** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **484739**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Experimentální určení osové síly šroubu**

Název bakalářské práce anglicky:

**Experimental Determination of the Axial Force of the Bolt**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Rešerše tenzometrické snímače
- 2) Namáhání šroubu
- 3) Experimentální určení axiální síly ve šroubu pomocí odporového snímače
- 4) Diskuze získaných výsledků

Seznam doporučené literatury:

- [1] Hoffmann, K.: An Introduction to Measurements using Strain Gages, 1989 HBM Darmstadt  
[2] Valenta, F., kol.: Pružnost pevnost III, 2003, ČVUT v Praze

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Karel Doubrava, Ph.D., odbor pružnosti a pevnosti FS**

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

Datum zadání bakalářské práce: **12.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13.08.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_



Ing. Karel Doubrava, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce



doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

11.5.2021

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

## Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá experimentálním určením osově síly šroubu pomocí odporových tenzometrických snímačů. V první části práce je provedena rešerše tenzometrických snímačů, čtenář je seznámen s principy tenzometrů, jejich druhy a dále pak s dostupnými řešeními měření osově síly šroubu od firem HBM a KYOWA. Ve druhé části práce je potom experimentálně změřena deformace ve šroubech namáhaných osovou silou a dané výsledky měření jsou mezi sebou porovnány.

## Abstrakt

This bachelor thesis deals with experimental determination of the axial force of the bolt by strain gauges. In the first part of thesis research is made about strain gauges, reader is acquainted with principles of strain gauges, their types and then with available solutions of measuring axial force of bolts from companies HBM and KYOWA. In the second part of thesis, the deformation in bolts loaded by axial force is experimentally measured and the measurement results are compared with each other.

## Klíčová slova

Odporové tenzometry, šroub, deformace, napětí, experimentální měření, analytické řešení, analýza v programu Abaqus

## Keywords

Strain gauges, bolt, deformation, stress, experimental measuring, analytical calculation, analysis in program Abaqus

## Čestné prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci na téma Experimentální určení osově síly šroubu vypracoval sám s použitím odborné literatury a zdrojů, uvedených v seznamu literatury a zdrojů.

## Poděkování

Tímto bych rád poděkoval Ing. Karel Doubrava, Ph.D. za odborné vedení, za trpělivost a ochotu při řešení této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval své rodině a nejbližším přátelům za podporu při celé době mého studia.

## Obsah

Úvod .....	7
Odporové tenzometrické snímače .....	7
1.1 Použití tenzometrického snímače .....	7
1.2 Princip tenzometrického snímače.....	7
1.2.1 Tenzometrická rovnice .....	7
1.2.2 Deformační součinitel tenzometru.....	8
1.3 Způsob měření malých změn odporů .....	8
1.3.1 Wheatstonův můstek .....	9
1.4 Můstkové zapojení tenzometrů.....	10
1.4.1 Čtvrtmostové zapojení .....	10
1.4.2 Polomostové zapojení .....	10
1.4.3 Plnomostové zapojení .....	10
1.5 Teplotní závislost tenzometrů .....	11
1.5.1 Samokompenzační tenzometry .....	11
1.6 Výběr tenzometru a určení hlavních napětí .....	11
1.6.1 Jednoosá napjatost.....	12
1.6.2 Dvouosá napjatost – známe směry hlavních napětí.....	12
1.6.3 Dvouosá napjatost – neznáme směry hlavních napětí.....	13
1.7 Rozdělení tenzometrů.....	14
1.7.1 Kovové tenzometry.....	14
1.7.2 Polovodičové tenzometry.....	16
1.8 Aplikace tenzometrů .....	16
1.8.1 Mechanické očištění .....	17
1.8.2 Chemické očištění.....	17
1.8.3 Připevnění tenzometru.....	17
1.8.4 Krytí tenzometru krycími prostředky .....	18
Dostupná řešení měření síly ve šroubu .....	18
1.9 Tenzometry HBM: LB11 & TB21.....	18
1.9.1 LB11 .....	19
1.9.2 TB21 .....	19
1.9.3 Aplikace LB11 & TB21 .....	19

1.10	Tenzometr KYOWA: KFB .....	20
1.10.1	Odchylka měření.....	21
	Početní analýza šroubu .....	21
1.11	Analytické řešení.....	21
1.12	Analýza v programu Abaqus .....	21
	Experimentální měření.....	25
1.13	První měření.....	25
1.14	Druhé měření .....	28
1.15	Třetí měření.....	28
	Porovnání výsledků .....	30
	Závěr .....	33
	Seznam literatury a zdrojů .....	35
	Seznam použitých veličin .....	35
	Seznam obrázků .....	36
	Seznam tabulek .....	36

## Úvod

Šrouby patří mezi základní součásti, kterými jsou spojovány většiny dnešních strojních konstrukcí, aby byla zajištěna jejich plná funkčnost, musí být tyto konstrukce šroubem pevně stlačeny. To naopak způsobuje napínání šroubu předpětovou silou a jeho následnou deformaci tahem. Čím je předpětí ve šroubovém spoji vyšší, tím je spoj pevnější a lépe odolává zatížení, proto je nutné, aby byl moment síly při utahování, který se získá utažením momentovým klíčem dostatečný. Teoretická hodnota momentu síly a tedy i síly, která by měla způsobit dostatečné předpětí ve šroubu však kvůli některým nejistotám, jako například tření na podložce, nemusí stačit, proto je nutné znát skutečnou hodnotu napětí, které ve šroubu působí a jestli je dostatečné. Takto zatěžované šrouby se tedy musí testovat, změřit v nich napětí a z daných výsledků měření následně dané šrouby utáhnout, pokud není předpětí dostatečné. Způsobů měření napětí nebo deformace je mnoho, používají se mechanické snímače nebo různé optické metody, mezi nejpoužívanější způsoby, ale patří měření odporovými tenzometrickými snímači. Odporové tenzometry jsou relativně levné, přesné a dají se použít na šrouby většiny velikostí. Tato práce pojednává o odporových tenzometrech a o jejich využití při měření deformace v zatěžovaných šroubech.

## Odporové tenzometrické snímače

### 1.1 Použití tenzometrického snímače

Elektrické odporové tenzometry se používají jako senzory k nepřímé metodě zjištění mechanického napětí na povrchu součásti prostřednictvím měření změny odporu při deformaci. Patří mezi převodníky sloužící k elektrickému měření neelektrických veličin. [1]

Využívají se především ve dvou oblastech. [1]

- k zjišťování a analýze namáhaných prvků, součástí nebo celých konstrukcí
- jako pevně zabudovaná součást jiných přístrojů a zařízení, kde je měřenou veličinou vnější zatížení

### 1.2 Princip tenzometrického snímače

#### 1.2.1 Tenzometrická rovnice

Tenzometry určují poměrné prodloužení na základě poměrné změny jejich elektrického odporu  $\Delta R/R$  vlivem jejich deformace. Obecně tedy platí vztah (1). [1]

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

Ohmický odpor vodiče se dá vyjádřit pomocí vzorce (2):



$$R = \rho \frac{l_0}{A} \quad (2)$$

Když výše uvedené veličiny považujeme za proměnné, můžeme změnu odporu  $dR$  vyjádřit logaritmováním a následnou derivací vztahu (2) lze získat vztah (3).

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A} \quad (3)$$

Pro určitou konečnou změnu odporu  $R$  a dílčích po dílčích úpravách vztahu (3) lze vyjádřit konečnou tenzometrickou rovnici ve tvaru:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (4)$$

### 1.2.2 Deformační součinitel tenzometru

Deformační součinitel tenzometru nebo také deformační citlivost je konstanta, která udává velikost změny odporu  $R$  při změně délky vodiče  $l$ . Deformační citlivost se liší podle materiálu a je dána vzorcem:

$$k = (1 + 2\nu) + \frac{l d\rho}{\rho dl} \quad (5)$$

V *Tab. 1* můžeme vidět nejčastěji používané materiály tenzometrů, s jejich příslušnou deformační citlivostí:

*Tab. 1* – Deformační citlivosti materiálů

Materiál	k
Platina (Pt 100%)	6,1
Platina-Iridium (Pt 95%, Ir 5%)	5,1
Konstantan (Ni 45%, Cu 55%)	2,1
Nichrom (Ni 80%, Cr 20%)	2,1
Monel (Ni 67%, Cu 33%)	1,9
Manganin (Cu 84%, Mn 12%, Ni 4%)	0,47
Nikl (Ni 100%)	-12,1

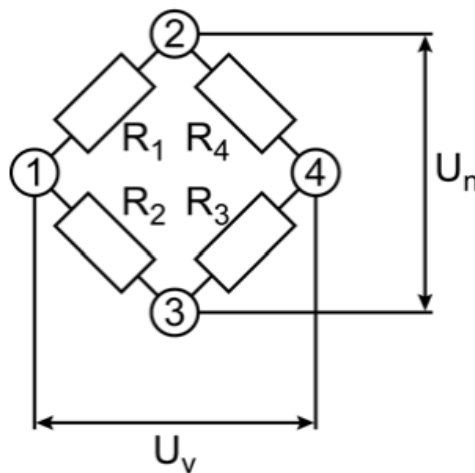
### 1.3 Způsob měření malých změn odporů

Při měření v klasickém zapojení tenzometru, kdy je těleso zatěžováno silou o hodnotě několika Newtonů a deformace je velmi malá, se daná změna odporů  $\Delta R$  mění jen minimálně. Aby bylo

možné takto nízké hodnoty odporu přesně změřit, zapojují se tenzometry do tak zvaného Wheatstonova můstku. [8]

### 1.3.1 Wheatstonův můstek

Wheatstonův můstek je obvod používaný pro měření odporu a velmi malých změn odporů. Na *Obr. 1* je vidět, že můstek má čtyři odpory označené jako  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  a  $R_4$ , které v zapojení představují jednotlivé tenzometry nebo jejich náhrady. Mezi uzly 2 a 3 je vidět zdroj konstantního napájecího napětí  $U_n$  a  $U_v$  představuje výstupní napětí. [7]



*Obr. 1 – Wheatstonův můstek [7]*

Výstupní napětí  $U_v$  platí podle rovnice (6):

$$U_v = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \quad (6)$$

Aby byl můstek ve vyváženém stavu musí se výstupní napětí  $U_v$  rovnat nule a musí tedy platit podmínka v rovnici (7). [7]

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad (7)$$

Jakákoliv změna napětí na výstupu můstku  $\Delta U_v$ , při vyváženém stavu, tedy při splnění podmínky z rovnice (7), bude úměrná změnám odporů na jednotlivých tenzometrech o  $\Delta R_1$ ,  $\Delta R_2$ ,  $\Delta R_3$  a  $\Delta R_4$ , které vznikají deformací tenzometrů při zatěžování daného tělesa. Pro změnu napětí na výstupu  $\Delta U_v$  platí rovnice (8). [8]

$$\Delta U_v = \frac{U_n}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (8)$$

Tenzometry obsažené v můstku mohou a nemusí být během zatěžování deformovány, podle toho deformované tenzometry nazýváme aktivní a nedeformované nazýváme kompenzační. Wheatstonův můstek se dá zapojit několika způsoby, nejčastěji se používá to na *Obr. 1*. [7]

## 1.4 Můstkové zapojení tenzometrů

Podle počtu aktivních tenzometrů ve Wheatstonově můstku rozlišujeme několik druhů zapojení. Vlastnosti popsané v části 1.3.1 umožňují při použití více aktivních tenzometrů násobit jejich citlivost podle jejich počtu.

