

**Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích**

**Přírodovědecká fakulta**

**Měření přetvoření plastových dílů za působení  
vnějších vlivů**

Bakalářská práce

**Duda Milan, DiS.**

Školitel: Ing. Karel Muk

Konzultant: Ing. Jiří Maršík, Ph.D

České Budějovice 2018

## **Bibliografické údaje**

Duda, M., 2018: Měření přetvoření plastových dílů za působení vnějších vlivů. [Measurement strain on plastic parts under external influences. Bc. Thesis, in Czech.] – 59 p., Faculty of Science, University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic

## **ANOTACE**

Cílem této bakalářské práce je problematika měření přetvoření u plastových dílů za působení vnějších vlivů. Vybrat vhodnou měřicí metodu na měření přetvoření v průmyslových podmínkách. Výběr správné měřicí metody na základě její aplikace a citlivosti se zaměřením na tenzometry. Ověřit citlivost měřících metod na vybrané vnější vlivy (vlhkost, teplota a tlak) v dostupných laboratorních podmínkách.

## **ABSTRACT**

Targets of this Bachelor thesis are measurement of strains on plastic parts by external influences. To choose: suitable method by measure strain under industrial conditions, correct method based on their application and sensitivity focused on strain gages. To verify measurement method under of external influences (humidity, temperature and preassure) in accessible laboratory equipment.

## **Prohlašení**

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s §47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachovám mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích dne 17. dubna 2018 .....

Duda Milan, DiS.

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval panu Ing. Karlovi Mukovi za odborné vedení bakalářské práce a panu doc. RNDr. Petrovi Jelínkovi, Ph.D. za konzultace.

## **OBSAH:**

<b>1</b>	<b>Úvod a cíle práce .....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Historie měření přetvoření.....</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Možnosti měření přetvoření.....</b>	<b>10</b>
3.1	Tenzometry .....	10
3.2	Digitální korelační metoda .....	12
<b>4</b>	<b>Výběr vhodné metody na základě aplikace .....</b>	<b>13</b>
<b>5</b>	<b>Měření pomocí tenzometrů .....</b>	<b>15</b>
5.1	Měřicí princip tenzometru .....	15
5.2	Wheatstonův můstek .....	15
<b>6</b>	<b>Volba správného odporového tenzometru.....</b>	<b>19</b>
6.1	Odpor tenzometru.....	19
6.2	Délka mřížky.....	19
6.3	Typy mřížek tenzometrů.....	20
<b>7</b>	<b>Volba optimální metody měření pomocí tenzometrů.....</b>	<b>22</b>
7.1	Volba správného zapojení.....	23
<b>8</b>	<b>Vlivy na měření .....</b>	<b>24</b>
8.1	Teplota .....	24
8.2	Vlhkost.....	26
8.3	Tlak.....	26
<b>9</b>	<b>Další chyby při měření .....</b>	<b>27</b>
<b>10</b>	<b>Problematika měření plastových materiálů.....</b>	<b>28</b>
<b>11</b>	<b>Experimentální měření s tenzometry .....</b>	<b>31</b>
11.1	Výběr metody namáhání .....	31
11.2	Měřicí hardware a software.....	32
11.3	Příprava vzorků .....	34
11.4	Experimentální materiál.....	37



11.5	Parametry testů .....	39
11.6	Postupy měření .....	40
<b>12</b>	<b>Výsledky a diskuse .....</b>	<b>43</b>
12.1	Vliv teploty.....	43
12.2	Vliv vlhkosti.....	48
12.3	Vliv tlaku.....	50
<b>13</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>51</b>
<b>14</b>	<b>Použitá literatura .....</b>	<b>52</b>
<b>15</b>	<b>Použité internetové odkazy.....</b>	<b>53</b>
<b>16</b>	<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>54</b>
<b>17</b>	<b>Seznam tabulek.....</b>	<b>56</b>
<b>18</b>	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>57</b>

# 1 ÚVOD A CÍLE PRÁCE

Problematika měření přetvoření je v našem případě poměrně dost specifická, protože se jedná o provádění měření ve velmi malých a omezených prostorech. Velikost dílů je obvykle v jednotkách cm. Tyto díly se zpravidla skládají z několika komponent montovaných do sebe. Měřicí prostor je většinou omezený, protože se jedná o měření přímo ve strojích. Pro výběr měřicí metody se jedná o jedno z nejvýznamnějších kritérií.

