



**FAKULTA  
STROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

## **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**

**Odporové tenzometry – vlastnosti a jejich  
experimentální ověření**

**Strain gauges – properties and their  
experimental verification**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**2018**

**Matěj Varinský**

**Studijní program:** B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO  
INŽENÝRSTVÍ

**Studijní obor:** 2301R000 Studijní program je bezoborový

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Jan Řezníček CSc.

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Varinský** Jméno: **Matěj** Osobní číslo: **459655**  
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:

**Odporové tenzometry - vlastnosti a jejich experimentální ověření**

Název bakalářské práce anglicky:

**Strain gauges - properties and their experimental verification**

Pokyny pro vypracování:

Teoretická část

- Provést rešerši stavu v oblasti odporové tenzometrie a používání tenzometrů v experimentální praxi.

Praktická část

- Provést tenzometrická měření pro ověření základních vlastností odporových tenzometrů.

Zpracování výsledků

- Sestavit jednoduchý výpočtový model sloužící k ověření zkoumaných vlastností

- Zhodnotit vliv použitých tenzometrů na kvalitu výsledků měření a jejich srovnání s výpočtem

Seznam doporučené literatury:

- [1] HOFFMANN, K. (2004) Strain Gage Handbook. HBM Darmstadt.
- [2] VALENTA, František. 2002. Pružnost a pevnost III. Vydavatelství ČVUT, 293 s. ISBN 80-010-2480-6.3.
- [3] ŘEZNIČEK, J. 2014 Přednášky Experimentální metody certifikace strojů, ČVUT v Praze, 2015
- [4] www.pruznost.unas.cz - podklady pro výuku

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

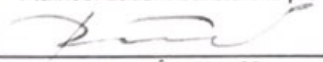
**doc. Ing. Jan Řezníček, CSc., odbor pružnosti a pevnosti FS**

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

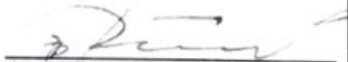
Datum zadání bakalářské práce: **21.04.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: **17.08.2018**

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

  
doc. Ing. Jan Řezníček, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

  
prof. Ing. Milan Růžička, 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.

**30-04-2018**

Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

## **Anotace**

Tato bakalářská práce se věnuje měření s odporovými tenzometry, zkoumá a ověřuje jejich vlastnosti. Porovnává naměřené hodnoty s hodnotami vypočtenými pomocí simulačního programu. Dále vytváří ucelený přehled o typech tenzometrů a jejich vlastnostech.

## **Abstract**

This bachelor thesis is aimed to the measuring using strain gauges, researches and verifies their qualities. Thesis compares measured values to values calculated by simulation software. It also creates comprehensive knowledge about types of strain gauges and its qualities.

## **Klíčová slova**

Odporové tenzometry, deformace, elektrický odpor, příčná citlivost, koncentrace napětí, metoda konečných prvků

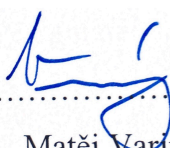
## **Keywords**

Strain gauges, deformation, electric resistance, transverse sensistivity, stress concentration, finite element method

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Odporové tenzometry – vlastnosti a jejich experimentální ověření“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Jana Řezníčka, CSc., s použitím literatury, uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne 6. srpna 2018



.....  
Matěj Varinský

## Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu práce doc. Janu Řezníčkovi, CSc za příkladné vedení, mentoring, ochotu a profesionální přístup nejen při psaní této práce, ale již od začátku mého studia. Také bych rád poděkoval Ing. Karlovi Doubravovi, Ph.D. za pomoc při experimentálním měření pro účely této práce.

Dále děkuji svým rodičům za podporu všech směrech a své kamarádce Hance, která mi byla v posledních letech silnou studijní oporou.

## Obsah

ÚVOD .....	- 1 -
<b>1 „UT TENSIO, SIC VIS.“ – „JAKÁ SÍLA, TAKOVÉ NAPĚTÍ.“ .....</b>	<b>- 2 -</b>
1.1 HISTORIE ODPOROVÉ TENZOMETRIE.....	- 2 -
<b>2 MATEMATICKO – FYZIKÁLNÍ PRINCIP CHOVÁNÍ TENZOMETRU .....</b>	<b>- 3 -</b>
<b>3 ROZDĚLENÍ ODPOROVÝCH TENZOMETRŮ .....</b>	<b>- 4 -</b>
3.1 KOVOVÉ TENZOMETRY .....	- 4 -
3.1.1 Drátkové tenzometry.....	- 4 -
3.1.2 Fóliové tenzometry.....	- 5 -
3.1.3 Vrstvové tenzometry.....	- 6 -
3.2 POLOVODIČOVÉ TENZOMETRY.....	- 6 -
<b>4 ASPEKTY MĚŘENÍ S ODPOROVÝMI TENZOMETRY.....</b>	<b>- 8 -</b>
4.1 DÉLKA MĚŘICÍ MŘÍŽKY, (NE)HOMOGENITA POLE DEFORMACÍ.....	- 8 -
4.2 USPOŘÁDÁNÍ TENZOMETRŮ.....	- 8 -
<b>5 TENZOMETRY PRO SPECIÁLNÍ POUŽITÍ.....</b>	<b>- 10 -</b>
5.1 PŘIVAŘOVACÍ TENZOMETRY .....	- 10 -
5.2 TENZOMETR BEZ PODLOŽKY .....	- 10 -
5.3 POUŽITÍ TENZOMETRŮ V PRAXI .....	- 11 -
<b>6 PARAZITNÍ VLIVY PŘI MĚŘENÍ.....</b>	<b>- 12 -</b>
6.1 CREEP.....	- 12 -
6.2 VLHKOST .....	- 12 -
6.3 NAPÁJECÍ NAPĚTÍ.....	- 12 -
6.4 TEPLOTA .....	- 12 -
6.4.1 Teplotně samokompenzované tenzometry.....	- 14 -
6.5 PŘÍČNÁ CITLIVOST .....	- 15 -
<b>7 MĚŘENÍ ROZMĚRŮ VZORKU.....</b>	<b>- 17 -</b>
<b>8 SIMULACE V PROGRAMU ABAQUS.....</b>	<b>- 19 -</b>
<b>9 VÝPOČET SOUČINITELE TVARU <math>\alpha</math> POMOCÍ WEBU EFATIGUE.COM.....</b>	<b>- 22 -</b>
<b>10 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ DEFORMACÍ VZORKU POMOCÍ ODPOROVÝCH TENZOMETRŮ .....</b>	<b>- 24 -</b>
10.1 POUŽÍVANÉ TYPY TENZOMETRŮ .....	- 24 -
10.2 PŘÍPRAVA POVRCHU A LEPENÍ TENZOMETRU .....	- 24 -

---

10.3	PŘIPOJENÍ TENZOMETRU A UMÍSTĚNÍ VZORKU DO TRHACÍHO STROJE .....	- 26 -
10.4	NAMĚŘENÉ A VYPOČTENÉ HODNOTY .....	- 27 -
10.4.1	<i>Výpočet součinitele tvaru <math>\alpha</math></i> .....	- 30 -
11	<b>ZJIŠTĚNÍ VLIVU OKOLNÍ TEPLoty NA PŘESNOST MĚŘENÍ DEFORMACÍ</b> .....	<b>- 31 -</b>
	<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>- 33 -</b>
12	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b> .....	<b>- 35 -</b>
13	<b>SEZNAM ZDROJŮ OBRÁZKŮ</b> .....	<b>- 36 -</b>
14	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>- 37 -</b>
15	<b>SEZNAM TABULEK</b> .....	<b>- 38 -</b>
16	<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>- 39 -</b>

## Seznam použitých veličin a značek

Symbol	Význam	Základní jednotky
$l$	Délka	[m]
$d$	Průměr	[m]
$W$	Šířka	[m]
$R$	Elektrický odpor	[ $\Omega$ ]
$A$	Obsah	[m <sup>2</sup> ]
$T$	Teplota	[°C]
$E$	Youngův modul pružnosti v tahu	[N.m <sup>-2</sup> ]
$\varepsilon$	Relativní deformace	[m]
$\nu$	Poissonovo číslo	[-]
$\alpha$	Součinitel tvaru	[-]
$\rho$	Měrný odpor materiálu vodiče	[ $\Omega$ .m <sup>-1</sup> ]
$\sigma$	Napětí	[N.m <sup>-2</sup> ]
$k$	Součinitel deformační citlivosti konstantanu	[-]
$F$	Síla	[N]
$\varepsilon_{\text{pod}}$	Deformace v podélném směru	[m]
$\varepsilon_{\text{př}}$	Deformace v příčném směru	[m]
$\alpha_R$	Roztažnost materiálu vinutí tenzometru	[K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_K$	Roztažnost materiálu tělíska senzoru	[K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_c$	Teplotní součinitel délkové roztažnosti součásti	[K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_m$	Teplotní součinitel délkové roztažnosti mřížky	[K <sup>-1</sup> ]
$\alpha_R$	Teplotní součinitel elektrického odporu	[K <sup>-1</sup> ]
$\varepsilon_g$	Teplotní odezva	[-]
$k_t$	Deformační součinitel tenzometru ve směru aktivní délky	[-]
$k_l$	Deformační součinitel tenzometru ve směru příčném	[-]
$\sigma_{\text{max}}$	Maximální napětí	[N.m <sup>-2</sup> ]
$\sigma_{\text{nom}}$	Nominální napětí	[N.m <sup>-2</sup> ]



## Úvod

Tělesa kolem nás jsou různě namáhána. U některých nás způsob a velikost jejich namáhání v podstatě nezajímá. Existují ale tělesa, konkrétněji v našem případě strojní součásti, u kterých je zásadní, abychom dokázali zjistit jejich deformace, působení sil, tlaků a momentů na ně. Jednou z hojně používaných metod k určení těchto účinků v současné době je obecně tenzometrie.

Prvním hlavním cílem této práce je provést rešerši stavu v oblasti odporové tenzometrie a použití tenzometrů v experimentální praxi, což nám umožní vytvořit si obecný přehled o problematice odporové tenzometrie. Dlouhodobě se vývojem a výrobou odporových tenzometrů zabývá firma HBM, jejíž literatura zahrnuje značnou část faktů o tenzometrech v dnešní době a použiji jí jako jeden ze základních informačních zdrojů pro tuto práci.

Druhým hlavním cílem, který se nachází v praktické části této práce, je provedení tenzometrického měření namáhaného vzorku pomocí dvou rozdílných tenzometrů, vytvoření jednoduchého výpočtového modelu a porovnání výsledných hodnot těchto dvou metod mezi sebou.

V neposlední řadě bude zhodnocen vliv použitých tenzometrů na kvalitu výsledků měření a experimentálně ověřím, jakým způsobem reagují tenzometry na změnu okolní teploty.

## 1 „Ut tensio, sic vis.“ – „Jaká síla, takové napětí.“

Pojem tenzometr lze do češtiny volně přeložit jako “měřič napětí“. Proč tento překlad není úplně přesný si objasníme v následujících řádcích. Typy tenzometrů mohou být následující – mechanické, akustické, pneumatické a elektrické. V této práci se budeme zabývat odporovými tenzometry, které spadají do skupiny elektrických tenzometrů. Odporový tenzometr je senzor, jež využívá tzv. piezorezistivní jev. To znamená, že během mechanického namáhání dané oblasti, kterou tenzometr snímá, dochází u kovových vodičů nebo polovodičů ke změnám jejich elektrického odporu. Tím se dostáváme k vysvětlení již výše zmiňovaného nepřesného překladu. Odporový tenzometr tedy neměří přímo deformace, nýbrž změnu elektrického odporu, ze kterého dokážeme pomocí fyzikálních vztahů vypočítat deformace, či dále napětí v součásti.

### 1.1 Historie odporové tenzometrie

Předtím, než si uvedeme první milníky ve vývoji odporových tenzometrů, musíme si zmínit několik důležitých jmen, jež předcházela odporovým tenzometrům a bez jejichž přínosu by nejspíše k vynálezu odporových tenzometrů nikdy nedošlo. První důležitou dvojicí jmen jsou pánové Robert Hooke (1635 – 1703) a Thomas Young (1773 - 1829). „*Robert Hooke jako první objevil závislost mezi napětím a deformací (1660), kterou roku 1807 popsal Thomas Young a je známa jako Hookův zákon.*“ [2]

V 19. století byla objevena elektrická energie, s níž přichází další možnosti jejího použití, čehož využil Charles Wheastone, který popsal princip můstkového zapojení odporů. Tento způsob zapojení se právě využívá při zapojení odporových tenzometrů. V této době zkoumal elektrickou energii i William Thomson, který definoval jev vedení proudu vodičem, tzv. Thomsonův jev. Tyto zásadní objevy a definice umožnily vytvořit ve 30. letech 20. století v USA Arthurovi C. Rugovi první skutečný odporový tenzometr, který nalepil na dno nádrže, čímž dokázal možné použití v praxi. Zanedlouho objevily zejména letecké firmy výhody odporových tenzometrů při výrobě nových konstrukcí letadel, což zapříčinilo na začátku 40. let výrobu 50 000 kusů drátkových tenzometrů v téměř neměnné podobě, kterou známe dnes, čímž odstartovala velkosériová výroba a praktické použití tenzometrů. [2]

V 50. letech Paul Eisler přišel s technologií tištěných spojů. Tato technologie umožnila nanést vinutí přímo na nosné médium (plastová folie). Ve stejném období Američan C.S. Smith popsal piezoelektrický efekt polovodičů. Tohoto efektu se využilo k měření malých deformací.