### 1.4.1 Čtvrtmostové zapojení

Tento druh zapojení má pouze jeden aktivní tenzometr, další 3 odpory tvoří buď:

- 1 kompenzační tenzometr a dva pevné odpory
- 3 pevné odpory

Hlavní nevýhodou tohoto zapojení je teplotní nestabilita a tedy i nelinearita, kdy teplotní změny odporu aktivního tenzometru, nejsou kompenzovány vůbec nebo při použití samokompenzačního tenzometru jen částečně. Čtvrtmostové zapojení se používá například při zatěžovacích testech konstrukcí. Výstupní napětí z tohoto zapojení je dán vztahem (9). [7]

$$\Delta U_v = \frac{U_n}{4} k \cdot \varepsilon \quad (9)$$

### 1.4.2 Polomostové zapojení

Polomostové zapojení tenzometrů využívá dva aktivní tenzometry na místech sousedících odporů se společným uzlem, viz *Obr. 1*, díky čemuž je výstupní napětí dvojnásobné oproti čtvrtmostovému zapojení. Pokud je při tomto zapojení jeden aktivní tenzometr namáhán tahem a druhý tlakem, dochází k úplné teplotní kompenzaci. Poslední zmíněná možnost je nejvýhodnější, protože není nutná teplotní kompenzace. Výstupní napětí z polomostového zapojení tenzometrů je dán vztahem (10). [7]

$$\Delta U_v = \frac{U_n}{2} k \cdot \varepsilon \quad (10)$$

### 1.4.3 Plnomostové zapojení

Poslední varianta zapojení je plnomostové zapojení tenzometrů, kdy jsou aktivní všechny 4 tenzometry na Wheatstonově můstku. Při tomto zapojení jsou dva tenzometry namáhány

tlakem a dva tahem, kdy automaticky dochází k úplné teplotní kompenzaci, protože souhlasná změna odporu způsobená teplotou se na výsledném napětí nijak neprojeví. Z tohoto důvodu je tento druh zapojení nejčastěji používán při konstrukci snímačů. Výstupní napětí z daného zapojení tenzometrů je dán vztahem (11). [7]

$$\Delta U_v = U_n \cdot k \cdot \varepsilon \quad (11)$$

## 1.5 Teplotní závislost tenzometrů

Elektrický odpor každého materiálu závisí na teplotě podle rovnice (12), u tenzometrů je změna odporu způsobená změnou teploty srovnatelná se změnou odporu způsobenou od deformace, další chyby pak způsobuje závislost deformační citlivosti  $k$  na teplotě a teplotní roztažnost podložky tenzometru. [3] [5] [7]

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta t) \quad (12)$$

Omezit teplotní závislost se dá buď zapojením tenzometrů do můstků, viz 1.4, nebo použitím samokompenzačních tenzometrů.

### 1.5.1 Samokompenzační tenzometry

Při správné volbě materiálu tenzometru se může dosáhnout nastavení teplotního součinitele obráceně, než působí změna nosného materiálu. O stejnou hodnotu, o kterou se změní odpor vlivem teplotní změny materiálu, se změní i vlivem správně zvoleného teplotního součinitele  $\alpha$  materiálu tenzometru. K tomuto se využívají speciální tenzometry pro různé materiály například pro ocel, titan nebo hliník. Důležité je provést přesné nalepení tenzometru, při vyšší vrstvě lepidla může dojít ke změně vlastností a teplotní kompenzace neproběhne správně. [3] [2] [7]

## 1.6 Výběr tenzometru a určení hlavních napětí

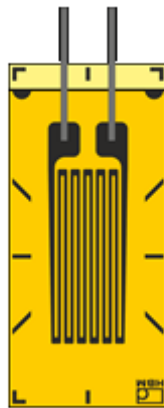
Před instalací tenzometru je nutné vědět, kolik tenzometrů se na těleso zatěžovaném silou použije a v jakém směru se budou instalovat. Výběr vhodného tenzometru závisí na směru hlavního napětí v zatěžovaném tělesu. Obecně může nastat těchto několik případů, pro které se volí vhodné tenzometry: [2]

- Známe směr hlavního napětí: jednoosá napjatost  
dvouosá napjatost
- Neznáme směr hlavního napětí: dvouosá napjatost

### 1.6.1 Jednoosá napjatost

Je znám směr hlavního nenulového napětí, proto stačí použít jeden jednoosý tenzometr, který se nainstaluje ve směru onoho hlavního napětí. Velikost hlavního napětí se pak dá vypočítat z Hookova zákona pro jednoosou napjatost podle rovnice (13). [2]

$$\sigma_1 = E \cdot \varepsilon_1 \quad (13)$$



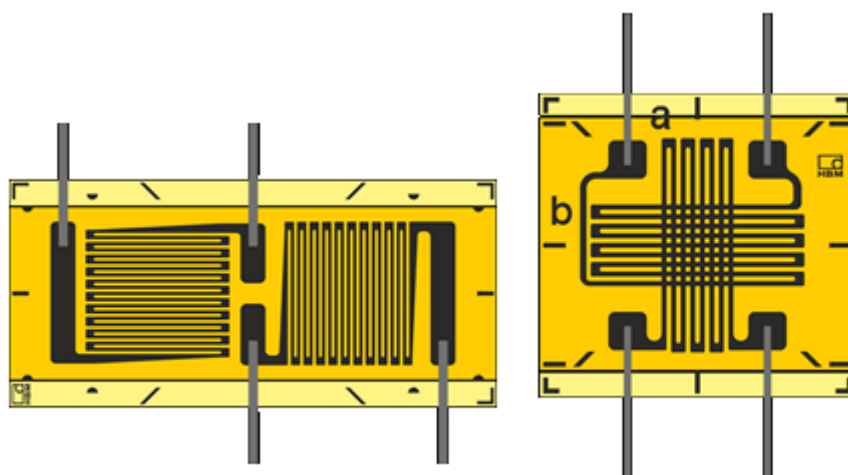
Obr. 2 – Jednoosý tenzometr [5]

### 1.6.2 Dvouosá napjatost – známe směry hlavních napětí

Pokud je v místě měření dvouosý stav napjatosti a jsou známy směry hlavních napětí, použije se k měření tenzometrický kříž. Tenzometrický kříž se nalepí ve směrech obou hlavních napětí a jejich velikosti se potom vypočtou z rozšířeného Hookova zákona pro rovinou napjatost podle rovnic (14) a (15), viz níže. [2] [8]

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2) \quad (14)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1) \quad (15)$$



Obr. 3 – Tenzometrické kříže [5]

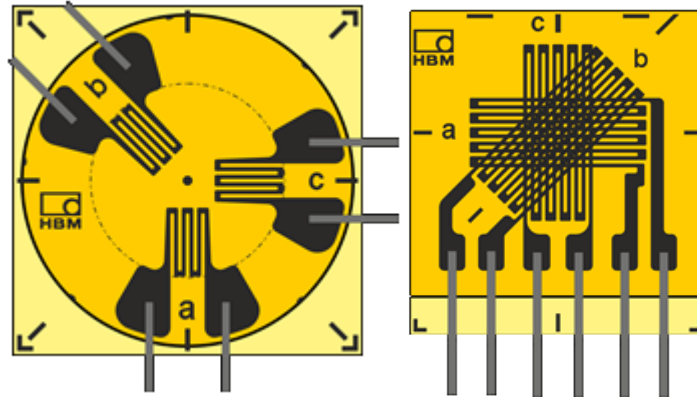
### 1.6.3 Dvousá napjatost – neznáme směry hlavních napětí

Pokud je v místě měření dvousý stav napjatosti, ale nejsou známy směry hlavních napětí, je nutné určit deformaci alespoň ve třech směrech. K tomu se používají tak zvané tenzometrické růžice, které se skládají ze tří tenzometrů, které mezi sebou svírají úhel buď 45° nebo 60°. Výsledné hlavní poměrné deformace se potom vyhodnotí z Mohrovy kružnice, pomocí rovnice (16). [2] [8]

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_a - \varepsilon_b}{2}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b}{2} - \varepsilon_c\right)^2} \quad (16)$$

Velikost hlavních napětí se potom dopočítá podle rovnic (14) a (15). Úhel  $\beta$ , který dané dva na sebe kolmé tenzometry svírají se směry hlavních napětí, je potom možné vyjádřit z rovnice (17). [2] [8]

$$\beta = \frac{1}{2} \arctg \left( \frac{\frac{\varepsilon_c}{2}}{\varepsilon_a - \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b}{2}} \right) \quad (17)$$



Obr. 4 – Tenzometrické růžice [5]

## 1.7 Rozdělení tenzometrů

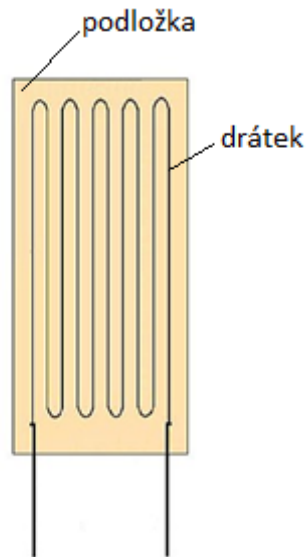
Tenzometry se dají obecně rozdělit podle materiálu, ze kterého je vyroben jejich vodič. První skupinou tenzometrů jsou tenzometry kovové, které se podle typu vodiče dají dále rozdělit na drátkové, fóliové a vrstevné. Druhou skupinou jsou pak tenzometry polovodičové. [7]

### 1.7.1 Kovové tenzometry

Kovové tenzometry mají nejčastěji vodič z konstantanu a deformační citlivost  $k \cong 2$ , ale mohou být i z jiných kovových materiálů, viz Tab. 1. Závislost změny odporu na deformaci platí podle rovnice (4). [1]

#### 1.7.1.1 Drátkové tenzometry

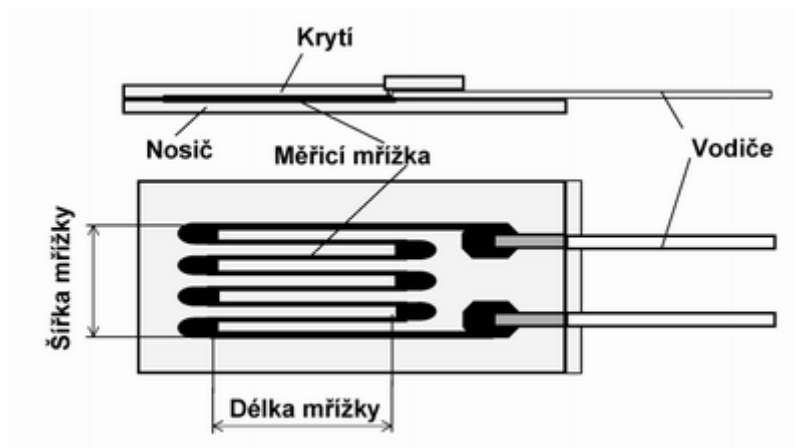
U drátkových tenzometrů jako vodič slouží měrná mřížka vytvořená z drátku o průměru okolo 0,01 mm. Drátek bývá nejčastěji nalepený na nevodivé podložce lepidlem, ale existují i drátkové tenzometry bez podložky, které se na měřené těleso lepí přímo pomocí keramického tmelu. Drátkové tenzometry mají malý rozptyl odporu, deformační citlivosti  $k$  i teplotních součinitelů. Nevýhodou je omezená dosažitelná hodnota odporu, která závisí na rozměrech mřížky, proto se drátek namotává do tvaru meandru, viz Obr. 5, tím se změní délka vodiče při zatížení a již zmíněný odpor. [7]



Obr. 5 – Drátkový tenzometr [4]