Aplikace měření by měla být co nejjednodušší, univerzální a opakovatelná.

Experimentální část se bude provádět na plastových tělískách. Tělíska budou vystavena teplotě, vlhkosti a zatížení. Budou porovnávána oproti kovové planžetě. Měření přetvoření se nejvíce používá pro měření kovů. Plast má viskoelastické chování a parametry, které u kovů nemají takový vliv na přetvoření. Toto chování bude diskutováno.

Experimentální část bude věnována měření chování jednotlivých dílů, které budou vystavené stejným podmínkám. Výsledky budou porovnány. Pokusíme se porozumět chování dílů v jednotlivých případech.

## 2 HISTORIE MĚŘENÍ PŘETVOŘENÍ

Historie tenzometrie sahá do roku 1938, kdy byl vynalezen drátkový tenzometr.

Pravděpodobně nejvýznamnější roli v historii tenzometrů sehrála firma dnes známá jako Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (HBM). Tuto společnost založil Ing. Karl Hottinger v roce 1950. HBM úspěšně vyvinula a vyrábí tenzometry od roku 1955. Od původního omezeného využití tenzometrické technologie se rozsah aplikací s tenzometry rozrost téměř přes všechny technické sektory. Tenzometry se staly nezbytným nástrojem pro měření přetvoření, hledání příčin namáhání a měření konstrukcí.

V roce 1938 v USA, dva lidé pracovali téměř zároveň, ale nezávisle na použití nápadu využívající „Thompsnova jevu“ pro měření. Vývoj, který vedl k rozšíření tenzometrům.

„Fyzikální podstatu, na níž jsou založeny odporové tenzometry - závislost odporu elektrického vodiče na jeho prodloužení (v důsledku mechanického namáhání) - objevil již r. 1856 lord Kelvin (původním jménem William Thomson, 1824 - 1905). Objev zůstal dlouho technicky nevyužit.

Praotce tenzometru nelze jednoznačně říci. Může jím být Nernst, který v roce 1928 použil ve svém snímači tlaku dva odporové dráty, které byly deformovány úměrně velikosti působícího tlaku. Jindy jím bývá nazýván Carlsonův snímač pro měření přetvoření v betonu; byl popsán v roce 1931.

Rozdílný měřicí systém použil Charles Kearns, pracující u firmy Hamilton Standard Corporation. Jeho úkolem byla experimentální analýza napětí vrtulových listů během letu. K tomu použil uhlíkových odporů, přilepených přímo na vrtulové listy a přes kroužky zapojených do můstkových obvodů. Dle programu firmy, zavedeného ve třicátých letech, bylo vyrobeno asi 30 000 takových uhlíkových tenzometrů. Nevýhodou byla inherentní nestabilita, protože jejich odpor se měnil nejen s deformací, ale i s časem, teplotou a vlhkostí. Byl to ale důležitý krok ve vývoji tenzometrie. Autor byl za práci odměněn medailí Franklinova Institutu. Určitých úspěchů v tom směru dosáhly firmy AEG, Hamilton-Standard, Baldwin-Southwark.

Tak v polovině třicátých let byly známy dva typy tenzometrů – volný drát a lepený uhlíkový tenzometr. Již brzy měl být vynalezen lepený drátkový tenzometr a to nezávisle dvěma muži na univerzitách, situovaných na opačných pobřežích USA.

Edward Simmons byl v r. 1936 asistentem profesorů D. S. Clarka a G. Datwylera v kalifornském technologickém institutu (California Institute of Technology). Ti pracovali na dokonalejším tvaru siloměru pro rázové zkoušky. Potřebovali k tomu měřit i sílu, kterou na zkoušený vzorek působí kladivo. Ani Kearnsovy vylepšené typy s koloidálním grafitem nevyhověly.