## 2 Matematicko – fyzikální princip chování tenzometru

Abychom si lépe představili na jakém principu tenzometry fungují, je nutné si pomocí rovnic vyjádřit jejich fyzikální podstatu.

Vycházíme ze těchto předpokladů – z elektrotechniky, kde si definujeme odpor vodiče

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \text{ a zároveň } \rho = \rho(T), \quad (1)$$

respektive když  $\rho = konst.$ ,

$$dR = \rho \cdot d\left(\frac{l}{A}\right) = \rho \cdot \frac{dlA - l dA}{A^2} \text{ a diferenciály nahradíme diferencemi, tedy} \quad (2)$$

$$\Delta R = \rho \cdot \frac{\Delta lA - l \Delta A}{A^2} \quad (3)$$

a z pružnosti a pevnosti, konkrétněji z Poissonova zákona

$$\varepsilon_{př} = -\nu \cdot \varepsilon_{pod} \quad (4)$$

Poté tedy platí, že

$$\Delta l = \varepsilon_{pod} \cdot l, \quad (5)$$

$$\Delta a = -\nu \cdot \varepsilon_{pod} \cdot a, \quad (6)$$

$$\Delta b = -\nu \cdot \varepsilon_{pod} \cdot b. \quad (7)$$

Po matematickém propojení těchto fyzikálních vztahů a následných úpravách dostáváme následující rovnice.

$$\Delta A = -\nu \cdot \varepsilon_{pod} \cdot a \cdot b + a \cdot (-\nu \cdot \varepsilon_{pod} \cdot b) = -2 \cdot \nu \cdot \varepsilon_{pod} \cdot A. \quad (8)$$

Tento vztah nám vyjadřuje změnu průřezu s použitím Poissonova zákona. Pakliže tento vztah dosadíme do rovnice pro změnu odporu, dostáváme vztah následující

$$\Delta R = \rho \cdot \frac{l}{A} \cdot \varepsilon_{pod} \cdot (1 + 2 \cdot \nu). \quad (9)$$

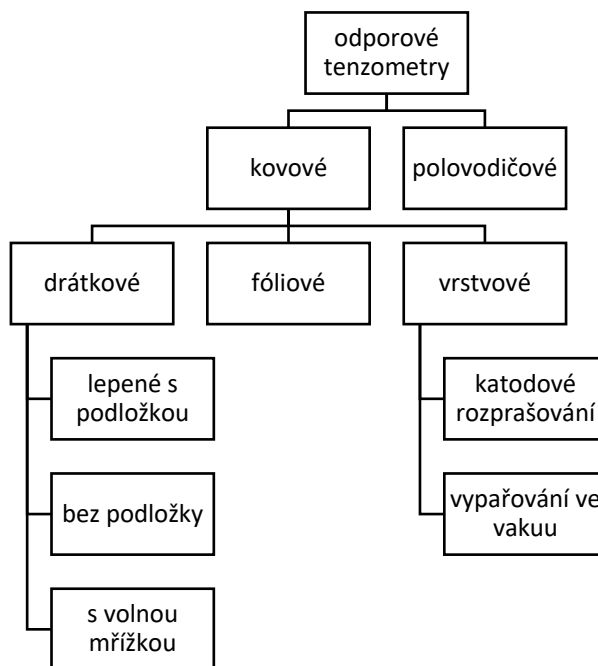
Po zavedení poměrné změny odporu jako změny odporu  $\Delta R$  ku původnímu odporu  $R$  dostáváme vztah:

$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon_{pod} \cdot (1 + 2 \cdot \nu), \quad (10)$$

kde  $(1+2 \cdot \nu)$  zavedeme jako veličinu  $k$ , která se obecně nazývá k-faktor tenzometru. Tato veličina nám říká, jak se chová vinutí tenzometru v odezvě na deformaci ve směru vinutí. Obecně je hodnota k-faktoru dodávána k jednotlivým tenzometrům od výrobce.

### 3 Rozdělení odporových tenzometrů

Odporové tenzometry můžeme dělit například dle typu materiálu, ze kterého je vyroben – tedy na kovové a polovodičové. Kovové tenzometry se dále dělí na drátkové, fóliové a vrstevné.



Obr. 1: Rozdělení odporových tenzometrů

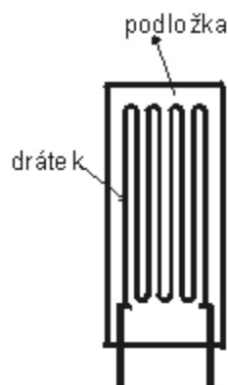
#### 3.1 Kovové tenzometry

##### 3.1.1 Drátkové tenzometry

Prvním typem jsou drátkové lepené tenzometry s podložkou, které můžeme definovat následovně: „Je to nejstarší typ tenzometru. Měrná mřížka je vytvořena z drátku a připevněna na podložku lepidlem. V experimentální pružnosti slouží ke zjišťování jedno- i víceosé napjatosti, zbytkového napětí, k vyšetřování koncentrátorů a gradientů napětí v oblastech pružných i plastických deformací.“ Mají relativně malý rozptyl odporu, což nám usnadňuje eliminaci rušení dalších tenzometrů měřících na stejné součásti. [3]

Modifikací drátkového tenzometru je tenzometr bez podložky, kde podložku nahrazuje keramický tmel. Ten umožňuje použití v extrémních teplotách (-200°C až 1000°C). Často se k němu dodává ještě kompenzační termočlánek, jelikož samokompenzační tenzometry používané za extrémních teplot neexistují. Posledním typem drátkových tenzometrů je tenzometr s volnou mřížkou. Odporové drátky jsou uchyceny pomocí izolačních kolíčků tak,

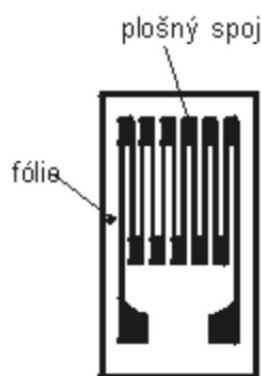
aby při mechanickém namáhání docházelo ke změně délky drátku, tedy ke změně odporu. Tím nedochází k problémům při přenášení deformace na celý povrch tenzometru, jako například u tenzometrů s podložkou, kde je přenos deformace omezen rozměry tenzometru. Tento typ se používá zejména k měření tlaků. [3] [4]



Obr. 2: Zobrazení drátového tenzometru [7]

### 3.1.2 Fóliové tenzometry

Druhým typem jsou fóliové tenzometry, momentálně nejvíce používaný typ kovových tenzometrů. Je to dáno kvalitní výrobní technologií, která umožňuje dosažení stejných, ne-li lepších vlastností, než mají ostatní typy tenzometrů. „Měřicí mřížka je vyrobena z folie o tloušťce  $5\mu\text{m}$  a je připevněna na podložku lepidlem. ... Podložka bývá nejčastěji z polyamidu anebo to jsou skelnými vlákny vyztužené fenolové filmy (tloušťka asi  $20\mu\text{m}$ ).“ Nevýhodou malých fóliových tenzometrů je ovlivnění jejich měření tečením (creep) a hysterezí. Životnost fóliových tenzometrů dosahuje přes 10 milionů cyklů. [3][4]



Obr. 3: Zobrazení fóliového tenzometru [7]



Obr. 3a: Fóliové tenzometry HBM [8]

### 3.1.3 Vrstvové tenzometry

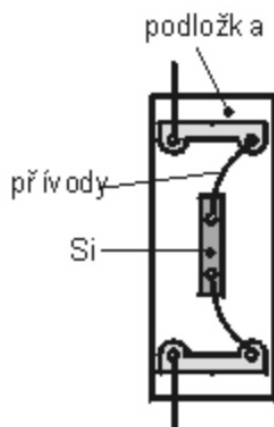
Posledním typem kovových tenzometrů jsou vrstevné tenzometry. Tento typ se používá ve speciálních aplikacích, kdy nanese aktivní vrstvu kovu přímo na materiál. K tomu dochází dvěma způsoby – buď katodovým rozprašováním, nebo vypařováním ve vakuu. Katodové rozprašování probíhá tak, že materiál, který chceme nanášet, použijeme jako katodu, která výbojem v inertním plynu, nejčastěji v argonu, ulpí za tlaku v řádech desetin torru a napětí v jednotkách kV na anodovém povrchu měřeného tělesa. Druhá metoda tzv. vypařování ve vakuu je nejčastější způsob výroby vrstevných tenzometrů. Probíhá na principu vzniku nasycených par daného materiálu tenzometru a následné kondenzace, během níž dochází k ulpívání materiálu na měřeném tělese. Dle výsledné přesnosti volíme tlaky v rozmezí  $10^{-5}$  až  $10^{-8}$  torru – čím vyšší přesnost, tím nižší tlak. [3]



Obr. 4: Zobrazení vrstevného tenzometru [7]

### 3.2 Polovodičové tenzometry

Z pohledu rozdělení tenzometrů dle materiálu jsou další na řadě tzv. polovodičové tenzometry. „*Jsou založeny na jevu piezoresistence některých materiálů (především křemíku).*“ Zásadním problémem pro vytvoření polovodičového tenzometru blízcího se kvalitou ideálnímu stavu bylo docílit u křemíku odolnosti proti tahovým deformacím, které se velice blížily deformacím kovových materiálů. Doposud se stále nedaří vytvořit polovodičový tenzometr, který by byl srovnatelný, ba dokonce lepší než tenzometr kovový. Přesto se používají zejména pro svojí vysokou stabilitu (měření neovlivňuje creep ani hystereze), či pro vysokou únavovou životnost. [3] [4]



Obr. 5: Zobrazení polovodičového tenzometru [7]

V následující tabulce vidíme srovnání hodnot vlastností tenzometrů polovodičových a kovových.

Vlastnost	Tenzometr Si, typ P	Tenzometr drátek nebo fólie Karma
Součinitel k	$\approx 125$	$\approx 2$
$\alpha_R$ [1/K]	$12 \cdot 10^{-6}$	$0,2 \cdot 10^{-6}$
$\alpha_K$ [1/K]	$16 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$
Převodní charakteristika	nelineární	lineární

Tabulka 1: Srovnání kovových a polovodičových tenzometrů

## 4 Aspekty měření s odporovými tenzometry

### 4.1 Délka měřicí mřížky, (ne)homogenita pole deformací

Běžná délka mřížky se pohybuje od 0,3 mm do 150 mm. S ohledem na fyzikální podstatu měření není délka měřicí mřížky zásadní, neboť citlivost tenzometrů závisí na relativním prodloužení, tedy na přetvoření, nikoliv na absolutním prodloužení. Důležitým kritériem, při kterém může hrát důležitou roli délka měřicí mřížky, je homogenita či nehomogenita pole deformací.

Jestliže je na měřené součásti dostatek místa a materiál v poli deformací je homogenní, volíme standardní délku mřížky a velikost tenzometru, které nám zajistí dostatečnou přesnost měření.