### 1.7.1.2 Fóliové tenzometry

Fóliové tenzometry jsou nejpoužívanějším druhem tenzometrů, jejich vodičem je tenká fólie o tloušťce přibližně 5  $\mu\text{m}$ , přilepená na nosné izolační podložce lepidlem, na povrchu je fólie kryta krycí vrstvou, viz Obr. 6. Podložka bývá nejčastěji z polyamidu a je tlustá přibližně 20  $\mu\text{m}$ . Fóliové tenzometry se nachází ve většině průmyslově vyráběných snímačů. Existují široké škály délek fóliových tenzometrů od 0,6 mm až přes 100 mm. Životnost těchto tenzometrů může být až přes 10 milionů cyklů. [1] [5] [7]



Obr. 6 – Popis fóliového tenzometru [1]

### 1.7.1.3 Vrstvové tenzometry

Používají se jen pro velmi specifické aplikace, kdy je tenzometr vytvořený nejčastěji tzv. vypařováním ve vakuu, při čemž nasycené páry daného materiálu tenzometru kondenzují a uchytávají se na měřené těleso. [7]

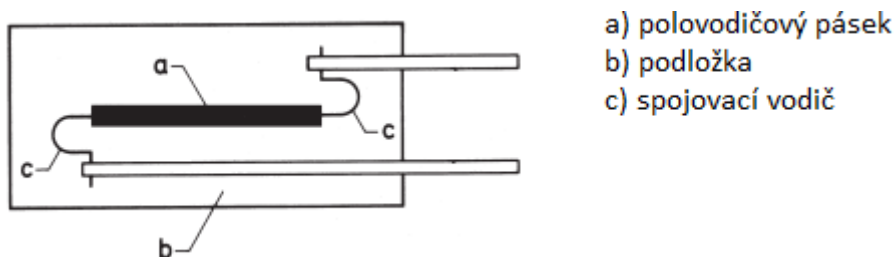


### 1.7.2 Polovodičové tenzometry

Konstrukčně jsou polovodičové tenzometry v podstatě stejné jako tenzometry kovové, měřícím prvkem je polovodičový pásek, nejčastěji křemíkový, široký několik desetin milimetru a tlustý několik setin milimetru. Tento polovodičový pásek je přilepen na izolační podložce, viz *Obr. 7*. Na rozdíl od kovových tenzometrů se závislost změny odporu na deformaci neřídí podle rovnice (4), ale je nelineární, podle rovnice (14), viz níže. [2] [3]

$$\frac{\Delta R}{R} = c_1 \cdot \varepsilon + c_2 \cdot \varepsilon^2 \quad (14)$$

Konstanta  $c_1$  se přibližně rovná sto třiceti a konstanta  $c_2$  několika tisícům, citlivost polovodičových tenzometrů může být až 60krát vyšší, než u kovových a díky tomu dokáží měřit velmi malé deformace. Jejich hlavními nevýhodami jsou vysoká cena, ale především vysoká citlivost na změny teplot, proto i přes svou dobrou přesnost, nejsou používány v takovém množství, jako tenzometry kovové. [2] [3]



*Obr. 7 – Polovodičový tenzometr [2]*

### 1.8 Aplikace tenzometrů

Korektní aplikace tenzometru na zatěžované těleso je stěžejní pro jeho správnou funkci, při nedodržení základních úkonů, které se při instalaci tenzometru provádějí, může dojít k nepřesným výsledkům nebo dokonce k výsledkům naprosto chybným, například při špatném nalepení samokompenzačního tenzometru, viz 1.5.1. Po lokalizaci vhodného měřeného místa na tělesu, se na tomto měřeném místě provádí tyto základní úkony: [5]

- Mechanické očištění tělesa
- Chemické očištění tělesa
- Připevnění tenzometru
- Krytí tenzometru krycími prostředky

### 1.8.1 Mechanické očištění

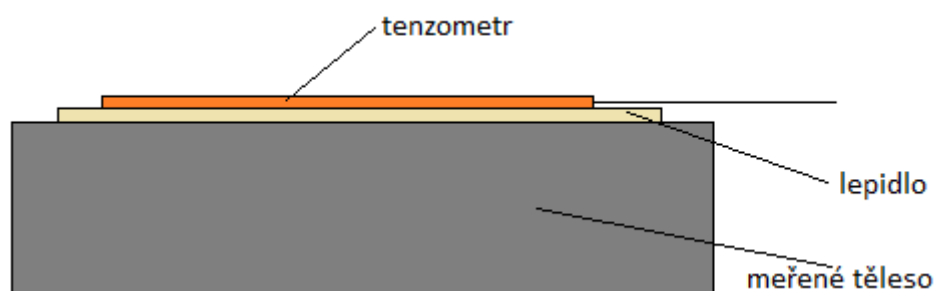
Aby se mohla správně měřit deformaci daného tělesa, musí se tenzometr aplikovat přímo na jeho povrch, proto je nutné povrch před aplikací upravit a zbavit ho v měřeném místě všech nečistot, jako například prach, lak nebo otřepy, které by mohly měření negativně ovlivnit. Mechanické očištění může probíhat různě, od klasického obroušení daného místa smirkovým papírem, až po tryskání (pískování), které je nejefektivnější. Způsob mechanického očištění, závisí na materiálu tělesa, na které se tenzometr instaluje.

### 1.8.2 Chemické očištění

Jako další úkon je nutné již mechanicky očištěnou část měřeného tělesa očistit chemicky. Chemickým očištěním se zbavíme nechtěných látek, které na povrchu zůstaly po mechanickém očištění, jako například rez, fosfáty nebo oleje a tuky. Vhodným způsobem se těchto nečistot zbavit je chemické odmaštění dané části tělesa, vhodnými látkami. Pro zvolení vhodné látky se musí uvážit materiál měřeného tělesa, například prostředek obsahující hydroxid sodný může být vhodný pro čištění slitin železa, ale naprosto nevhodný pro čištění slitin hliníku. Výrobci tenzometrů často nabízejí svoje čisticí prostředky, při jejichž použití garantují kvalitu lepeného spoje.

### 1.8.3 Připevnění tenzometru

S tenzometrem jako takovým se nikdy nemanipuluje napřímo, ale například přes lepicí pásku, na kterou je nalepen, následně je páska přilepena v daném směru, ve kterém tenzometr bude měřit a na dané místo, kam tenzometr dosedne, je nanášeno lepidlo. Při vyšších teplotách může dojít k odlepení tenzometru z důvodu degradace špatně zvoleného lepidla, proto je nutné volit lepidlo doporučené výrobcem pro danou teplotu či materiál tělesa. [2] [5]

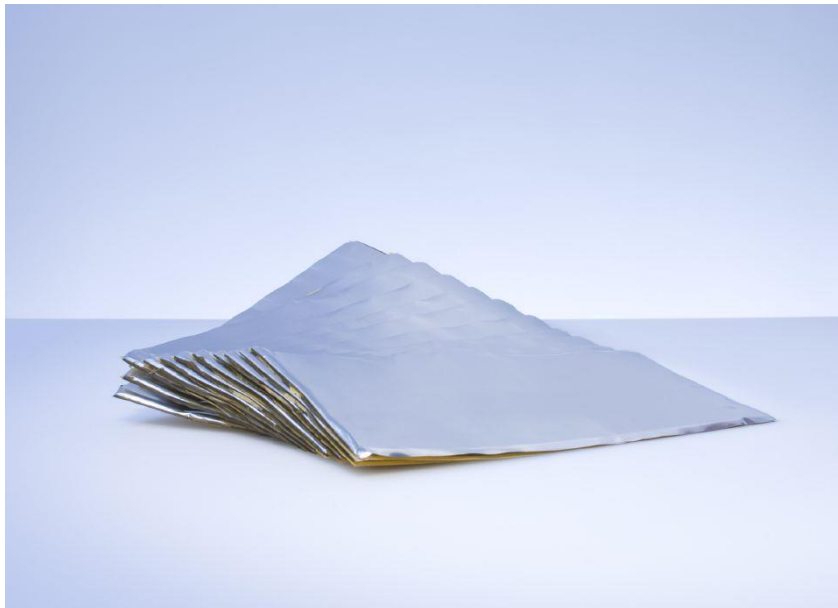


Obr. 8 – Zobrazení tenzometru nalepeném na tělesu

Lepení tenzometru je nejpoužívanější technologie jejich aplikace, ale existují i jiné, například tenkovrstvá aplikace, kdy jsou tenzometr a izolační vrstva vytvořeny napařováním, viz 1.7.1.3. [12]

#### 1.8.4 Krytí tenzometru krycími prostředky

Po přilepení tenzometru a následném připojení tenzometru do měřícího obvodu, se tenzometr musí zakrýt určitými krycími prostředky, které existují v různých formách, nejčastěji se používají krycí tmely. Tyto krycí tmely tenzometr chrání před vlhkostí a jinými vlivy okolí nebo například před mechanickým poškozením. Klíčová vlastnost při volbě krycího tmelu je teplotní rozsah, ve kterém se dá použít. [5]



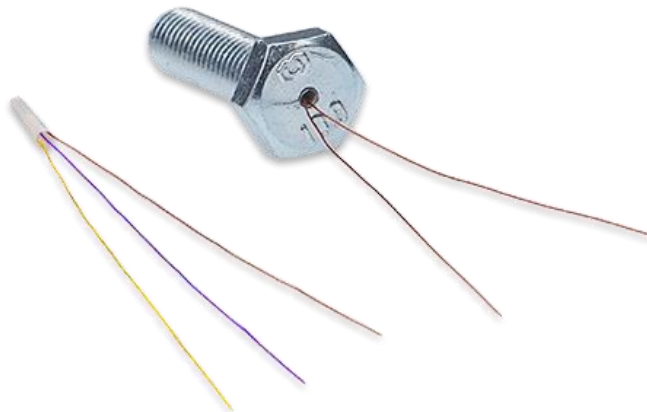
Obr. 9 – Al fólie s krycím tmelem od HBM [5]

#### Dostupná řešení měření síly ve šroubu

Vzhledem k vnějšímu závitů na šroubu a k jeho pozici v konstrukcích není možné aplikovat tenzometr na povrch šroubu klasickým způsobem. Existuje hned několik možností, jak tento problém řešit, například se dají provést vhodné úpravy povrchu, které pak aplikaci tenzometru umožní nebo v ose šroubu předvrtat otvor a vhodný tenzometr aplikovat tam.