V září 1936 doporučil Simmons Datwylerovi nalepit kousek jemného drátového odporu namísto uhlíkového tenzometru. Datwyler přijal jeho myšlenku a tak se vlastně narodil drátkový tenzometr.

Je pozoruhodné, že Simmons sám nevytvořil první tenzometr. Zkoušky dopadly dobře, výsledky byly reprodukovatelné a odpovídaly i teoretickým závěrům. O dva roky později, v roce 1938, Clark a Datwyler referovali o těchto pracích v Atlantic City, ale jméno Simmons přitom nepadlo.

Simmonsův patent, zapsaný roku 1940, mu byl 4x zamítnut a byl mu udělen až v roce 1942.

Ve stejné době – v roce 1938 – pracoval v Massachusetts Institute of Technology Arthur Ruge na návrhu konstrukcí odolných proti zemětřesení. Potřeboval znát odezvu modelu nádoby s vodou na působení dynamického zatížení. Ani on nebyl spokojen s uhlíkovými tenzometry. Nezávisle přišel na myšlenku odmotat tenký drát z drátkového odporu a tento drát (s jeho izolační vrstvou) nalepit přímo na konstrukci. Stejně jako již dříve zmínění pracovníci zjistil, že takovýto prvek pracuje pozoruhodně dobře. Dosažené výsledky předčily očekávání.

Při dalším vývoji – pro lepší manipulaci – lepil Ruge drátek na papírovou podložku. Připojovací vodiče byly pevně drženy v plastových hranolech. Svůj patent podal Ruge roku 1939.

I cesta ke komercializaci v USA byla zajímavá. Když Ruge ověřil vynikající vlastnosti tenzometru, bezprostředně odhadl (na rozdíl od Clarka, Datwylera a Simmonse) jeho význam pro obor zkoušení materiálu, pevnostní analýzy a pro stavbu snímačů mechanických veličin. Snažil se o rozšíření svého patentu a hledal k tomu vhodné obchodní cesty. Jeho kolega – Dr. de Forest – jednal převážně s firmou Baldwin – Southwark Corporation, která vyráběla stroje na zkoušení materiálu a průtahoměry.

Došlo pak k řadě dohod s touto firmou. Ruge a de Forest se totiž rozhodli vytvořit společnost nezávislou na firmě Baldwin, která bude tenzometry vyrábět a Baldwin je potom bude prodávat.

A tak byl na americkém úřadu pro patenty přihlášen patent na jméno Arthur Ruge. Ale v r. 1939 jim přišel do rukou článek publikovaný v r. 1938, ukazující prakticky stejný princip. To ovšem mohlo přihlášený patent vážně ohrozit: vynálezcem je ten, komu patří původní myšlenka, ne ten, kdo myšlenku realizuje nebo vylepší. Firma Baldwin se proto dohodla se Simmonsem na tom, aby u ní za úplatu uplatňoval svá práva. Nový tenzometr pak byl nazván SR-4 : „S“ a „R“ podle jmen Simmons a Ruge, číslice „4“ znamenala počet dalších 4 osob, které se podílely na závěrečných pracích (Tatnall, Clark, de Forest, Hathaway).

Brzy začala technická veřejnost oceňovat přínos odporové tenzometrie. Tak v r. 1941 řekl letecký konstruktér Lovie Tribit :“Tyto tenzometry jsou odpovědí z nebe na prosby leteckých konstruktérů.“ Podobně v r. 1944 prohlásil H.E. Saunders, technický ředitel firmy David Taylor Model Basin:“ Úspěšný vývoj lepených drátkových tenzometrů byl jednou z největších revolučních přeměn v technických vědách všech dob.“

Výroba snímačů a příslušných tenzometrických souprav se rozvinula během druhé světové války (např. v r. 1941 bylo za 2 měsíce vyrobeno 50 000 kusů tenzometrů) a v letech následujících.“ [1]