V případě, kdy je pole nehomogenní, například u zrnitých materiálů, je vhodné měřit s tenzometry s delší délkou mřížky. Důvodem je princip tenzometrů. Fungují na integračním principu, což znamená, že výsledkem je střední hodnota. Pro měření zrnitých materiálů je tento způsob výhodný z důvodu finální naměřené střední hodnoty, která dokáže pojmout právě nehomogenitu daného materiálu (vměstky, velká zrna...). „*Proto se doporučuje délka měřicí základny nejméně pětinasobná k největšímu zrnu v měřeném materiálu.*“ S opačným přístupem se setkáváme u měření špiček napětí, například v kořeni vrubu. V tomto případě hledáme maximální hodnotu napětí, nikoliv střední hodnotu, což znamená, že volíme kratší délku mřížky. Obecně totiž platí, že čím větší je délka základny, tím naměříme menší hodnotu s větší chybou, než by tomu bylo u menší délky. [4]

### 4.2 Uspořádání tenzometrů

„*Podle účelu tenzometru mohou být na podložce různá uspořádání jednoho, či více tenzometrů.*“ Tedy záleží, ve kterých směrech chceme měřit deformace. Pro přehlednost uvedeme seznam nejtypičtějších uspořádání tenzometrů a jejich grafické znázornění.

a) Jednoduchý tenzometr pro měření jednoosé napjatosti

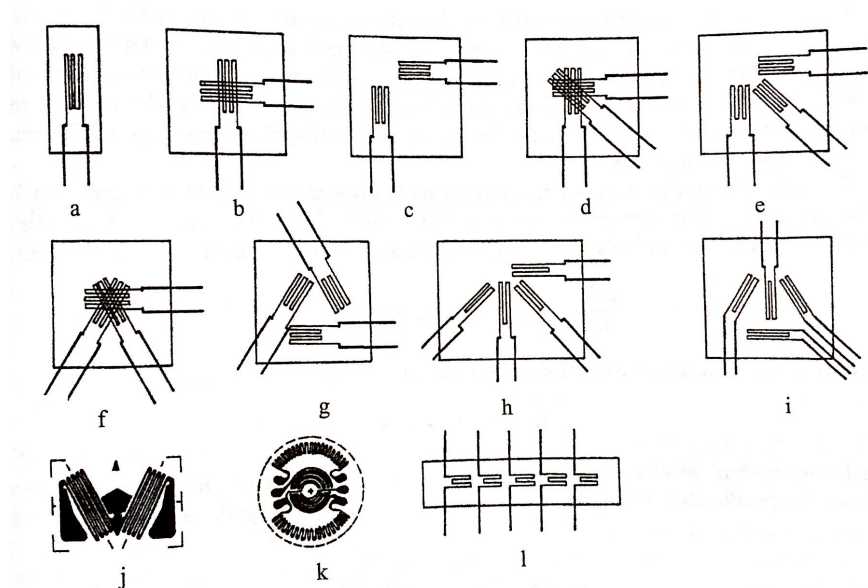
b+c) Tenzometrický kříž ve dvojím provedení pro měření rovinné napjatosti při známých směrech hlavního napětí

d+e) Tenzometrická růžice ve dvojím provedení 45°růžice

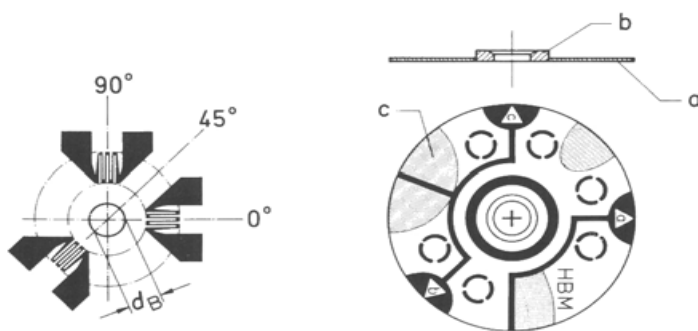
f+g) Tenzometrická růžice ve dvojím provedení 60°růžice pro vyšetřování hlavních prodloužení



- h) tenzometrický vějíř  $45^\circ$
- i) T delta
- j) tenzometr pro měření kroutícího momentu na hřídeli kruhového průřezu
- k) tenzometr pro měření membránových napětí u desek
- h) tenzometr pro měření gradientu poměrného prodloužení
- g) speciální typy tenzometrů (pro měření zbytkových napětí při odvrtávací metodě [1])



Obr. 6: Rozdělení tenzometrů a) - l) [9]

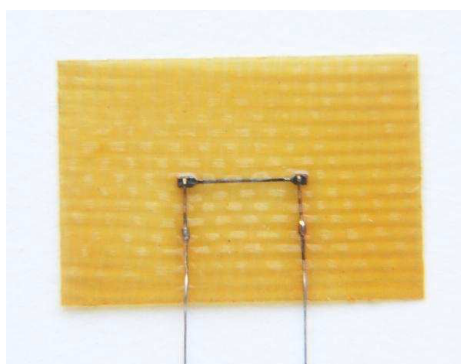


Obr. 7: Speciální typy tenzometrů pro odvrtávací metodu [10]

## 5 Tenzometry pro speciální použití

### 5.1 Přivařovací tenzometry

Jedním z typů tenzometrů pro speciální použití je přivařovací tenzometr, který má na tenké metalické základně přitmelenu měřící mřížku. Na měřenou součást se připevňuje pomocí bodových svarů. V praxi to znamená zúžení spektra použití materiálů, ze kterých je měřená součást vyrobena – tedy na oceli a temperované litiny. Tento typ tenzometrů se také vyznačuje svojí tuhostí, proto se obvykle používají na měření tlustostěnných součástí. Určitou modifikací přivařovacích tenzometrů jsou vysokoteplotní přivařovací tenzometry. Tyto snímače jsou určeny pro dlouhodobé měření v nepříznivých podmínkách, zejména tedy vliv počasí a dalších vnějších činitelů. Tenzometr je připevněn na kovové fólii a přivařen na měřené součásti. Kabeláž vývodů je odstíněna. [3]



Obr. 8: Přivařovací tenzometr [11]

### 5.2 Tenzometr bez podložky

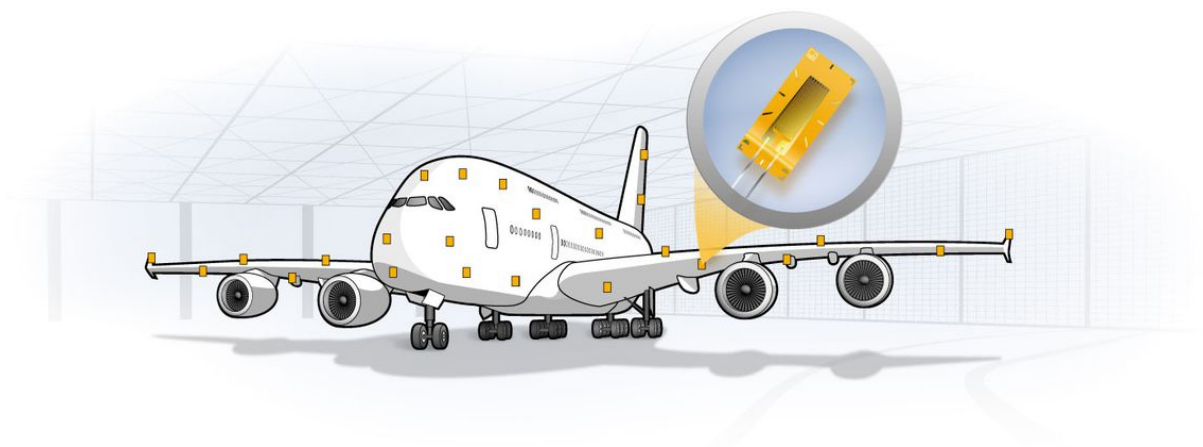
Pro speciální použití se také používají již zmiňované tenzometry bez podložky. Jak jsme si uváděli, možné je použití v extrémních teplotách ( $-200^{\circ}\text{C}$  až  $1000^{\circ}\text{C}$ ). [3]



Obr. 9: Tenzometr bez podložky [11]

### 5.3 Použití tenzometrů v praxi

S ohledem na cenu, relativně dobrou přesnost a možnost měření v reálném čase mají tenzometry široký záběr použití. Běžně se s nimi setkáváme při měření zatížení nosníků, mostů, domů, či automobilových součástí. V leteckém odvětví našly využití pro měření vibrací a deformace křídel a trupu letadel. Za zmínku stojí i využití ve vážných systémech v potravinářském, chemickém, gumárenském nebo těžebním průmyslu. [4]



*Obr. 10: Schématické znázornění použití tenzometrů v letectví [12]*

## 6 Parazitní vlivy při měření

Vlivů, které nepříznivě ovlivňují měření s odporovými tenzometry, je nesčetné množství. Avšak jedním ze základních předpokladů pro praktickou část této práce je snaha o vytvoření ideálních podmínek pro měření. Přesto si uvedeme několik základních parazitních vlivů, které se běžně v praxi i v experimentálním prostředí vyskytují a zaměříme se zejména na vliv teploty, která bývá nejčastějším problémem při měření.

### 6.1 Creep

Během dlouhodobého konstantního zatěžování součásti dochází za vyšších a vysokých teplot k tzv. creepu. Tento efekt se projevuje i na výsledcích měření, nejintenzivněji zejména u tenzometrů s kratší měřicí délkou mřížky. Nepříznivý vliv lze eliminovat použitím kvalitního a vhodného lepidla, také i použitím tenzometrů, které jsou konstrukčně navrženy tak, aby creep kompenzovaly, či využitím „after“ efektu, který se projevuje stejně jako creep, ale opačným způsobem. [3]

### 6.2 Vlhkost

Vlhkost proniká skrz izolaci, čímž snižuje výslednou izolaci mezi tenzometrem a měřeným polem, což může mít za následek změnu v deformační citlivosti tenzometru. Kvůli vlhkosti může docházet ke zhoršování vlastností lepidla, korozi měřicí mřížky, či dokonce k odlepení tenzometru. Všem těmto událostem se dá předejít použitím kvalitních a vhodných krycích prostředků, včetně striktních dodržení podmínek pro jejich aplikaci. [3] [5]

### 6.3 Napájecí napětí

Během měření s odporovými tenzometry musíme zajistit přívod konstantního napájecího napětí, neboť i relativně malá změna může mít za následek při malých příčných průřezích měřeného pole deformací velkou proudovou zátěž. Ta způsobí ohřátí tenzometru, což může mít za následek ohnutí podložky, creep, nestabilitu nulového bodu či hysterezi. [3]

### 6.4 Teplota

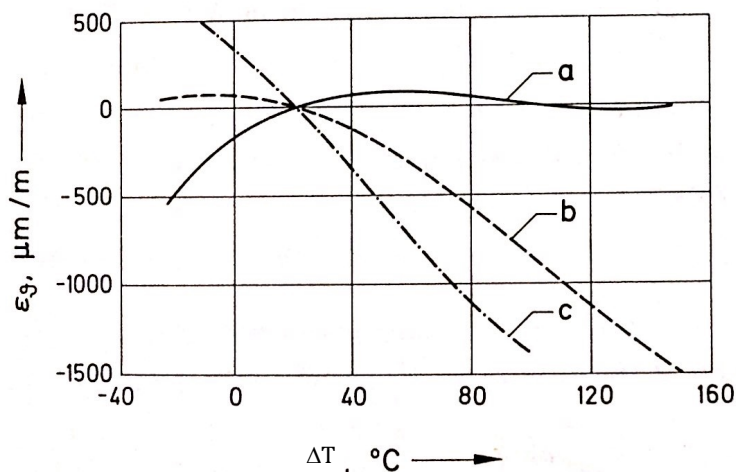
Pokud dochází během měření ke změnám teploty, naměřené hodnoty deformací budou těmto změnám odpovídat. To znamená, že dojde k chybě měření, což je pro přesnost výsledku zásadní. Existuje několik faktorů ovlivňujících teplotní odezvu tenzometru.

- Teplotní součinitel délkové roztažnosti  $\alpha_c$  měřené součásti
- Teplotní součinitel délkové roztažnosti  $\alpha_m$  materiálu mřížky
- Teplotní součinitel elektrického odporu  $\alpha_R$  materiálu mřížky
- Změna teploty  $\Delta T$ , jakožto proměnná způsobující tyto efekty

Vztah pro výpočet přibližné hodnoty teplotní odezvy je následující,

$$\varepsilon_{\vartheta} = \left( \frac{\alpha_R}{k} + \alpha_c - \alpha_M \right) \Delta T. \quad (11)$$

Vhodný je však pouze pro určitý teplotní rozsah, neboť výše uvedené parametry teplotních součinitelů jsou závislé na teplotě. Přesnější znázornění teplotní odezvy totožných tenzometrů na určitých typech materiálu součásti znázorňuje diagram uvedený níže. [5]



Obr. 11: Teplotní odezva tenzometrů [13]

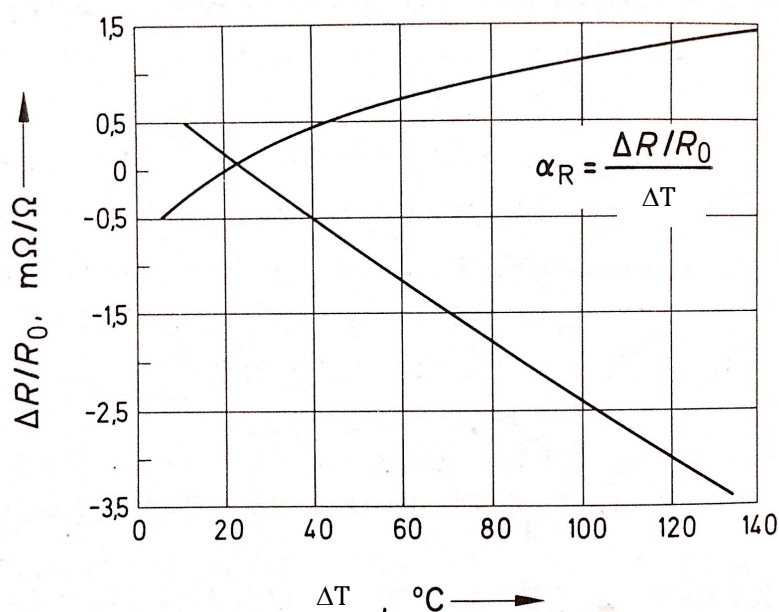
a)	hliník	$\alpha_c = 23 \cdot 10^{-6}/K$
b)	ocel	$\alpha_c = 12 \cdot 10^{-6}/K$
c)	křemík	$\alpha_c = 0,5 \cdot 10^{-6}/K$

Tabulka 2: Doplnující tabulka k obr. 10 [13]

Z grafu je patrné, že každý materiál má teplotní odezvu jinou, což není pro přesnost měření přínosné. Těmto odchylkám můžeme částečně předejít, pokud použijeme teplotně samokompenzované tenzometry. [5]