#### 1.9 Tenzometry HBM: LB11 & TB21

Pro měření síly šroubu navrhla firma HBM sérii dvou válcových tenzometrů *LB11* a *TB21*, speciálně navržených pro měření tahu, tlaku a vibrací ve šroubech. Tyto válcové tenzometry se aplikují právě do předvrtané díry v ose šroubu. [5]



*Obr. 10 – Válcový tenzometr pro měření síly šroubu od HBM [5]*

### 1.9.1 LB11

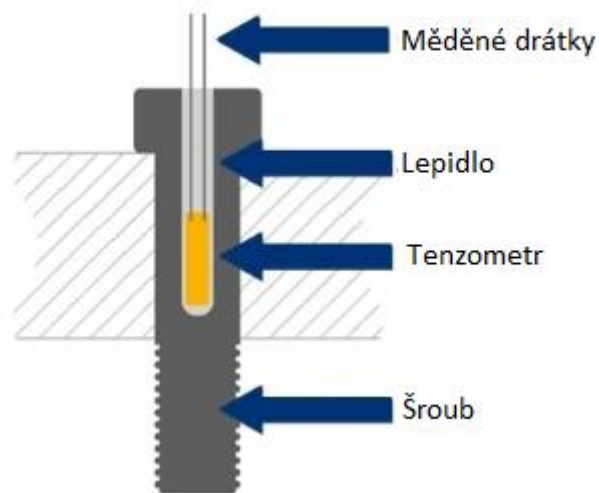
LB11 je jednoosý tenzometr a je vhodný pro čtvrtmostové zapojení. Výška válcové částije 11,5 mm, odpor 120  $\Omega$  a teplotní rozsah je od  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+140\text{ }^{\circ}\text{C}$ . [5]

### 1.9.2 TB21

TB21 obsahuje tenzometrický kříž, je navržený pro polomostové zapojení, což umožňuje dobrou teplotní kompenzaci i při vyšších změnách teploty. Výška válcové části je 11,5 mm, odpor 1000  $\Omega$  a teplotní rozsah je od  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+140\text{ }^{\circ}\text{C}$ . [5]

### 1.9.3 Aplikace LB11 & TB21

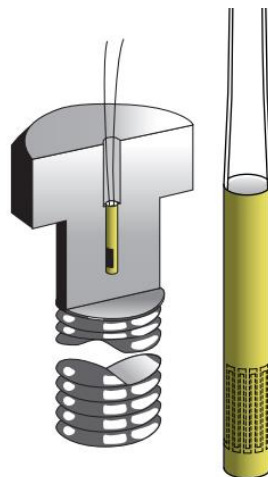
Aplikace u těchto válcových tenzometrů se od aplikace klasických tenzometrů, viz 1.8, značně liší. Při aplikaci těchto tenzometrů se do vyvrtaného otvoru musí umístit nízkoviskózní lepidlo a potom aplikovat tenzometr. Pro vytvrzení lepidla se pak šroub musí zahřát na vyšší teplotu a je nutné udržovat stabilně jeho stejnou polohu. Po vytvrzení lepidla se připojí měděné dráty tenzometru k vodiči a k tenzometrické ústředně a tenzometr je připravený k měření. [5]



Obr. 11 – Řez šroubu s válcovým tenzometrem od HBM [5]

### 1.10 Tenzometr KYOWA: KFB

Válcový tenzometr KFB od firmy KYOWA funguje na stejném principu, jako tenzometry od firmy HBM. Tenzometr, kterým se má měřit síla šroubu je umístěn v předvrtané díře o průměru 2 mm v ose šroubu. KYOWA vyrábí dvě verze tohoto tenzometru, KFB-3 a KFB-1,5, které se liší svou délkou tenzometrického vinutí, KFB-3: 3 mm a KFB-1,5: 1,75 mm. Odpor tenzometru je cca 120  $\Omega$  a teplotní rozsah je od 0 °C do 50 °C. [6]



Obr. 12 – Řez šroubu a detail tenzometru od KYOWA [6]

### 1.10.1 Odchylka měření

Protože je plocha průřezu měřeného šroubu v místě předvrtaného otvoru menší, než by byla bez něj, vzniká nepřesnost měřené deformace vůči skutečné deformaci, která by bez předvrtaného otvoru ve šroubu vznikla. Například při klasickém průměru otvoru 2 mm a průměru šroubu 8 mm se odchylka měřené deformace od té skutečné dostane na 6,67 %. Při zvyšování průměru šroubu se odchylka deformací snižuje, pro šroub o průměru 10 mm je tato odchylka 4,17 %.

## Počtení analýza šroubu

V této části práce byly provedeny analýzy deformace ve šroubu nejdříve analytickým spočítáním deformace a v druhé části pomocí MKP softwaru Abaqus.

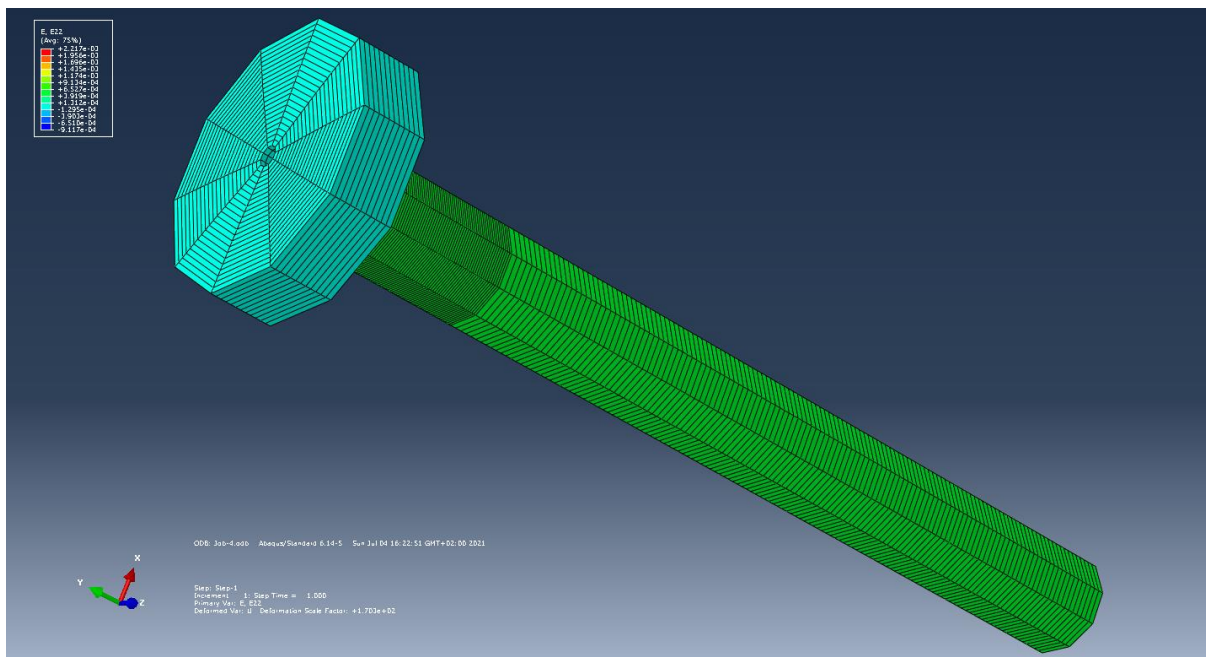
### 1.11 Analytické řešení

Pro výpočet deformace analytickým řešením je uvažován stejný šroub, který byl dále použitý v experimentálním měření, tedy šroub M10. Průměr horní válcové části šroubu je 9,98 mm, ve šroubu je vyvrtán otvor o průměru 2 mm, modul pružnosti v tahu  $E$  je  $2,1 \cdot 10^5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$  a uvažované zatížení šroubu  $F$  je 10 kN. Následná deformace je spočítána podle vzorce, viz níže.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{E \cdot A} = \frac{10000}{2,1 \cdot 10^5 \cdot \frac{\pi \cdot (9,98^2 - 2^2)}{4}} = 634 \text{ } \mu\text{m/m}$$

### 1.12 Analýza v programu Abaqus

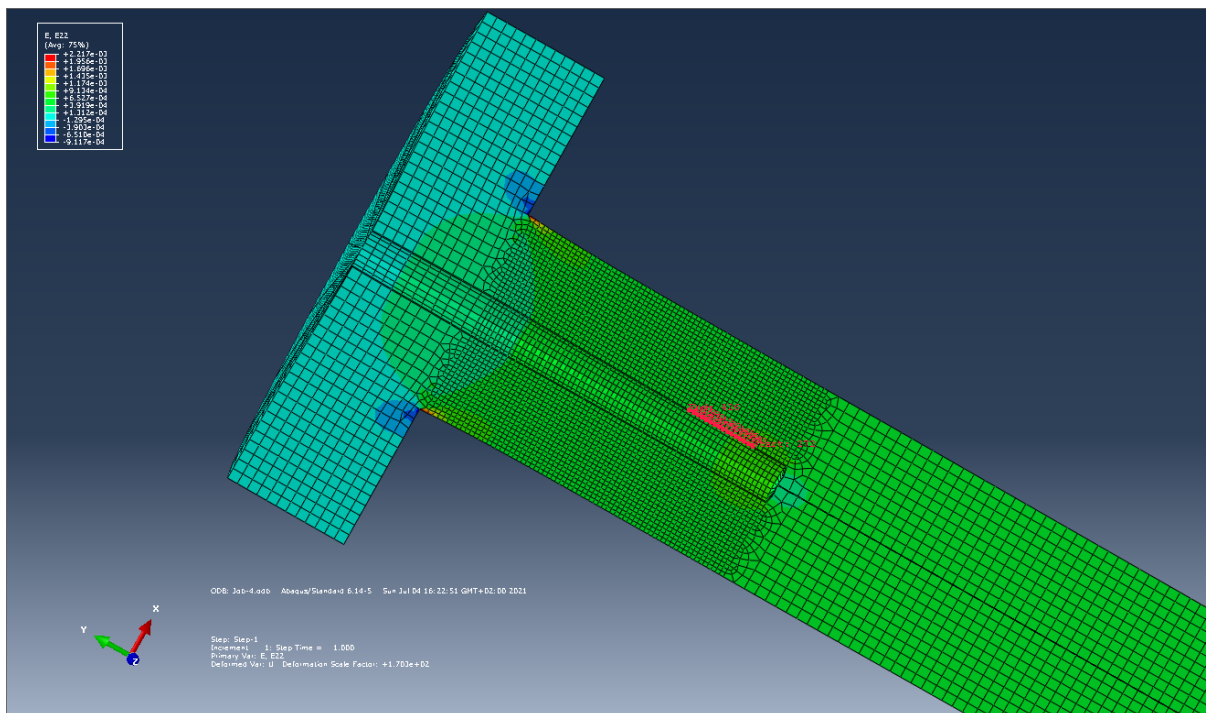
V programu Abaqus, byl vymodelován šroub, který odpovídá šroubu namáhaném při experimentálním měření. Výsledky z dané analýzy jsou v poslední části práce porovnány, jak s výsledky z měření, tak s analytickým výpočtem deformace.



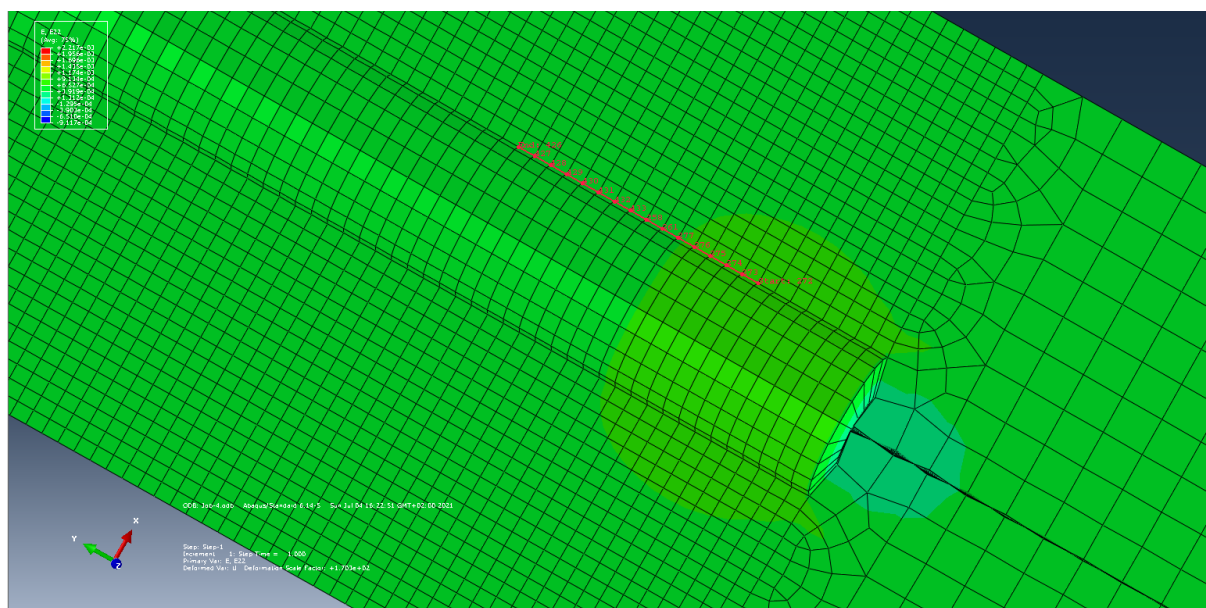
Obr. 13 – Model šroubu z programu Abaqus

V daném modelu šroubu byly zanedbány některé prvky, které by dělaly analýzu složitější, byl zanedbán závit a šestihranná hlava šroubu byla nahrazena válcovou. Šroub má průměr 10 mm a vyvrtaný otvor je 20 mm dlouhý o průměru 2 mm, stejně jako při následném experimentálním měření. Úloha je řešená jako rotačně symetrická, kdy byl načrtnut řez šroubu a byly zadány dané okrajové podmínky. Celý model šroubu je vidět na Obr. 12.