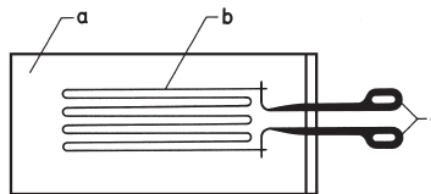
### 3 MOŽNOSTI MĚŘENÍ PŘETVOŘENÍ

#### 3.1 Tenzometry

##### Drátové tenzometry

Hlavní rozdíl mezi Simmonsovou a Rugovou ideou je ten, že Ruge připevnil měřící drát na nosný materiál, čímž získal nezávislý měřící nástroj, s kterým bylo možno jednoduše zacházet (Obr. 1). Tento typ tenzometru mohl být přilepen na jakýkoliv povrch.

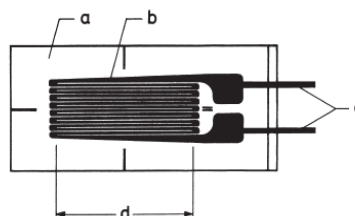
- bez podložky – Simmonsovo řešení – dnes se používá hlavně pro vysokoteplotní měření.
- s podložkou – Rugovo řešení



Obr. 1: Obvyklý vzhled drátového tenzometru, a) Nosný materiál, b) měřící mřížka, c) připojovací vodiče [2]

##### Foliové tenzometry

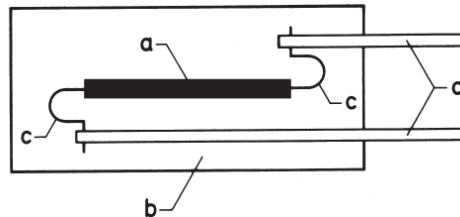
Tenzometr tohoto typu byl vynalezen už kolem roku 1952. V současné době nejpoužívanější tenzometry. Konstrukčně se jedná o velmi jemné tenzometry (Obr. 2). Rozměrově se bavíme o výšce tenzometru v rámci několik desítek  $\mu\text{m}$  a váze v jednotkách mg. Výhodou těchto tenzometrů je možnost volit směr a tvar mřížky, ta se vyrábí pomocí vyleptávání.



Obr. 2: Obvyklý vzhled jednoosého foliového tenzometru, a) nosný materiál, b) měřící mřížka, c) připojovací vodiče, d) efektivní měřící mřížka [2]

## Tenzometry polovodičové

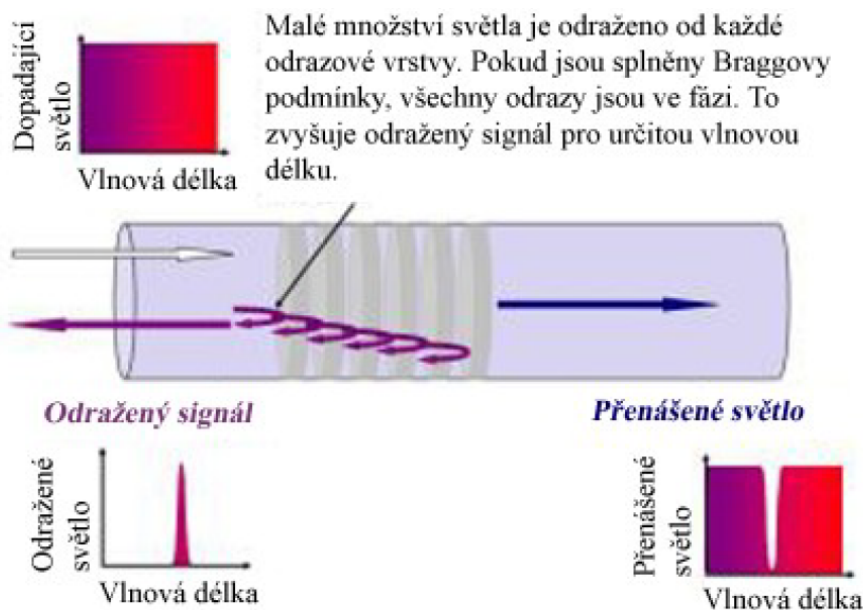
V konstrukci jsou polovodičové tenzometry velmi podobné jako kovové tenzometry (Obr. 3). Měřicí části obsahují: natahovací pásy o velikosti v řádu desetin mm dlouhých a několik setin mm širokých, které jsou připevněny na izolační materiál nosné folie a jsou doplněny o připojovací vodiče. Diodovému efektu je zabráněno použitím tenkých zlatých vodičů jako propojení mezi polovodičovými částmi a měřicími pásy.