### 6.4.1 Teplotně samokompenzované tenzometry

S ohledem na určité výrobní procesy odporových tenzometrů lze v dnešní době minimalizovat hodnotu zdánlivých deformací v určitých teplotních rozmezích. Princip této minimalizace tkví ve změně teplotního součinitele elektrického odporu měřicí mřížky. Toho je dosaženo přidáním různých slitinových prvků do materiálu mřížky, které zajistí celkovou změnu součinitele teplotní délkové roztažnosti. V následujícím grafu vidíme, jakým způsobem může přidání dalších prvků změnit chování tenzometru. [3] [5]

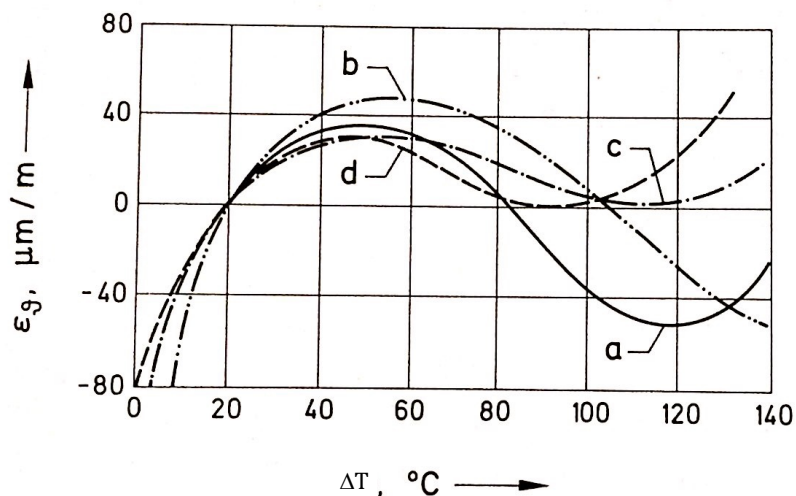


Obr. 12: Závislost chem. složení tenzometrů na teplotním součiniteli el. odporu [13]

Součinitel  $\alpha_R$  lze vhodně upravit dle vztahu:

$$\alpha_R = (\alpha_M - \alpha_C) \cdot k \quad (12)$$

Úplná kompenzace není možná z důvodu nelineárních podmínek, které jsou v tomto vztahu zanedbány. Níže uvedený diagram znázorňuje, jak efektivní je teplotní samokompensace s ohledem na přidání dalších prvků do materiálu měřicí mřížky. [4]



Obr. 13: Víceprvkové složení tenzometrů a jejich samokompenzační vlastnosti [13]

materiál	$\alpha_s$
a) Slitina titanu Ti6Al4V	$8,5 \cdot 10^{-6}/K$
b) Ferritická ocel	$12 \cdot 10^{-6}/K$
c) Austenitická ocel	$16 \cdot 10^{-6}/K$
d) Slitina hliníku AlCuMg2	$23 \cdot 10^{-6}/K$

Tabulka 3: Doplňující tabulka k obr. 12 [13]

Tyto tenzometry jsou vhodné pouze pro součásti vyrobené z materiálů se stejným teplotním součinitelem délkové roztažnosti jako je měřicí mřížka tenzometru. Výrobci odporových tenzometrů tyto diagramy pro jednotlivé tenzometry dodávají jako nedílnou součást balení výrobku.

Další určitý vliv na součinitele teplotní délkové roztažnosti má také tvar měřené součásti. Pro rozsah měření v této práci se jím ale nebudeme dále zabývat. [3] [5]

## 6.5 Příčná citlivost

Ke změnám odporu tenzometrů dochází během měření ve chvíli, kdy se v ideálním případě má přetvářet pouze tzv. aktivní délka. Poměr této aktivní délky a změny odporu má vyjadřovat deformační součinitel tenzometru. Relativně často se ale stává, že se nepřetváří pouze aktivní délka, ale i směr příčný k aktivní délce. Tento jev pak znehodnocuje přesnost měření a je třeba neopomenout tento vliv.

Příčnou citlivost definujeme jako poměr deformačního součinitele tenzometru ve směru aktivní délky  $k_t$ , vůči deformačnímu součiniteli tenzometru ve směru příčném na směr aktivní délky  $k_l$

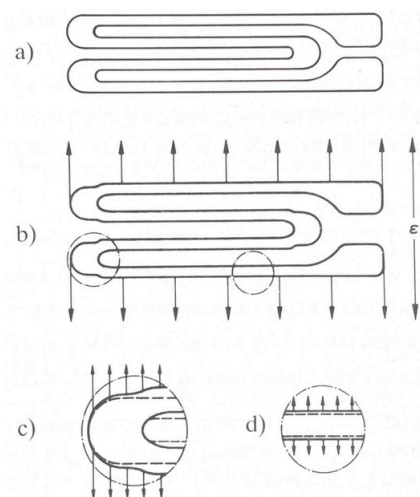
$$q = \frac{k_t}{k_l}, \text{ kde} \quad (13)$$

$$k_t = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon_t}, \quad (14)$$

$$k_l = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon_l}. \quad (15)$$

„K zamezení vlivu příčné citlivosti se nejčastěji používá zesílení na koncích jednotlivých smyček v měřicí mřížce.“ [1] Také se redukce vlivu příčné citlivosti řeší zeslabením v místě aktivní délky mřížky pomocí příčné kontrakce materiálu tenzometru. Standartní příčná citlivost tenzometru je menší než 0, 0008. U speciálních tenzometrů, kde se vyžaduje vysoká přesnost měření lze konstrukcí měřicí mřížky příčnou citlivost zcela eliminovat, což se zároveň projeví na ceně tenzometru. Obr. 14 znázorňuje příčiny příčné citlivosti v odporovém tenzometru. [5]

- a) počáteční stav
- b) působení příčného zatížení
- c) deformace v oblasti příčných spojení
- d) deformace v ostatních oblastech měřicí mřížky



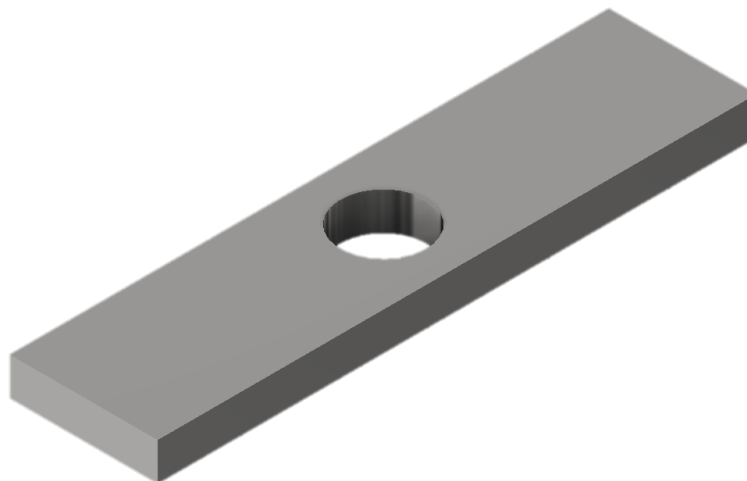
Obr. 14: Příčiny příčné citlivosti v odporovém tenzometru [13]



## 7 Měření rozměrů vzorku

V teoretické části jsem uvedl několik typů odporových tenzometrů, popsal jejich princip a různé parazitní vlivy, které ovlivňují přesnost měření. Doposud jsme se tedy pohybovali spíše v teoretické části této práce, což bylo pro pochopení základních principů nezbytné. Od této chvíle se budeme zabývat měřením deformací daného vzorku v tahu, vyhodnocováním těchto dat a jejich porovnání s výpočtem.

Prvním krokem je změření rozměrů výchozího vzorku. Výchozí vzorek je tyč obdélníkového průřezu z materiálu 11 500, uprostřed vzorku je kruhová díra. Pro názornost jsem vytvořil 3D model vzorku v programu Autodesk Inventor 2018.



*Obr. 15: 3D model měřeného vzorku*

Jednotlivé rozměry jsem měřil posuvným měřítkem celkem pětkrát. Poté jsem z těchto hodnot spočítal aritmetické průměry a určil tak finální rozměry, které budu ve svých výpočtech dále používat. Pro úplnou správnost výsledku uvádím vypočtenou kombinovanou nejistotu. Naměřené a vypočtené hodnoty se nachází v tabulce 4. U kruhové díry uvažujeme střed kružnice přesně uprostřed mezi jednotlivými hranami. Stejně tak uvažujeme celkovou délku vzorku rovnou sedmi průměrům díry uprostřed.

číslo měření	šířka [mm]	tloušťka [mm]	průměr díry [mm]
1	50,5	13	29,3
2	51,42	13	29,66
3	51	12,86	29,82
4	51,24	13,02	29,2
5	51,42	13,3	29,72
<b>průměr</b>	51,116	13,036	29,54
<b>v.s.o.</b>	0,34441835	0,14388885	0,2442949
<b>nejistota B</b>	0,5774	0,5774	0,5774
<b>kombinovaná nejistota</b>	0,34922	0,155504	0,251023
<b>výsledná hodnota</b>	$51,12 \pm 0,34922$	$13,04 \pm 0,155504$	$29,54 \pm 0,251023$

*Tabulka 4: Naměřené a vypočtené hodnoty rozměrů vzorku*

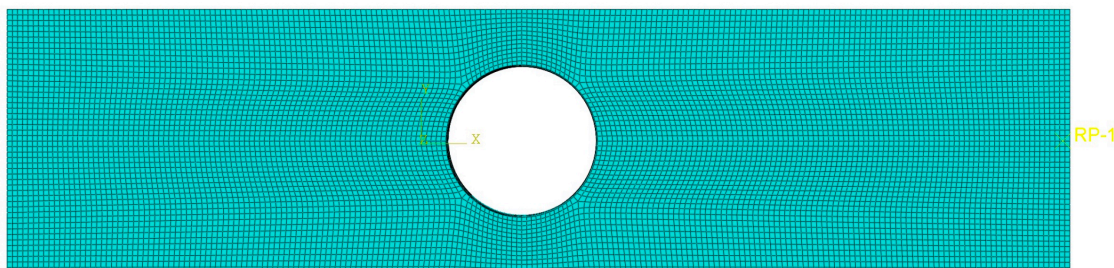
## 8 Simulace v programu Abaqus

Jedním z cílů této práce je porovnat výsledky měření deformací pomocí odporových tenzometrů s výpočtem. Výchozí porovnávací hodnotou bude součinitel tvaru  $\alpha$ ,

$$\alpha = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}}. \quad (16)$$

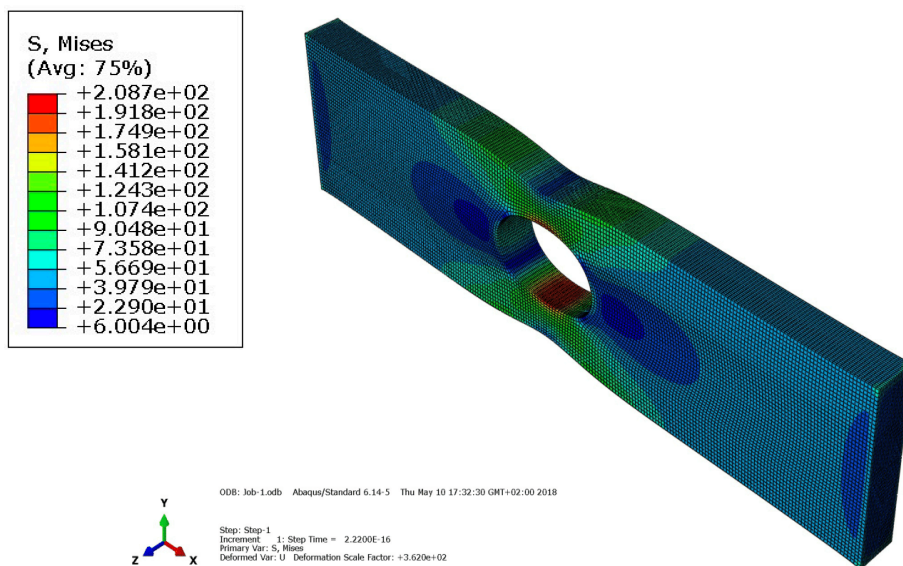
Tento výpočet provedeme pomocí softwaru Abaqus, se kterým jsem pracoval během studia v rámci laboratorních cvičení z předmětu Pružnost a pevnost I. Vzorek jsem vymodeloval dle návodu z laboratorních cvičení. Charakteristiky materiálu vzorku jsou následující - modul pružnosti v tahu  $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ , součinitel příčného zúžení  $\nu = 0,3$ .

Za rozměry jsem dosadil naměřené rozměry vzorku a vytvořil 3D model. V tomto modelu jsem vytvořil síť elementů, které budou simulovat deformaci vzorku. Hustotu sítě jsem zvolil následovně – 10 elementů na 6 mm délky. Tato hodnota hustoty síťování je takto nastavena v závislosti na velikostech základen tenzometrů, se kterými budu v této práci měřit.