Model šroubu je v programu zatížen tahem pomocí zatěžovací síly o hodnotě 10kN a pod hlavou je upevněn pevnou vazbou. Mechanické vlastnosti modelu odpovídají šroubu s pevnostní třídou 10.9, Poissonovo číslo je 0,3; Youngův modul pružnosti 210 GPa. Velikost strany jednoho čtvercového prvku, ze kterého je tvořena celá síť, je 0,5 mm, v místě vyvrtané díry se síť zhušťuje, kdy je délka hrany čtvercového prvku, ze kterých se tato část sítě skládá, velká 0,2 mm. Na Obr. 14 je pak vidět spektrum deformace v řezu namáhaného modelu šroubu v podélném směru, tedy ve směru osy y a na Obr. 15 je detail místa, kde byla deformace měřena, které je zvýrazněno červenou čarou a danými body v síti.



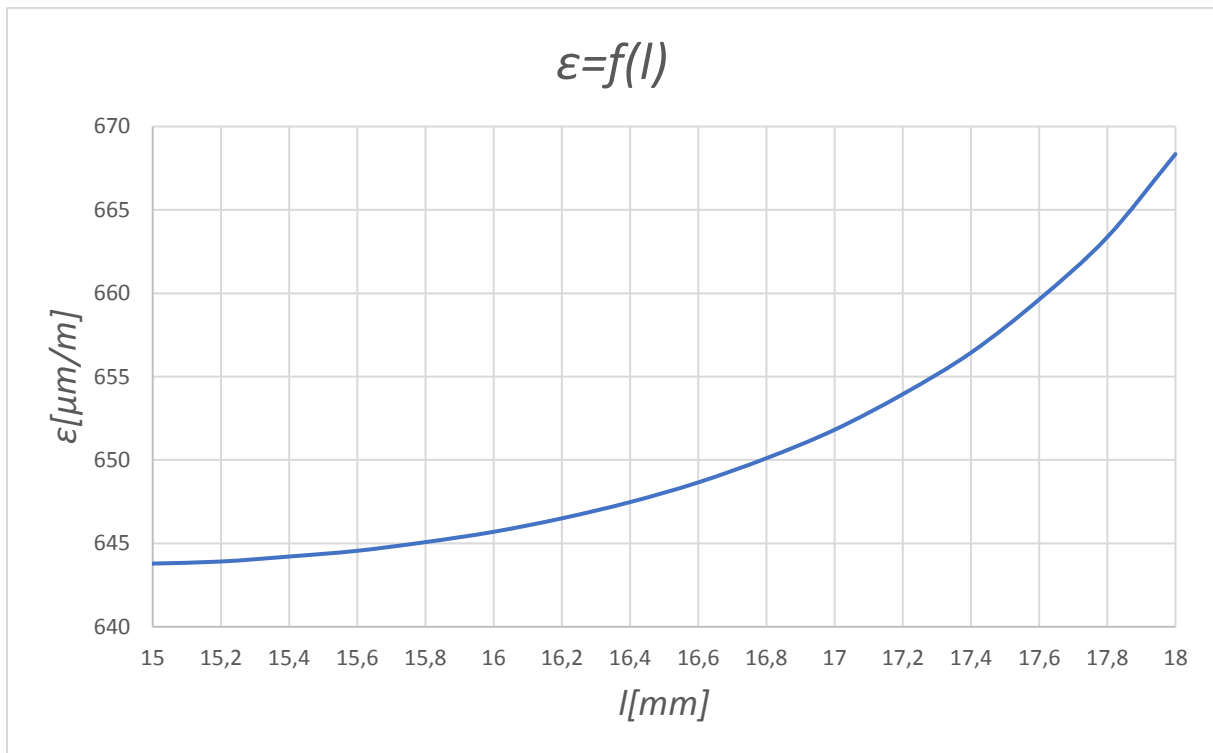
Obr. 14 – Spektrum deformace v zatěžovaném směru osy y



Obr. 15 – Detail spektra deformace v místě vyvrtané díry v zatěžovaném směru osy y

Pomocí programu Abaqus byla následně vyhodnocena podélná deformace na stěně vyvrtaného otvoru v poloze 15 mm až do 18 mm od hlavy šroubu, tedy v místě, kde se při měření přibližně nalézá vinutí tenzometru. Program Abaqus dané hodnoty zpracoval do tabulky a do grafu, viz níže.





Obr. 16 – Průběh podélné deformace ve šroubu

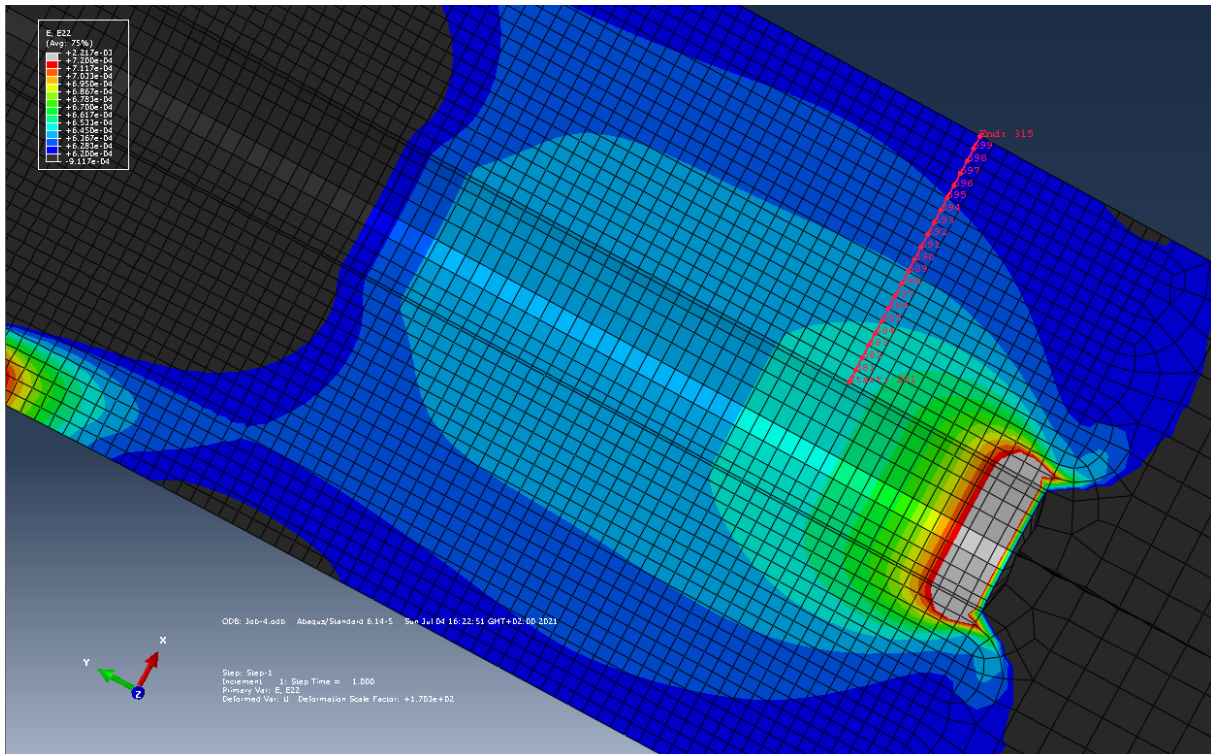
V grafu na Obr. 16 je uvedena závislost deformace na podélné poloze v místě měření tenzometrem, tedy  $\varepsilon = f(l)$ . Deformace exponenciálně stoupá s polohou směrem ke dnu vyvrtané díry až ke vzdálenosti 18 mm od hlavy šroubu, kde je maximální. Z grafu vyplývá, že průměrná deformace v tomto místě, tedy v místě, ve kterém je tenzometr umístěn, je 651  $\mu\text{m}/\text{m}$ , v další části proběhne porovnání tohoto výsledku s výsledky z měření a z analytického řešení. Příčná deformace v dolní části šroubu, kde je objem plný, je pak 606  $\mu\text{m}/\text{m}$ , odchylka v deformaci, kterou způsobilo zmenšení průřezu v místě zatížení, kvůli vyvrtání otvoru pro tenzometr je 7,43 %, viz výpočet níže.

$$\Delta = \frac{|651 - 606|}{606} 100 = 7,43 \%$$

Odchylka analyticky spočítaná v části 2.2.1, se tedy od té získané odchylky v programu Abaqus liší o 3,27 %.

Na Obr. 17 je vidět stejný detail spektra deformace jako na Obr. 14, ale byly zde změněny okrajové hodnoty spektra, aby bylo pole citlivější, maximální hodnota deformace je zde nastavena na 720  $\mu\text{m}/\text{m}$  a minimální hodnota deformace na 620  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Na tomto obrázku je tedy lépe vidět, jak deformace klesá od vnějšku vyvrtané díry směrem k vnějšku celého šroubu. Tato změna deformace v příčném směru šroubu může vysvětlit, proč se daná spočítaná průměrná deformace, viz Obr. 16, liší od hodnoty spočítané analytickým řešením v 3.1.

V místě 17 mm od hlavy šroubu, tedy v místě, kde přibližně vychází průměrná hodnota deformace 651  $\mu\text{m}/\text{m}$ , byly změřeny hodnoty podélné deformace v závislosti na příčné poloze ve šroubu. Průměrná hodnota deformace v tomto místě vychází 636  $\mu\text{m}/\text{m}$ , tato hodnota by už výsledku z analytického řešení odpovídala přesněji.



Obr. 17 - Detail spektra deformace v místě vyvrtané díry v zatěžovaném směru osy y

## Experimentální měření

Experimentální měření osově síly šroubu proběhlo na třech šroubech s šestihrannou hlavou s částečným závitem M10 a třídou pevnosti 10.9. Ve šroubech byly předem předvrtané díry pro tenzometry o průměru 2 mm, hloubka vyvrtané díry byla pro první měření 17 mm a pro druhé a třetí měření 20 mm. Pro měření byly použity válcové tenzometry od KYOWA s označením KFG-3-120-C20-11.