**Obr. 3: Schématická reprezentace polovodičového tenzometru a) měřicí mřížka, b) nosný materiál, c) propojovací zlaté vodiče [2]**

## Optické lineární tenzometry

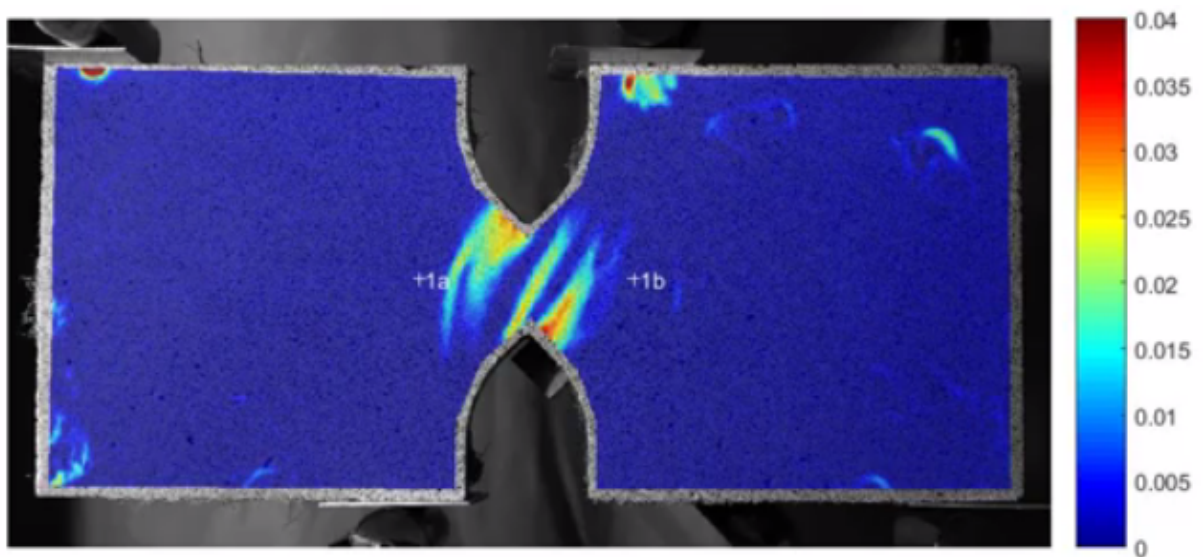
Jedná se o tenzometry, které má patentované společnost HBM. Tenzometry pracují na principu polopropustných zrcadel a Braggovy mřížky (Obr. 4). Hlavní výhodou tohoto typu tenzometru je inherentní odolnost vůči všem elektromagnetickým vlivům a možnost jejich zapojení do série, bez ovlivnění funkce. [17]



**Obr. 4: Princip optického tenzometru s Braggovou mřížkou [7]**

### 3.2 Digitální korelační metoda

Pro porovnání dvou obrazů mezi sebou, nalezení obrazů shodných bodů a pro měření paralaxy na digitálních snímcích je možné s výhodou využít korelačního počtu. Metoda slouží pro automatické vyhledávání bodů (image matching). Princip metody je založen na použití vzoru, části obrazu ve formě matice pixelů, která se posouvá po části obrazu, kde se předpokládá výskyt hledaného bodu a počítá se korelační koeficient pro jednotlivé polohy vzorového okénka (Obr. 5). [8]



Obr. 5: Digitální korelační metoda [9]



## 4 VÝBĚR VHODNÉ METODY NA ZÁKLADĚ APLIKACE

Přímé měření přetvoření lze provést pouze pomocí jedné metody, ta se nazývá tenzometrie. K výsledku se lze dostat i jinými způsoby, například početními způsoby, jako je korelační metoda, nebo pomocí simulace. Na použití jednotlivých metod se také vztahuje prostředí, ve kterém budeme test provádět a také na díly, které budeme zkoumat.