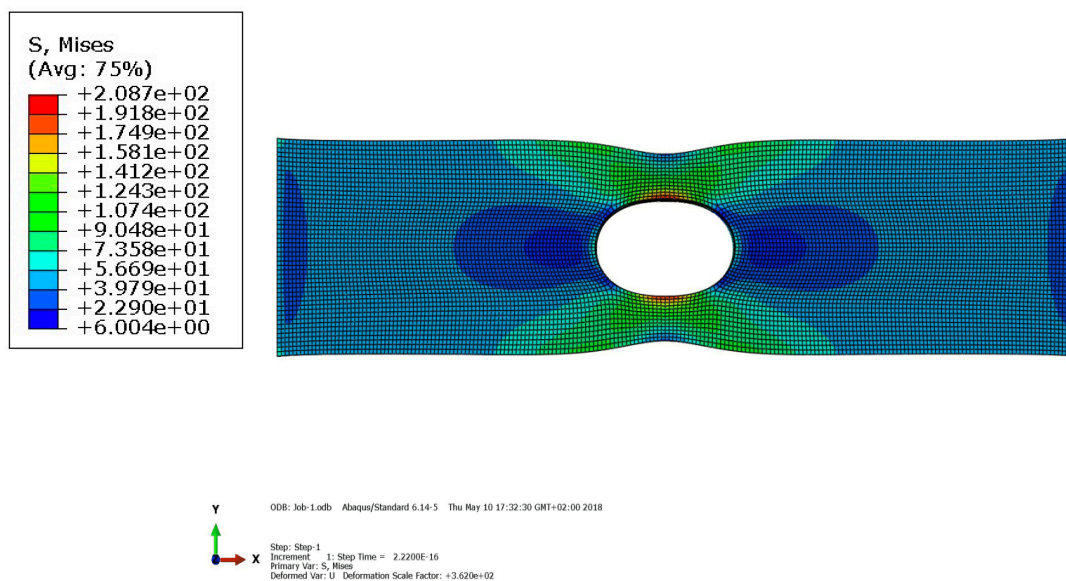


Obr. 16: Síť elementů vzorku

Dalším krokem je vytvoření vetknutí modelu na pravé straně, zatímco na levé straně zadáme tahové zatížení o síle 30 000 N. Jakmile máme vetknutí a zatížení nastavené, můžeme přejít k samotnému výpočtu. Ten nastavíme v sekci Job, kde spustíme kompletní analýzu modelu a pro větší názornost necháme průběh napětí vykreslit v barevném spektru, což lze pozorovat na Obr. 17 a Obr. 18.



Obr. 17: Zvětšené deformace vzorku a barevně vyznačená napětí



Obr. 18: Pohled zepředu na výsledek simulace zatížení vzorku

Nejvyšší hodnota napětí ve vzorku se rovná  $208,7 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ . Dle předpokladů se toto maximální napětí nachází v nejužším místě mezi hranou vzorku a okrajem díry. Tuto hodnotu napětí tedy definujeme jako  $\sigma_{\max}$  a hodnotu  $\sigma_{\text{nom}}$  vypočítáme následovně.

$$\sigma_{\text{nom}} = \frac{F}{A}, \quad (17)$$

kde  $F$  je působící tahová síla na vzorek a  $A$  je obsah průřezu vzorku v místě nejmenší vzdálenosti mezi hranou vzorku a okrajem díry, tedy

$$\sigma_{nom} = \frac{30\,000}{(51,116 - 29,54) \cdot 13,036} = 106,66 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}. \quad (18)$$

Součinitel tvaru  $\alpha$  dostaneme dosazením do vztahu (16)

$$\alpha = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} = \frac{209}{106,661} \cong 1,96 \quad (19)$$

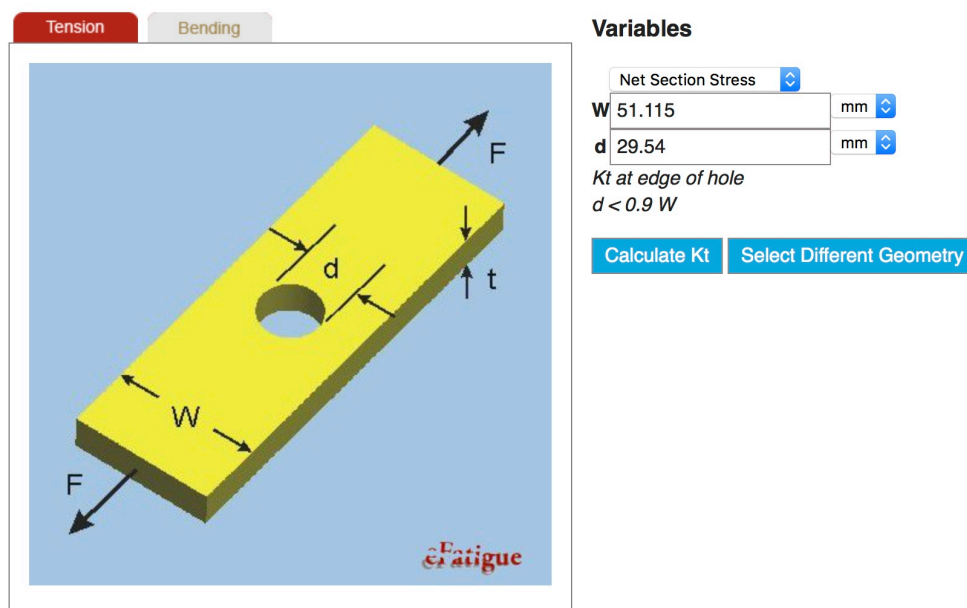
## 9 Výpočet součinitele tvaru $\alpha$ pomocí webu efatigue.com

Za druhý způsob výpočtu součinitele tvaru  $\alpha$  jsem si zvolil webový server efatigue.com od firmy Altair, která je specialistou ve vytváření simulačních softwarů pro strojní odvětví. Tato webová stránka nabízí širokou škálu možností výpočtu součinitele tvaru  $\alpha$  v součástech různých tvarů.

Na hlavní stránce efatigue.com jsem si pod rubrikou „Fatigue Technologies“ zvolil záložku „Stress concentration“. Po otevření okna jsem vybral možnost „Rectangular bar“, kde se objevilo množství různých součástí. Pro účely této práce jsem zvolil „Plate with a symmetric hole“, což se nejlépe podobá vzorku, který jsem změřil. Po rozkliknutí této součásti se otevře další okno, ve kterém lze vidět obecně okótovanou součást a možnost vepsání vlastních rozměrů a zvolení příslušných jednotek. Pro výpočet součinitele tvaru  $\alpha$  jsem zvolil možnost „Calculate Kt“. [6]

### Stress Concentration Factor Finder

#### Plate with a Circular Symmetric Hole



The screenshot displays the 'Stress Concentration Factor Finder' tool interface. On the left, a 3D model of a yellow rectangular plate with a circular hole is shown under tension. The width is labeled 'W', the hole diameter is 'd', and the thickness is 't'. Force vectors 'F' are applied to the ends of the plate. The interface includes tabs for 'Tension' and 'Bending'. On the right, the 'Variables' section contains a dropdown for 'Net Section Stress', input fields for 'W' (51.115 mm) and 'd' (29.54 mm), and a note 'Kt at edge of hole d < 0.9 W'. Below the variables are buttons for 'Calculate Kt' and 'Select Different Geometry'.

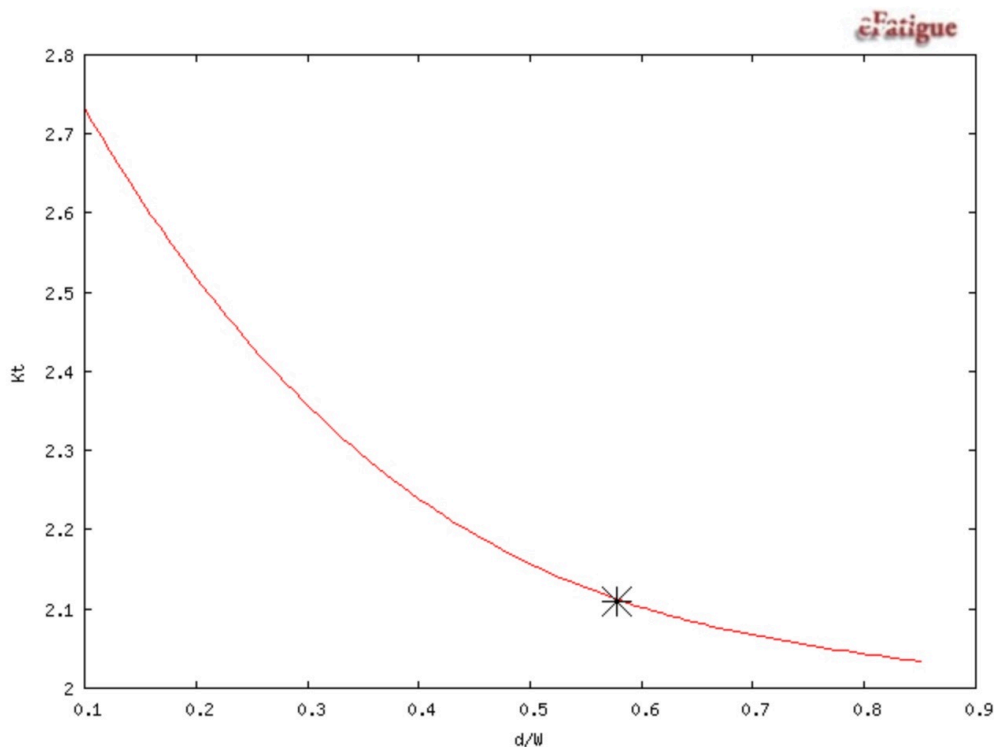
Obr. 19: Rozhraní webu efatigue.com pro výpočet součinitele tvaru  $\alpha$  [14]

Po spuštění „Calculate Kt“ se nám pod obrázkem součásti objeví graf závislosti poměru šířky vzorku a průměru díry s hodnotou součinitele a zároveň číselný výsledek součinitele tvaru  $\alpha$  (web efatigue.com používá anglické pojmenování součinitele tvaru Kt), tedy  $Kt = \alpha = 2,11$ .

## Results

$$K_t = 2.11$$

### Peterson Plot



Obr. 20: Graf závislosti součinitele tvaru a poměrem šířky vzorku a průměrem díry [14]

Pro lepší názornost jsem aproximoval křivku pomocí programu Excel, kdy jsem si vytvořil několik bodů, jejichž souřadnice jsem odečetl z výše uvedeného grafu webu [efatigue.com](http://efatigue.com), a poté body proložil polynomicou křivkou čtvrtého stupně. Výsledná rovnice polynomické křivky čtvrtého stupně je:

$$y = 1,047 \cdot \left(\frac{d}{W}\right)^4 - 3,32369 \cdot \left(\frac{d}{W}\right)^3 + 4,5247 \cdot \left(\frac{d}{W}\right)^2 - 3,3099 \cdot \left(\frac{d}{W}\right)^1 + 3,30202 \quad (20)$$

Po zadání hodnot rozměrů vzorku, tedy  $d = 29,54$  mm,  $W = 51,115$  mm, z čehož vyplývá  $d/W = 0,577913$  se  $K_t = \alpha = 2,11$ . Můžeme tedy potvrdit relativně přesnou aproximaci funkce pro výpočet součinitele  $\alpha$ .

## 10 Experimentální měření deformací vzorku pomocí odporových tenzometrů

### 10.1 Používané typy tenzometrů

Pro účely této práce jsem zvolil dva typy odporových tenzometrů od firmy HBM, jejichž parametry uvádím v Tabulce 6.

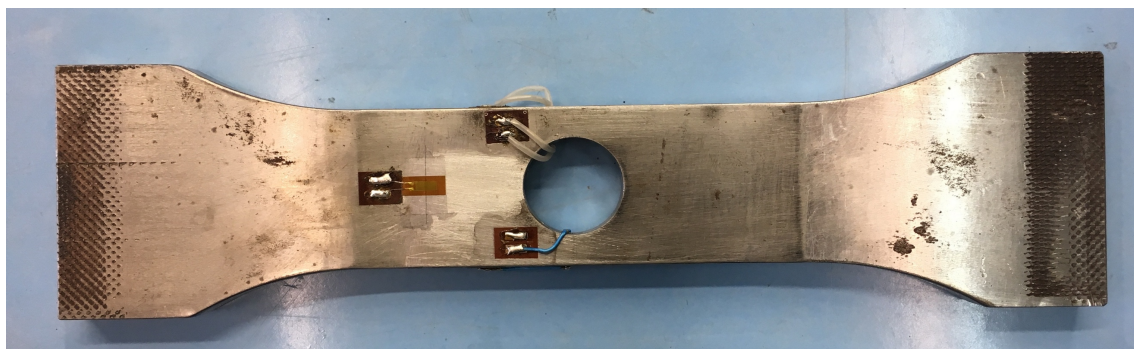
	Typ tenzometru	
	1-LY41-0,6/120	1-LY11-6/350
Velikost měřicí mřížky [mm]	0,6	6
Odpor [ $\Omega$ ]	120	350
k-faktor [ ]	$1,69 \pm 1,5$ [%]	$2,05 \pm 1,0$ [%]
Teplotní kompenzace pro: [ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]	ocel - $\alpha = 10,8$	ocel - $\alpha = 10,8$
Teplotní koeficient [ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]	$104 \pm 10$	$93 \pm 10$
Označení během měření	T1, T2	T3, T4, T5, T6

Tabulka 5: Parametry odporových tenzometrů

### 10.2 Příprava povrchu a lepení tenzometru

Aby měření proběhlo co možná nejpřesněji, je nezbytné, aby při lepení tenzometrů na vzorek byl povrch vzorku důkladně očištěn, včetně použitého nářadí. Povrch bylo třeba zbavit mechanických a korozních nečistot, orýsovat měřená místa, finálně odmastit a očistit povrch.