### 1.13 První měření

První měření bylo provedeno na již předem připraveném šroubu, kdy byl tenzometr lepen pomocí doporučeného lepidla EP-340 od KYOWA, viz Obr. 18, lepidlo bylo vytvrzováno 24 hodin. Zatěžování probíhalo napínáním šroubu pomocí zatěžovacího přístroje Tira 2300, viz Obr. 18. Tenzometr byl připojen k tenzometrické ústředně HBM Quantum MX840B a výsledné hodnoty deformace byly zpracovávány v programu HBM CatmanEasy. Do tenzometrické ústředny byl přiveden i signál odpovídající zatěžovací síle. Na měřeném šroubu byly provedeny 4 experimenty měření, při postupném osovém zatěžování šroubu až na hodnotu síly 10 kN a

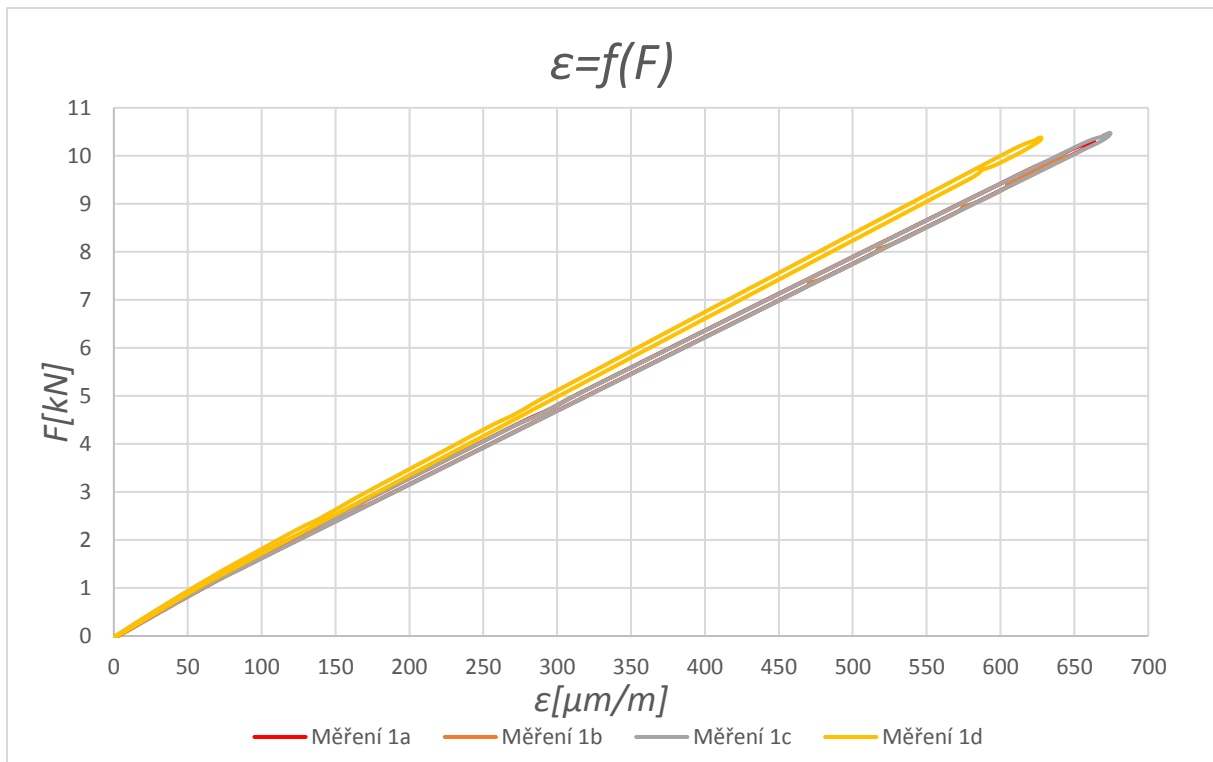
následným uvolňováním síly až na počáteční nulovou hodnotu. Výsledné závislosti deformace šroubu na zatěžované síle  $\varepsilon = f(F)$  byly zpracovány do grafu, viz *Obr. 20*.



*Obr. 18 – Lepidlo od KYOWA EP-340 [6]*



*Obr. 19 – Šroub připravený na zatěžování v přístroji Tira 2300*



Obr. 20 – Závislost deformace na síle pro měření 1

V grafu na Obr. 20 jsou vidět závislosti  $\varepsilon = f(F)$  daných měření 1a, 1b, 1c a 1d, kdy deformace, až na malé odchylky, lineárně stoupá s rostoucí zatěžovací silou až na svou maximální hodnotu při síle okolo 10 kN, následně při uvolňování zatížení deformace s mírnou hysterezí lineárně klesá, až na svou původní nulovou hodnotu. Dále můžeme vidět, že změřené hodnoty deformace v závislosti na síle jsou v měřeních 1a, 1b a 1c skoro totožné. V posledním měření 1d byly změřené hodnoty nižší než u předchozích tří, při maximálním zatížení:  $F_{max} = 10,38$  kN se hodnoty deformací liší až o  $36,2$   $\mu\text{m/m}$ . V Tab. 2 viz níže je vidět porovnání lineárních regrese daných závislostí.

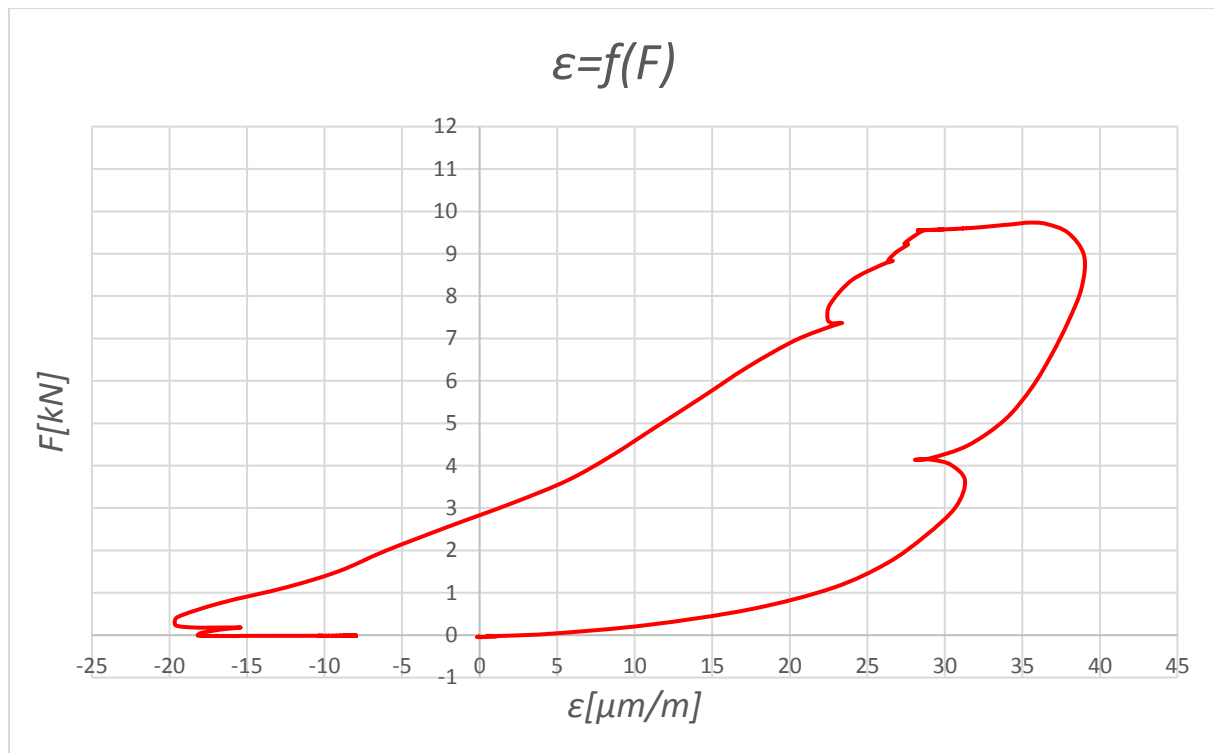
Tab. 2 – Lineární regrese závislostí z měření 1

Měření	Lineární regrese
1a	$y = 0,0156x + 0,0167$
1b	$y = 0,0156x + 0,0231$
1c	$y = 0,0156x + 0,0325$
1d	$y = 0,0166x + 0,0391$

Průměrná lineární regrese z měření 1 je tedy:  $y = 0,01585x + 0,02785$ . Po dosazení zatěžovací síly 10 kN do této lineární regrese, vychází hodnota deformace  $629$   $\mu\text{m/m}$ .

## 1.14 Druhé měření

Pro druhé experimentální měření už bylo nutné tenzometr aplikovat do předvrtané díry ve šroubu. Na základě konzultace s výrobcem bylo použito lepidlo HBM X60, jedná se o dvousložkové rychle vytvrzující lepidlo, které se skládá z kapalné složky a prášku. Lepidlo bylo namícháno podle dokumentace výrobce a to smícháním jedné odměrky prášku s patnácti kapkami kapalné složky, následně bylo vytvrzované přibližně 30 minut. Po nalití namíchaného lepidla do vyvrtané díry byl aplikován i tenzometr. Po ztuhnutí lepidla byly měděné dráty z tenzometru připájeny ke kabelu připojeného do měřicí ústředny, potom byl šroub vložen do zatěžovacího přístroje, viz *Obr. 18*.



*Obr. 21 – Závislost deformace na síle měření 2*

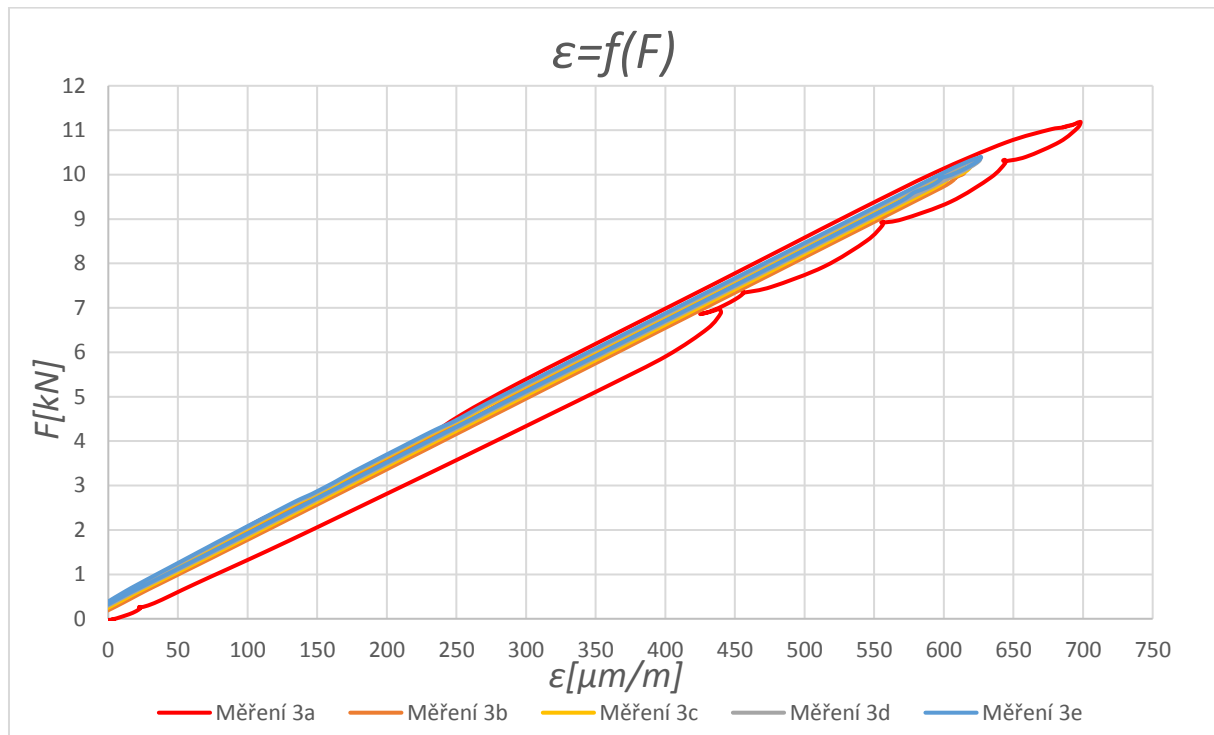
Při druhém měření došlo pravděpodobně, ke špatnému přilepení tenzometru ve vnitřku díry. Lepidlo bylo i přes standartní doporučenou hustotu příliš husté a nezateklo do předvrtané díry, jak mělo. Následkem toho nebyl snímač přilepen ke stěně díry a při namáhání prokluzoval. Hodnoty deformace, které tenzometr změřil, viz *Obr.21*, tedy neodpovídají reálnému zatížení šroubu. Druhé měření bylo proto neúspěšné, bylo nutné aplikovat jiný tenzometr na nový šroub a měření opakovat.

## 1.15 Třetí měření

Při třetím měření proběhla aplikace tenzometru naprosto stejně jako při druhém, byla pouze změněna hustota lepidla, které bylo namícháno řidší, místo patnácti kapek kapalné složky, jich

bylo použito dvacet dva. Díky tomu zateklo lepidlo do předvrtaného otvoru, jak mělo a snímač se přilepil správně.

Připravený šroub s tenzometrem byl následně zatěžován stejným způsobem, jako šroub v prvním měření, tedy osovým zatížením až na hodnotu 10 kN. Bylo provedeno 5 měření a závislosti deformace na zatěžovací síle  $\varepsilon = f(F)$  jsou zpracované v grafu, viz Obr. 22.



Obr. 22 – Závislost deformace na síle měření 3

V grafu na Obr. 21 jsou vidět závislosti deformace na zatěžující síle měření 3a, 3b, 3c, 3d a 3e. Deformace roste se zatěžovací silou lineárně, podobně jako při prvním měření a hysterezi se při snižování zatěžující síly vrací zpátky na původní nulovou hodnotu. Při měření 3a se šroub zatěžoval až na hodnotu síly  $F_{max} = 11,18$  kN a vykazuje určitou nepřesnost, převážně při snižování síly. Závislost deformace na síle zde až do hodnoty 6 kN není lineární, tuto chybu mohlo způsobit první zatížení lepeného spoje. V Tab. 3 viz níže je vidět porovnání lineárních regresí daných závislostí.

Tab. 3 – Lineární regrese závislostí z měření 3

Měření	Lineární regrese
3a	$y = 0,0159x + 0,0995$
3b	$y = 0,0159x + 0,2738$
3c	$y = 0,0159x + 0,3408$
3d	$y = 0,016x + 0,3668$
3e	$y = 0,016x + 0,3887$

Průměrná lineární regrese z měření 3 je tedy:  $y = 0,01595x + 0,3425$ , kdy byla vynechána lineární regrese z měření 3a, z důvodů popsaných výše. Po následném dosazení zatěžovací síly 10 kN do této rovnice lineární regrese, vychází hodnota deformace 606  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

Pomocí výsledných hodnot deformací, získaných z dosazení zatěžovací síly 10 kN do rovnic průměrných lineárních regresí z měření 1 a 3, se dále spočítala relativní odchylka měření 3 od měření 1, která vychází 3,66 %, viz níže.

$$\Delta = \frac{|629 - 606|}{629} 100 = 3,66 \%$$

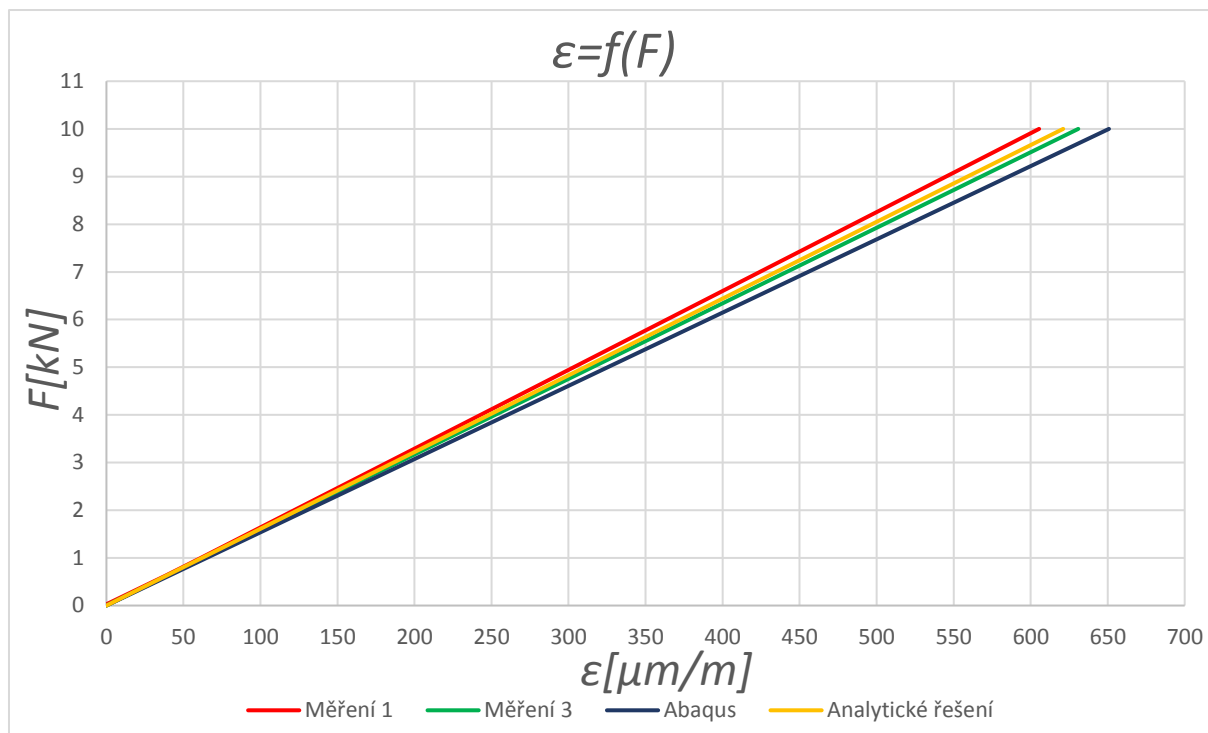
## Porovnání výsledků

V této části práce jsou mezi sebou porovnány výsledné hodnoty deformací všech daných řešení, které byly pro výpočet deformace šroubu použity, tedy deformace naměřené v měření 1 a 3, deformace získaná v programu Abaqus a deformace vypočtená analytickou metodou. Hodnoty deformací jsou přehledně uvedené v *Tab. 4*.

*Tab. 4 – Hodnoty deformací získané z daných řešení při zatížení 10 kN*

Řešení	$\epsilon$ [ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]
Analytické řešení	634
Řešení v programu Abaqus	651
Měření 1	629
Měření 3	606

V grafu na *Obr. 23* jsou vyneseny dané lineární regrese z měření 1 a 3, z řešení vytvořeného v programu Abaqus a z analytického řešení. V grafu je vidět, že daná řešení se liší jen minimálně, s odchylkami v rozmezí několika málo procent, řešení zjištěné v programu Abaqus se liší nejvýrazněji.



Obr. 23 – Porovnání lineárních regresí daných řešení

Vypočtená deformace analytickým řešením vychází 634  $\mu\text{m}/\text{m}$ , viz 3.1, výsledné odchylky změřených hodnot z měření 1 a 3, od této vypočtené hodnoty deformace jsou uvedeny níže, společně s odchylkou  $\Delta_{Abaqus}$ , tedy odchylkou hodnoty deformace, která byla spočtena v programu Abaqus od hodnoty z analytického řešení. Všechny uvedené hodnoty deformací jsou pro zatížení 10 kN.

$$\Delta_1 = \frac{|634 - 629|}{634} 100 = 0,789 \%$$

$$\Delta_3 = \frac{|634 - 606|}{634} 100 = 4,42 \%$$

$$\Delta_{Abaqus} = \frac{|634 - 651|}{634} 100 = 2,68 \%$$

Dále jsou zde uvedeny odchylky deformací daných dvou měření od výsledné hodnoty deformace z programu Abaqus, která vyšla 651  $\mu\text{m}/\text{m}$ .

$$\Delta_1 = \frac{|651 - 629|}{651} 100 = 3,38 \%$$



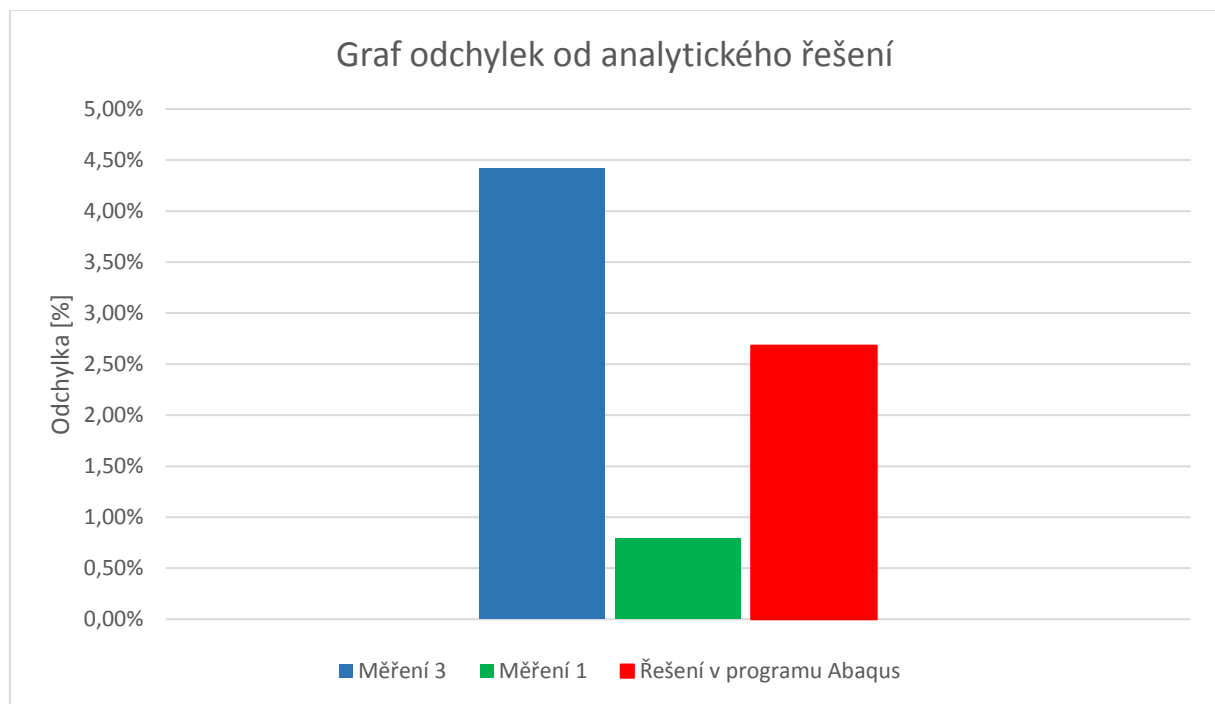
$$\Delta_3 = \frac{|651 - 606|}{651} 100 = 6,91 \%$$

V Tab. 5 jsou uvedeny spočítané hodnoty odchylek daných řešení. Odchylky jsou počítány pro řešení vypsaná v prvním řádku od řešení vypsaná v prvním sloupci.