Poté jsem mohl tenzometr přenést na součást – pomocí izolepy pro následnou fixaci konečné polohy. Následně jsem nanesl tenkou vrstvu speciálního lepidla určeného pro lepení tenzometrů, lepidlo rozetřel tak, aby vznikla tenká vrstva rozprostřená po celé ploše tenzometru a přitlačil jej přes krycí fólii. Lepidlo jsem nechal vytvrdnout a poté odstranil izolepu. [2]

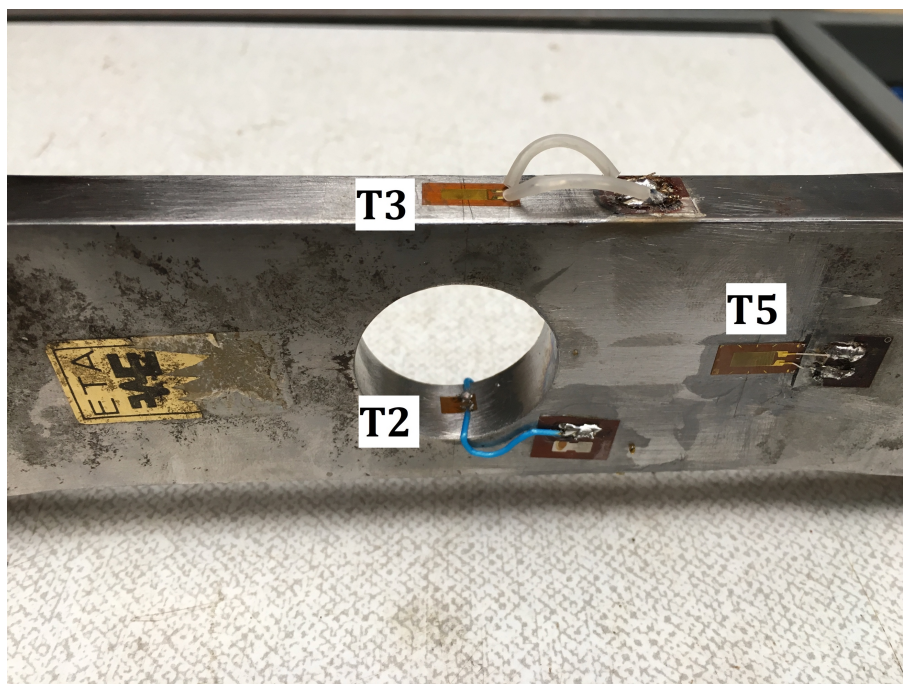


Obr. 21: Očištěný vzorek s nalepenými tenzometry

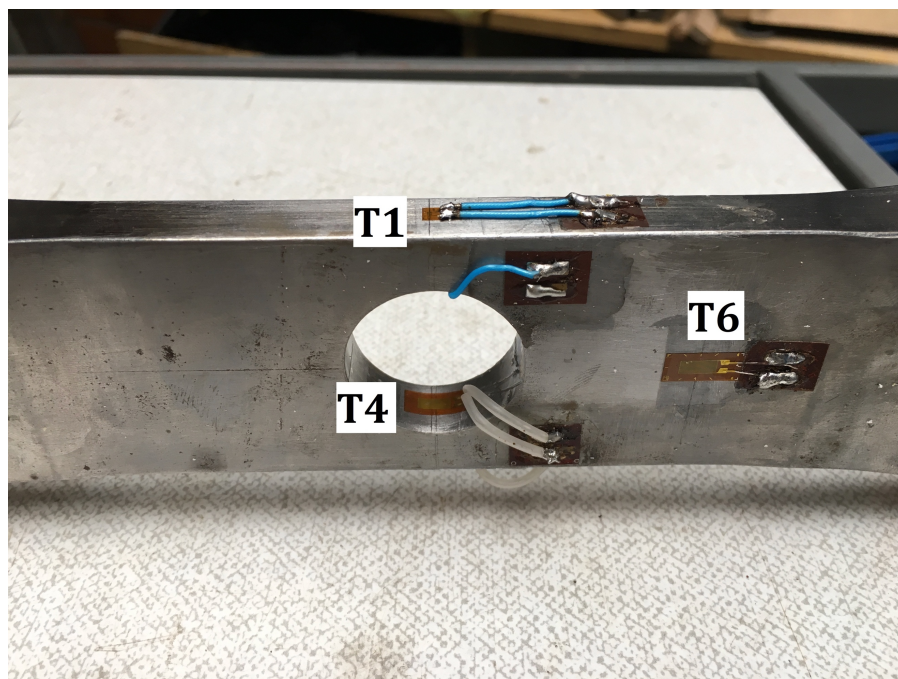


Celkem se pro měření použilo šest tenzometrů – dva z nich o velikosti měřicí mřížky 0,6 mm a zbylé čtyři o velikosti 6 mm. Umístění tenzometrů a jejich značení lze vidět na Obr. 22 a

Obr. 23.



Obr. 22: Označení tenzometrů 1

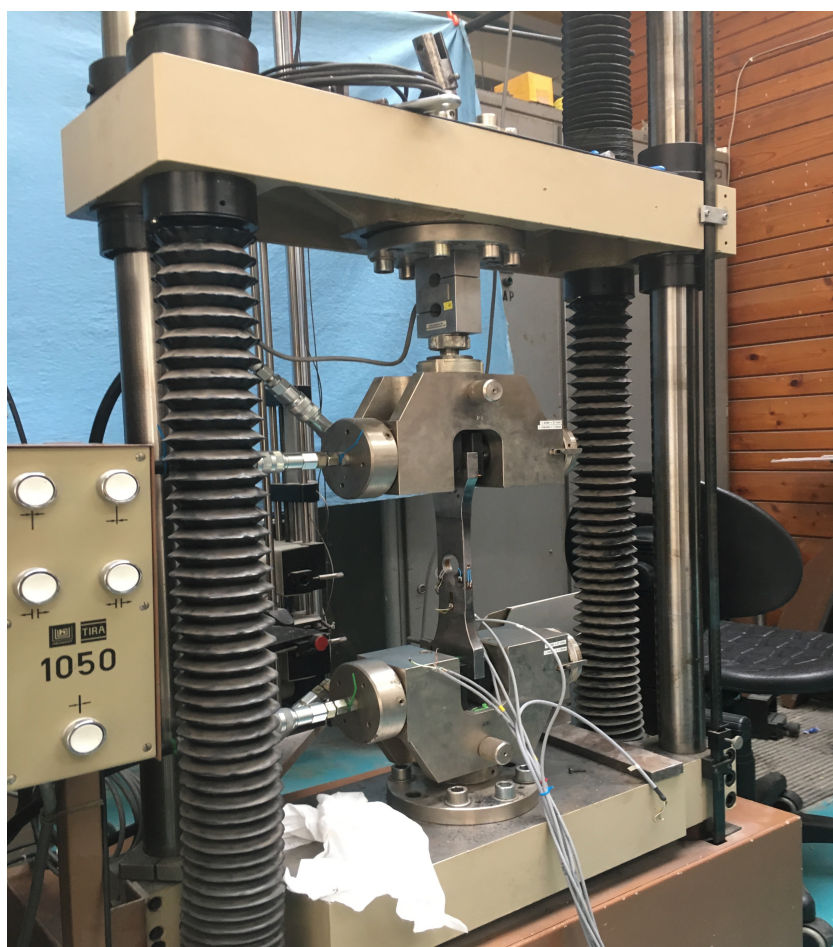


Obr. 23: Označení tenzometrů 2

### 10.3 Připojení tenzometru a umístění vzorku do trhacího stroje

Dále bylo nutné připojit vodiče z tenzometru k pomocné svorkovnici a zkontrolovat nominální odpor tenzometru pomocí ohmmetru. Po úspěšné kontrole odporu můžeme připojit tenzometr k aparatuře. Zapojení bylo realizováno do čtvrt mostu s ohledem na relativně ustálenou okolní teplotu během měření a měření v jedné ose zatížení.

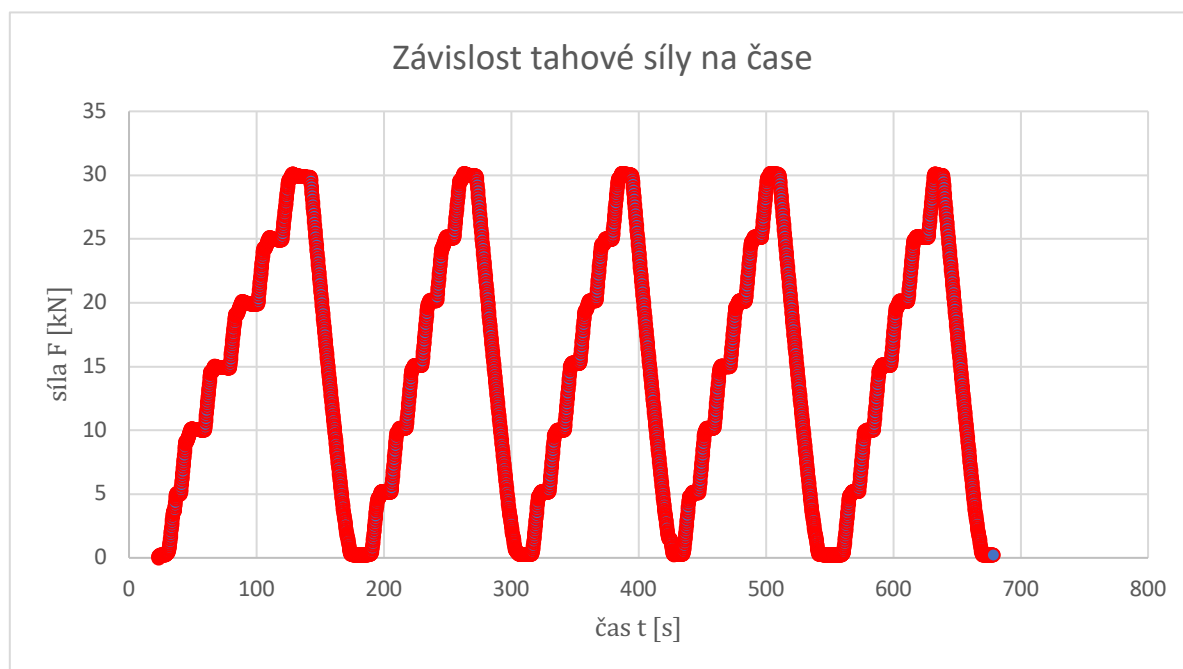
Po zapojení tenzometru do aparatury jsem umístil vzorek do trhacího stroje VEB TIW RAEUNSTEIN TT 2300/BR, jak lze vidět na Obr. 24.



*Obr. 24: Trhací stroj s umístěným měřeným vzorkem*

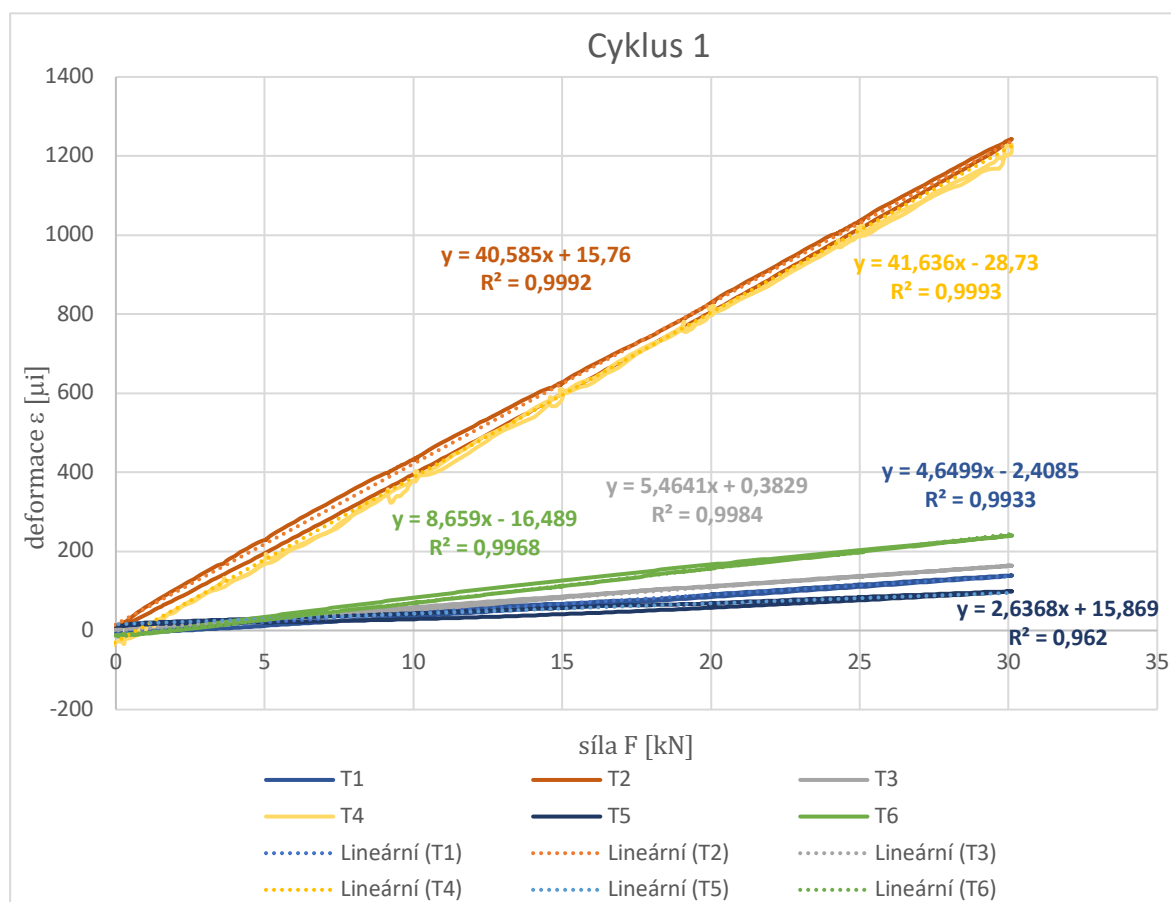
## 10.4 Naměřené a vypočtené hodnoty

Na trhacím stroji jsem postupně nastavoval tahové zatížení od 0 N do 30 kN s tím, že vždy při násobku 5 kN se nechalo zatížení chvíli ustálené na dané hodnotě, aby se mohla ustálit i hodnota signálu z tenzometrů. Tento cyklus jsem opakoval celkem pětkrát pro vyšší přesnost měření. Průběh sil v závislosti na čase je znázorněn na Obr. 25.



Obr. 25: Závislost tahové síly na čase

Celkem tedy vidíme 5 zatěžovacích cyklů, které mají velice podobný průběh. Mohl jsem tak z průběhu hodnot deformací v jednotlivých cyklech spočítat průměr a směrodatnou odchylku a určit výslednou hodnotu. Naměřené hodnoty z jednotlivých cyklů zatěžování jsem pomocí programu Excel graficky znázornil, lineárně aproximoval spojnici trendu, určil rovnici linearizované křivky a koeficient korelace R. Průběh deformací v závislosti na zatěžovací síle během prvního cyklu lze vidět na Obr. 26. V přílohách 1 až 5 je znázorněn průběh deformací v ostatních cyklech.



Obr. 26: Závislost deformací na zatěžovací síle během prvního cyklu

Hodnoty koeficientů korelací se blíží hodnotě 1, tudíž můžeme lineární aproximaci uvažovat za spolehlivou. V Tabulce 6 je přehled všech hodnot směrnic lineární aproximace průběhu a výsledné určení průměrné hodnoty a směrodatné odchylky. Hodnoty u tenzometrů T5 a T6 zprůměrujeme a nahradíme jedinou výslednou hodnotou fiktivního tenzometru T7, se kterou budeme nadále počítat, z důvodu eliminace ohybového zatížení.

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
cyklus 1	4,650	40,590	5,464	41,636	2,637	8,659	5,648
cyklus 2	4,894	41,220	5,278	40,986	2,917	8,361	5,639
cyklus 3	4,919	41,318	5,260	40,782	3,016	8,255	5,6355
cyklus 4	4,929	41,383	5,253	40,721	3,057	8,208	5,6325
cyklus 5	4,906	41,398	5,259	40,815	3,058	8,224	5,641
průměr	4,859	41,181	5,303	40,988	2,937	8,342	5,6392
S.O.	0,105	0,304	0,081	0,336	0,159	0,167	0,005

Tabulka 6: Přehled hodnot lineární aproximace průběhu deformací

Výsledné rovnice lineárních aproximací průběhů deformací jednotlivých tenzometrů jsou vypsány v Tabulce 7, kde  $y = \varepsilon$  [ $\mu\text{i}$ ] a  $x = F$  [kN].

	Rovnice lineární aproximace průběhu deformací
T1	$y = 4,859x \pm 0,105$
T2	$y = 41,181x \pm 0,304$
T3	$y = 5,303x \pm 0,081$
T4	$y = 40,988x \pm 0,336$
T5	$y = 2,937x \pm 0,159$
T6	$y = 8,342 \pm 0,167$
T7	$y = 5,6392x \pm 0,005$

*Tabulka 7: Přehled výsledných rovnic lineárních aproximací průběhů deformací*

Jak jsem již uvedl, aproximace je vzhledem k vysoké hodnotě koeficientu korelace relativně přesná, použijeme tyto rovnice pro výpočet hodnoty deformací  $\varepsilon$  v určitých hodnotách tahového zatížení. Například pro výpočet deformací v místě tenzometru T1 během tahového zatížení 5 kN dosadíme do rovnice následovně:

$$y = 4,568 \cdot 5 = 22,84 \mu\text{i} \quad , \quad (21)$$

pro výpočet ostatních hodnot jsem postupoval analogicky. Výsledky jsou přehledně uvedeny v Tabulce 8.

	T1 [ $\mu\text{i}$ ]	T2 [ $\mu\text{i}$ ]	T3 [ $\mu\text{i}$ ]	T4 [ $\mu\text{i}$ ]	T7 [ $\mu\text{i}$ ]
0 [kN]	0	0	0	0	0
5 [kN]	22,84	205,905	26,515	204,94	28,196
10 [kN]	45,68	411,81	53,03	409,98	56,392
15 [kN]	68,52	617,715	79,545	614,82	84,588
20 [kN]	91,36	823,62	106,06	819,76	112,784
25 [kN]	114,2	1029,525	132,575	1024,7	140,98
30 [kN]	137,04	1235,43	159,09	1229,64	169,176

*Tabulka 8: Hodnoty deformací během tahového zatížení*

### 10.4.1 Výpočet součinitele tvaru $\alpha$

Doposud jsem změřil a poté vypočítal hodnoty deformací. Nyní mohu pomocí vztahu z Hookova zákona

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (22)$$

spočítat hodnotu napětí v daném místě, protože hodnota modulu pružnosti měřeného vzorku je  $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$  a hodnoty deformací mi zprostředkovala tenzometrická měření, respektive aproximace jejich průběhu. Nutno dodat, že v rámci této práce, kdy jsem v předchozí kapitole vytvořil simulaci deformace vzorku při zatížení 30 kN, budu počítat s deformacemi při téže hodnotě zatížení,

$$\sigma_{T2} = E \cdot \varepsilon_{T2} = 0,21 \cdot 1235,43 = 259,440 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (23)$$

$$\sigma_{T4} = E \cdot \varepsilon_{T4} = 0,21 \cdot 1229,64 = 258,224 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2} \quad (24)$$

Dále dle vztahu (19) dopočítám hodnotu součinitele tvaru  $\alpha$  v místě tenzometrů T2 a T4,

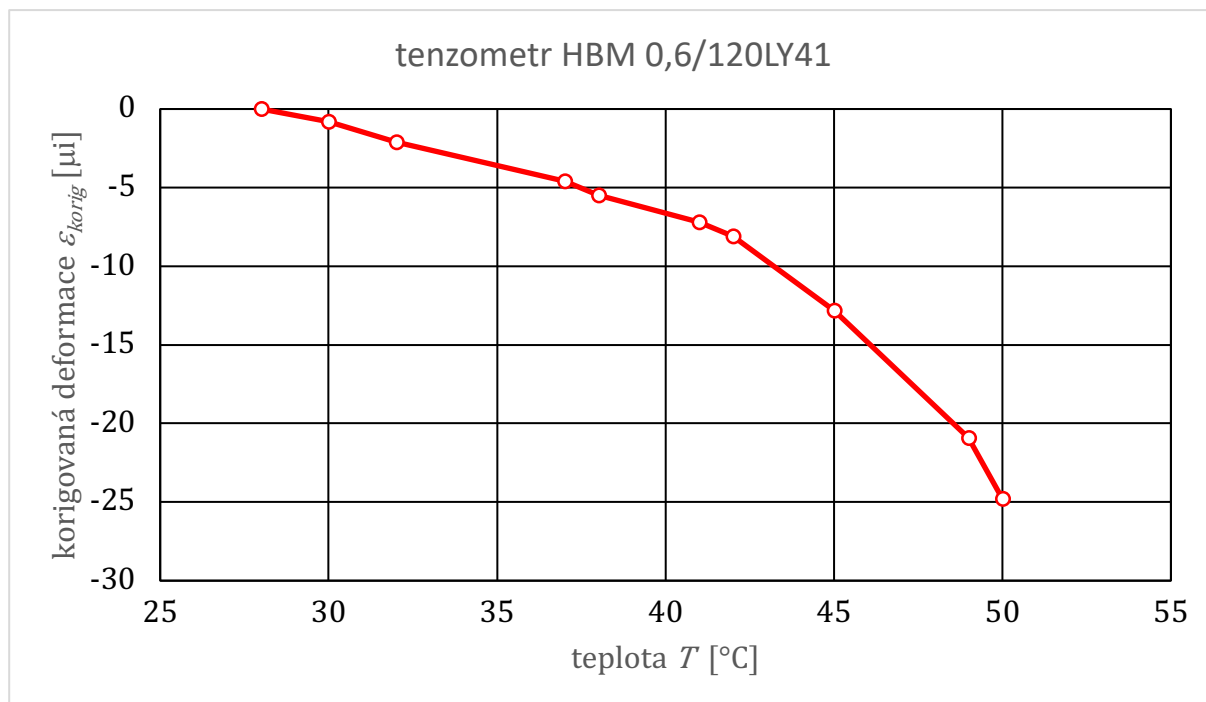
$$\alpha_{T2} = \frac{\sigma_{T2}}{\sigma_{nom}} = \frac{259,440}{106,661} \cong 2,43 \quad (25)$$

$$\alpha_{T4} = \frac{\sigma_{T4}}{\sigma_{nom}} = \frac{258,224}{106,661} \cong 2,42 \quad (26)$$

## 11 Zjištění vlivu okolní teploty na přesnost měření deformací

Další ze zajímavých vlastností tenzometrů je citlivost měřicí mřížky na změny okolní teploty. V rámci balení od výrobce mnou použitých tenzometrů v této práci byla i křivka závislosti změny deformací na změně teploty. Tato křivka v podstatě říká, jak se změní výchozí hodnota naměřených deformací s ohledem na to, v jakém prostředí bude tenzometr použit. Abych si tuto informaci ověřil, provedl jsem vlastní experiment, kdy jsem na oba tenzometry, respektive na jejich měřicí mřížku, v nezátíženém stavu, působil teplým vzduchem z fěnu, teplotu měřil bezdotykovým teploměrem a sledoval, jak se bude měnit hodnota signálu vycházejícího z tenzometrů.

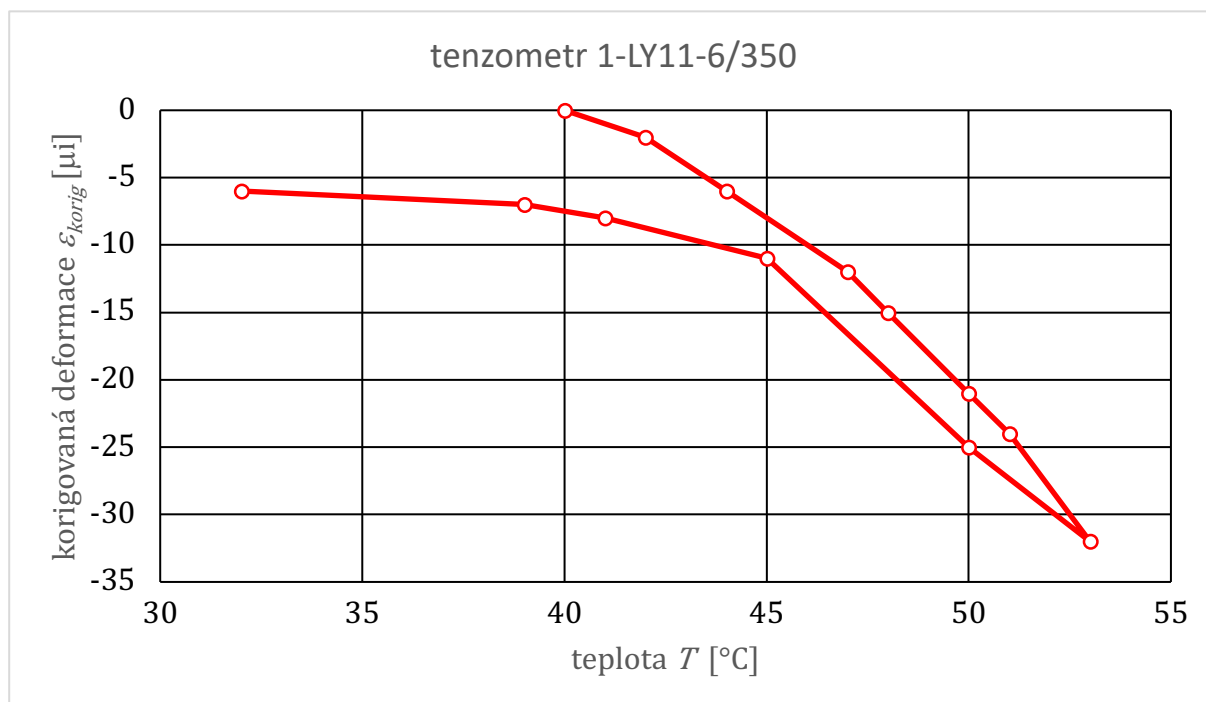
Nejprve jsem experiment provedl na tenzometru HBM 0,6/120LY41. Průběh změny deformací závislých na změně teploty jsem graficky zpracoval, viz. Obr. 27.