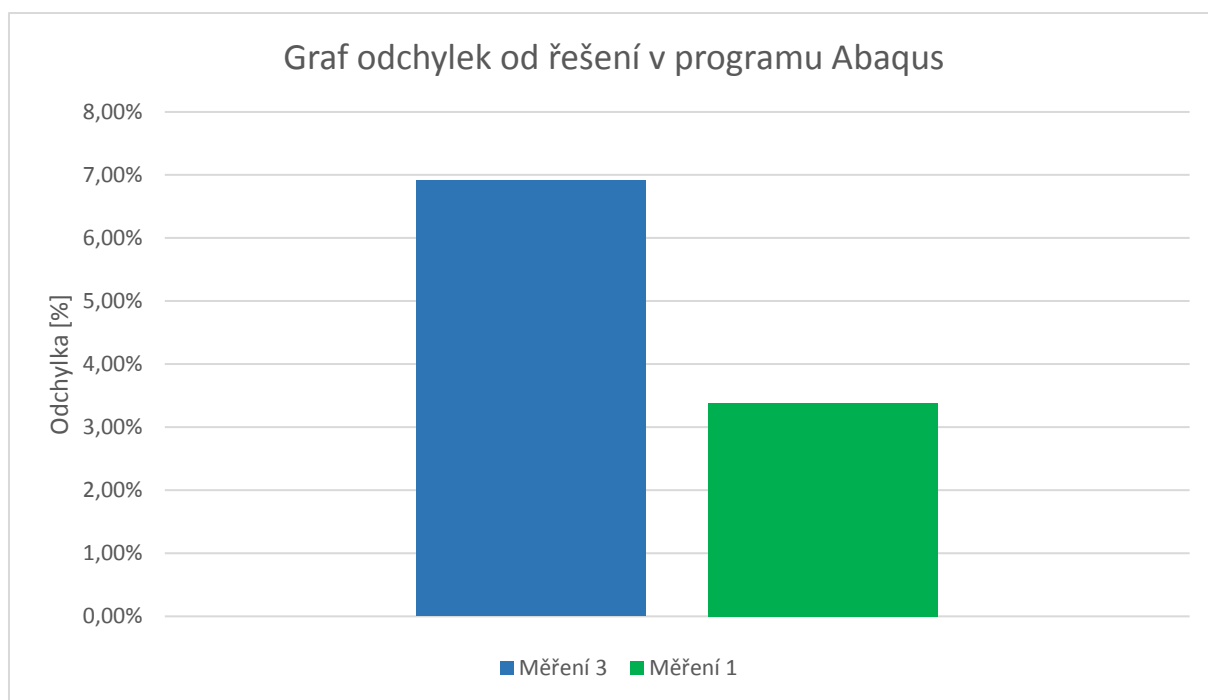
Tab. 5 – Hodnoty vypočítaných odchylek

	Měření 3	Měření 1	Řešení v programu Abaqus
Analytické řešení	4,42 %	0,789 %	2,68 %
Řešení v programu Abaqus	6,91 %	3,38 %	
Měření 1	3,66 %		

V grafu na Obr. 24 jsou ve sloupcovém grafu seřazeny odchylky daných řešení pro měření 1 a 3 a řešení v programu Abaqus od analytického řešení. V grafu na Obr. 25 jsou potom seřazeny odchylky měření 1 a 3 od řešení v programu Abaqus.



Obr. 24 – Porovnání odchylek daných řešení od analytického řešení



Obr. 25 – Porovnání odchylek daných řešení od řešení v programu Abaqus

## Závěr

V úvodu práce v části 1 a 2 je provedena rešerše odporových tenzometrických snímačů, je zde popsán jejich princip fungování, jejich rozdělení nebo konkrétní způsoby jejich aplikace na měřené těleso. Dále jsou tu představena některá konkrétní řešení měření deformace ve šroubech pomocí válečkových tenzometrů od firem HBM a KYOWA.

V části 3 je spočítána teoretická deformace ve šroubu analytickým řešením a dále analýza deformace vymodelovaného šroubu v programu Abaqus, jsou zde popsány dané vlastnosti modelu šroubu a následně zpracovány výsledné hodnoty.

Dále se práce zabývá konkrétním měřením třech šroubů pomocí tenzometrů KFG-3-120-C20-11 od KYOWA, popisuje se zde aplikace tenzometrů a zatěžování šroubů, které proběhlo v laboratořích odboru pružnosti a pevnosti fakulty strojní ČVUT, následně jsou tu graficky zpracovány výsledky těchto měření a porovnány mezi sebou. Měření proběhla tři, přičemž bylo druhé měření, tedy měření 2, neúspěšné, pravděpodobně z důvodu vysoké hustoty lepidla a následnému špatnému přilepení tenzometru na stěnu vyvrtaného otvoru. Měření 2 se tedy v porovnání s ostatními řešeními neuvažuje. Spočítaná odchylka mezi výslednými deformacemi z měření 1 a 3 při zatížení 10 kN, vyšla 3,66 %. Tato odchylka i přes použití stejných tenzometrů na obou měřených šroubech, mohla vzniknout kvůli použití odlišných lepidel nebo kvůli rozdílným hloubkám vyvrtaných otvorů, kdy byl otvor ve šroubu pro měření 1 hluboký 17 mm a otvor ve šroubu pro měření 2 hluboký 20 mm.

V poslední části práce jsou mezi sebou porovnány výsledné hodnoty deformací všech daných řešení při zatížení 10 kN. Vypočítané odchylky výsledků z měření od výsledku z analytického řešení vycházejí pro měření 1: 0,789 % a pro měření 3: 4,42 %; odchylky jsou tedy minimální a dá se předpokládat, že při správné aplikaci tenzometrů není nutné provádět žádnou kalibraci. Odchylka hodnoty deformace spočtená v programu Abaqus od deformace vypočítané analytickým řešením vyšla 2,68 %, důvodem této odchylky, která by teoreticky měla být nulová, je vliv vyvrtaného otvoru na rozložení deformace v tomto místě, kdy deformace v příčném směru od vyvrtaného otvoru klesá, jak je vidět na *Obr. 17*. Pokud bychom počítali s průměrnou hodnotou deformace v tomto příčném směru ve šroubu a ne s hodnotou na povrchu vyvrtaného otvoru, kde je při měření aplikován tenzometr, výsledná odchylka by byla mnohem menší.

## Seznam literatury a zdrojů

- [1] Odporové tenzometry - princip, provedení, použití, historie | Automatizace.HW.cz. Automatizace.HW.cz | Elektronika v automatizaci [online]. [cit. 03.03.2019]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/foliove-odporove-tenzometry-principprovedeni-pouziti-historie.html>
- [2] HBM, Karl Hoffmann: An Introduction to Stress Analysis using Strain Gauges. [online]. Dostupné z: <https://www.hbm.com/en/0112/reference-literature-on-measurements-using-strain-gauges/>
- [3] VTS Zlín s.r.o. [online]. Dostupné z: <https://vtsz.cz/tenzometry>
- [4] Wikipedie tenzometr [online]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Tenzometr>
- [5] HBM: Test & Measurement [online]. Dostupné z: <https://www.hbm.com/en/>
- [6] Kyowa Electronic Instruments Co. [online]. Dostupné z: <https://www.kyowa-ei.com/eng/>
- [7] VLK, M. at al. Experimentální mechanika. Brno, 2003.
- [8] Pružnost a pevnost; R. Halama, L. Adámková, F. Fojtík, K. Frydryšek, M. Šofer, J. Rojíček, M. Fusek; Vysoká škola Báňská - Technická univerzita Ostrava

## Seznam použitých veličin

Označení veličiny	Jednotka	Název veličiny
$R$	[ $\Omega$ ]	Nominální odpor v základním stavu
$k$	[-]	Deformační součinitel tenzometru
$\varepsilon$	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	Poměrné prodloužení (deformace)
$l_0$	[m]	Původní délka vodiče
$A$	[ $\text{mm}^2$ ]	Plocha průřezu vodiče
$\rho$	[ $\Omega \cdot \text{m}$ ]	Měrný odpor vodiče
$\nu$	[-]	Poissonovo číslo
$R$	[ $\Omega$ ]	Odpor vodiče
$R_0$	[ $\Omega$ ]	Počáteční odpor
$\alpha$	[ $\text{K}^{-1}$ ]	Teplotní součinitel odporu
$\Delta t$	[ $^{\circ}\text{C}$ ]	Rozdíl teplot
$\beta$	[ $^{\circ}$ ]	Úhel
$\sigma_1$	[ $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$ ]	Mechanické napětí
$\varepsilon_{1,2}$	[ $\mu\text{m}/\text{m}$ ]	Poměrné prodloužení
$E$	[ $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$ ]	Youngův modul pružnosti
$c_1$	[-]	Lineární koeficient deformační rovnice
$c_2$	[-]	Kvadratický koeficient deformační rovnice
$F$	[kN]	Síla
$\Delta$	[%]	Relativní odchylka
$l$	[mm]	Příčná poloha v ose šroubu

$U_v$	[V]	Výstupní napětí na Wheatstonově můstku
$U_n$	[V]	Napájecí napětí na Wheatstonově můstku
$\Delta U_v$	[V]	Změna napětí na výstupu můstku
$\Delta R_{1-4}$	[ $\Omega$ ]	Změna odporu jednotlivých tenzometrů

## Seznam obrázků

<i>Obr. 1 – Wheatstonův můstek [7]</i> .....	9
<i>Obr. 2 – Jednoosý tenzometr [5]</i> .....	12
<i>Obr. 3 – Tenzometrické kříže [5]</i> .....	13
<i>Obr. 4 – Tenzometrické růžice [5]</i> .....	14
<i>Obr. 5 – Drátkový tenzometr [4]</i> .....	15
<i>Obr. 6 – Popis fóliového tenzometru [1]</i> .....	15
<i>Obr. 7 – Polovodičový tenzometr [3]</i> .....	16
<i>Obr. 8 – Zobrazení tenzometru nalepeném na tělesu</i> .....	17
<i>Obr. 9 – Al fólie s krycím tmelem od HBM [5]</i> .....	18
<i>Obr. 10 – Válcový tenzometr pro měření síly šroubu od HBM [5]</i> .....	19
<i>Obr. 11 – Řez šroubu s válcovým tenzometrem od HBM [5]</i> .....	20
<i>Obr. 12 – Řez šroubu a detail tenzometru od KYOWA [6]</i> .....	20
<i>Obr. 13 – Model šroubu z programu Abaqus</i> .....	22
<i>Obr. 14 – Spektrum deformace v zatěžovaném směru osy y</i> .....	23
<i>Obr. 15 – Detail spektra deformace v místě vyvrtané díry v zatěžovaném směru osy y</i> .....	23
<i>Obr. 16 – Průběh podélné deformace ve šroubu</i> .....	24
<i>Obr. 17 - Detail spektra deformace v místě vyvrtané díry v zatěžovaném směru osy y</i> .....	25
<i>Obr. 18 – Lepidlo od KYOWA EP-340 [6]</i> .....	26
<i>Obr. 19 – Šroub připravený na zatěžování v přístroji Tira 2300</i> .....	26
<i>Obr. 20 – Závislost deformace na síle pro měření 1</i> .....	27
<i>Obr. 21 – Závislost deformace na síle měření 2</i> .....	28
<i>Obr. 22 – Závislost deformace na síle měření 3</i> .....	29
<i>Obr. 23 – Porovnání lineárních regresí daných řešení</i> .....	31
<i>Obr. 24 – Porovnání odchylek daných řešení od analytického řešení</i> .....	32
<i>Obr. 25 – Porovnání odchylek daných řešení od řešení v programu Abaqus</i> .....	33

## Seznam tabulek

<i>Tab. 1 – Deformační citlivosti materiálů</i> .....	8
<i>Tab. 2 – Lineární regrese závislostí z měření 1</i> .....	27
<i>Tab. 3 – Lineární regrese závislostí z měření 3</i> .....	29
<i>Tab. 4 – Hodnoty deformací získané z daných řešení při zatížení 10 kN</i> .....	30
<i>Tab. 5 – Hodnoty vypočítaných odchylek</i> .....	32