Obr. 27: Závislost deformací na změně teploty u HBM 0,6/120LY41

Z tohoto grafu lze pozorovat, že na rozsahu cca 25 °C se změnila deformace měřicí mřížky o 25 μi.

Poté jsem stejný postup použil i na tenzometr HBM 1-LY11-6/350, kde jsem ještě zkoumal ochlazování měřicí mřížky, a jakým způsobem se bude křivka závislosti chovat. Průběh ohřívání a ochlazování lze pozorovat na Obr. 28.



Obr. 28: Závislost deformací na změně teploty u HBM 1-LY11-6/350

I zde vidíme, že při ohřevu z původní teploty 40 °C na 53 °C, tedy při rozsahu teplot o 13 °C, se změnila deformace o 32  $\mu$ i a při zpětném ochlazení na teplotu 32 °C, při rozsahu teplot o 21 °C, narostla deformace mřížky o 25  $\mu$ i.



## Závěr

V této práci jsem se zabýval tématem odporové tenzometrie, která je, jak jsem již několikrát zmiňoval, v dnešní praxi metodou měření deformací velice často používanou a v některých odvětvích průmyslu dokonce zásadní.

Cílem této práce v teoretické části bylo provedení rešerše stavu v oblasti odporové tenzometrie a používání tenzometrů v experimentální praxi. Vytvořil jsem tedy základní přehled druhů tenzometrů a jejich vlastností, a možné parazitní vlivy, které je potřeba brát v potaz při měření a vyhodnocování naměřených dat.

V praktické části bylo mým hlavním cílem provést tenzometrická měření pro ověření základních vlastností a vytvořit jednoduchý výpočtový model k ověření a porovnání těchto vlastností. Měření byla uskutečněna na výchozím vzorku, jehož rozměry jsem změřil proto, abych mohl vytvořit výpočtový model v simulačním programu Abaqus. Zatížení vzorku v programu jsem nastavil na tahové, při síle 30 kN. Dále jsem provedl tenzometrické měření zatíženého vzorku v laboratoři, kde jsem v pěti cyklech tahově zatěžoval výchozí vzorek v rozmezí 0 - 30 kN. Pro měření jsem použil dva typy tenzometrů o rozdílné délce měřicí mřížky, tedy 0,6 mm a 6 mm. Potvrdilo se mi, že s přibývajícím hodnotou tahového zatížení se měřená deformace zvyšuje a mohl jsem tedy porovnat naměřené hodnoty z tenzometrů a vypočtené hodnoty ze simulačního softwaru při hodnotě tahového zatížení 30 kN. Pro přehlednost uvažujme zkoumaná místa na vymodelovaném vzorku ekvivalentní umístění tenzometrů na fyzickém vzorku, která jsou znázorněna na Obr. 22. a Obr. 23.

	T1 [N.mm <sup>-2</sup> ]	T2 [N.mm <sup>-2</sup> ]	T3 [N.mm <sup>-2</sup> ]	T4 [N.mm <sup>-2</sup> ]	T5 [N.mm <sup>-2</sup> ]	T6 [N.mm <sup>-2</sup> ]
Tenzometrické měření	28,778	259,44	33,409	258,224	18,503	52,555
Abaqus	22,9	208,7	22,9	208,7	39,7	39,7

Je patrné, že naměřené a vypočtené hodnoty se na určitých místech k sobě blíží, a na některých místech je rozdíl mezi nimi větší. To může být způsobeno další deformací – v ohybu, což jasně ukazují hodnoty tenzometrů T5 a T6. Nicméně, mohu konstatovat, že tenzometrické měření proběhlo úspěšně, protože tenzometry ukazují hodnoty podobné simulaci.

Dalším z experimentů bylo porovnání výsledků součinitele tvaru  $\alpha$  jednotlivých metod.

Tenzometrické měření	Abaqus	web firmy Altair
$\alpha_{T2} = 2,43 \mid \alpha_{T4} = 2,42$	$\alpha = 1,96$	$\alpha_{T2} = 2,11$

Z těchto výsledků lze opět pozorovat, že tenzometrické měření je opět rovnocennou metodou pro zjišťování deformací v součásti v porovnání s ostatními metodami. Taktéž vidíme i vliv velikosti měřicí mřížky na měření. Tenzometr T2 o velikosti měřicí mřížky 0,6 mm integroval gradient napětí po kratší cestě než tenzometr T4 o velikosti měřicí mřížky 6 mm, proto je výsledná hodnota součinitele tvaru  $\alpha$  větší.

Posledním experimentem v této práci bylo ověření vlivu okolní teploty na měření tenzometry. Mohu tedy deklarovat, že tenzometr HBM 0,6/120LY41, který má menší měřicí mřížku, než tenzometr HBM 1-LY11-6/350, je méně citlivý na změny teploty než druhý zmiňovaný typ, protože byl poměr deformací na určitém rozsahu teplot menší. Tato vlastnost může být výhodná pro měření s proměnlivým teplotním okolím. Dále jsem porovnal mnou zjištěnou křivku a křivku od výrobce a zjistil jsem, že průběh je podobný a nacházím se ve velice podobných intervalech hodnot.

Vhodnost použití větší, či menší velikosti měřicí mřížky tak záleží na aplikaci tenzometru, zda-li je potřeba znát co nejpřesnější hodnotu deformací v jednom místě, či chceme znát střední hodnotu deformací v širší oblasti.

## 12 Seznam použité literatury

- [1] VALENTA, František. Pružnost a pevnost III. Vyd. 2. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 8001024806
- [2] [ŘEZNÍČEK, J. 2014 Přednášky Experimentální metody certifikace strojů, ČVUT v Praze, 2015 <[www.pruznost.unas.cz](http://www.pruznost.unas.cz)>
- [3] VLK, M. at al. Experimentální mechanika. Brno, 2003.  
<<http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/umt/exp.mech.pdf>>
- [4] VOJÁČEK, Antonín. Odporové tenzometry - princip, provedení, použití, historie. In: *Automatizace.HW.cz* [online]. Praha: HW server, 2017, 19. Březen 2017 - 20:33 [cit. 2018-03-02]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/foliove-odporove-tenzometry-princip-provedeni-pouziti-historie.html>
- [5] HOFFMANN, Karl. *An Introduction to Measurements using Straining Gages*. Darmstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik, 1989.
- [6] *Fatigue Analysis on the Web* [online]. Detroit: Altair, ©2008-2018 [cit. 2018-07-18]. Dostupné z: [www.efatigue.com](http://www.efatigue.com)
- [7] MICHALEC, Jiří. *Pružnost a pevnost I*. 3. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 9788001042243.
- [8] MICHALEC, Jiří. *Pružnost a pevnost II*. Praha: České vysoké učení technické, 1994. ISBN 8001010872.

## 13 Seznam zdrojů obrázků

- [7] Měření neelektrických veličin. In: *Home ZČU* [online]. Praha: ZČU v Plzni - Fakulta strojní, 2014 [cit. 2018-07-18]. Dostupné z:  
<http://home.zcu.cz/~formanek/mmvyuka/Data/silaazareni/tenzo.gif>
- [8] LY (lineární tenzometry). In: *HBM* [online]. Darmstadt: HBM, 2018 [cit. 2018-07-18]. Dostupné z: <https://www.hbm.cz/wp-content/uploads/LY-prehled.jpg>
- [9] VALENTA, František. *Pružnost a pevnost III*. Vyd. 2. přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 8001024806
- [10] VLK, M. at al. *Experimentální mechanika*. Brno, 2003.  
<http://www.fme.vutbr.cz/opory/pdf/umt/exp.mech.pdf>
- [11] Tenzometr - VTS Zlín s.r.o. In: *VTS Zlín s.r.o.* [online]. Zlín: VTS Zlín, 2018 [cit. 2018-07-18]. Dostupné z: <https://vtsz.cz/img/0157/317.jpg>
- [12] Mechanical aircraft testing. In: *HBM* [online]. Darmstadt: HBM, 2017 [cit. 2018-07-18]. Dostupné z: <https://www.hbm.com/en/6711/webinar-mechanical-aircraft-testing-mgcplus-new-features-june-27/>
- [13] HOFFMANN, Karl. *An Introduction to Measurements using Strain Gages*. Darmstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik, 1989.
- [14] *Fatigue Analysis on the Web* [online]. Detroit: Altair, ©2008-2018 [cit. 2018-07-18]. Dostupné z: [www.efatigue.com](http://www.efatigue.com)

## 14 Seznam obrázků

Obr. 1: Rozdělení odporových tenzometrů .....	- 4 -
Obr. 2: Zobrazení drátkového tenzometru [7] .....	- 5 -
Obr. 3: Zobrazení fóliového tenzometru [7] .....	- 5 -
Obr. 3a: Fóliové tenzometry HBM [8] .....	- 5 -
Obr. 4: Zobrazení vrstvého tenzometru [7] .....	- 6 -
Obr. 5: Zobrazení polovodičového tenzometru [7] .....	- 7 -
Obr. 6: Rozdělení tenzometrů a) - l) [9] .....	- 9 -
Obr. 7: Speciální typy tenzometrů pro odvrtávací metodu [10] .....	- 9 -
Obr. 8: Přivařovací tenzometr [11] .....	- 10 -
Obr. 9: Tenzometr bez podložky [11] .....	- 10 -
Obr. 10: Schématické znázornění použití tenzometrů v letectví [12] .....	- 11 -
Obr. 11: Teplotní odezva tenzometrů [13] .....	- 13 -
Obr. 12: Závislost chem. složení tenzometrů na teplotním součiniteli el. odporu [13] .....	- 14 -
Obr. 13: Víceprvkové složení tenzometrů a jejich samokompenzační vlastnosti [13] .....	- 15 -
Obr. 14: Příčiny příčné citlivosti v odporovém tenzometru [13] .....	- 16 -
Obr. 15: 3D model měřeného vzorku .....	- 17 -
Obr. 16: Síť elementů vzorku .....	- 19 -
Obr. 17: Zvětšené deformace vzorku a barevně vyznačená napětí .....	- 20 -
Obr. 18: Pohled zepředu na výsledek simulace zatížení vzorku .....	- 20 -
Obr. 19: Rozhraní webu efatigue.com pro výpočet součinitele tvaru $\alpha$ [14] .....	- 22 -
Obr. 20: Graf závislosti součinitele tvaru a poměrem šířky vzorku a průměrem díry [14] ..	- 23 -
Obr. 21: Očištění vzorek s nalepenými tenzometry .....	- 24 -
Obr. 22: Označení tenzometrů 1 .....	- 25 -
Obr. 23: Označení tenzometrů 2 .....	- 25 -
Obr. 24: Trhací stroj s umístěným měřeným vzorkem .....	- 26 -
Obr. 25: Závislost tahové síly na čase .....	- 27 -
Obr. 26: Závislost deformací na zatěžovací síle během prvního cyklu .....	- 28 -
Obr. 27: Závislost deformací na změně teploty u HBM 0,6/120LY41 .....	- 31 -
Obr. 28: Závislost deformací na změně teploty u HBM 1-LY11-6/350 .....	- 32 -

## 15 Seznam tabulek

Tabulka 1: Srovnání kovových a polovodičových tenzometrů .....	- 7 -
Tabulka 2: Doplnující tabulka k obr. 10 [13].....	- 13 -
Tabulka 3: Doplnující tabulka k obr. 12 [13].....	- 15 -
Tabulka 4: Naměřené a vypočtené hodnoty rozměrů vzorku.....	- 18 -
Tabulka 5: Parametry odporových tenzometrů .....	- 24 -
Tabulka 6: Přehled hodnot lineární aproximace průběhu deformací.....	- 28 -
Tabulka 7: Přehled výsledných rovnic lineárních aproximací průběhů deformací .....	- 29 -
Tabulka 8: Hodnoty deformací během tahového zatížení.....	- 29 -

## 16 Přílohy

Příloha 1 - Závislost deformací na zatěžovací síle během druhého cyklu

Příloha 2 - Závislost deformací na zatěžovací síle během třetího cyklu

Příloha 3 - Závislost deformací na zatěžovací síle během čtvrtého cyklu

Příloha 4 - Závislost deformací na zatěžovací síle během pátého cyklu