V našem případě by se mělo jednat o metodu, kterou lze snadno aplikovat a realizovat. Metoda by neměla být prostorově náročná z důvodu měření ve výrobních strojích a také měření přetvoření na malých dílech, které se z pravidla montují do sebe. Metoda by měla mít stabilní výsledky při opakovaném zatížení. Chyba měření by neměla přesáhnout 5 %.

Uvedená kritéria jsou v tomto případě pro nás závazná. Tab. 1 hodnotí výhody a nevýhody pro výběr nejvhodnější metody.

**Tab. 1: Přehled metod**

	Popis metody	Výhody	Nevýhody
Tenzometrie	Přilepení snímače na měřený povrch a následné měření.	- přímé měření přetvoření	- invazivní metoda
		- prostorově nenáročná	- požadavky na přesnost přípravy
		- měření ve skrytých místech	- působení vnějších vlivů
		- dlouhodobá stabilita	
Korelační metoda	Počítačem zpracovaná grafická data z reálného měření	- nepřímé měření přetvoření	- prostorově náročnější měření
		- neinvazivní metoda	- potřeba zajistit stálé světelné podmínky
		- nepůsobí vnější vlivy	- měření v dostupných místech
		- lokální měření	
Simulace	Počítačová simulace chování dílu	- nepřímé měření přetvoření	- vlivy na výsledek ze vstupních dat
		- není potřeba fyzický kus	- požadavky na kvalitní vstupní data
		- neinvazivní metoda	- časová náročnost sběru dat
		- simulování ve skrytých místech	

Z Tab. 1 nejlépe vychází dvě metody pro porovnání v experimentální části práce. Měření přetvoření pomocí tenzometrů a simulace. V experimentální části budou porovnány tyto 2 metody při měření přetvoření za působení teploty a zatížení.

## 5 MĚŘENÍ POMOCÍ TENZOMETRŮ

### 5.1 Měřicí princip tenzometru

Princip měření s tenzometry vychází z jednoduchého vztahu, kde změna délky vodiče má vliv na výsledný odpor:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (5.1)$$

$R$  – měrný odpor,  $\rho$  - měrný elektrický odpor,  $l$  – délka,  $S$  – příčný průřez drátu

Pro konečnou hodnotu změny odporu lze odvodit vztah:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (5.2)$$

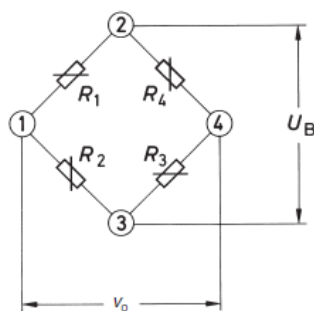
$k$  – deformační součinitel tenzometru označovaný také jako  $k$ -faktor (udávaný výrobcem)

Závislost mezi změnou odporu a přetvořením není lineární. Záleží na materiálu, z kterého je tenzometr vyroben. Tenzometry se nejčastěji vyrábějí s měřicí mřížkou z konstantanu. Do určité hodnoty deformace lze tuto hodnotu zanedbat, u konstantanu je tato hodnota 150 000  $\mu\text{m}/\text{m}$ . [1]

### 5.2 Wheatstonův můstek

#### Princip a popis výpočtu hodnoty můstku

Čtyři měřicí ramena, nebo také větve můstku jsou tvořeny odpory  $R_1$  až  $R_4$ . Rohové body mostu 2 a 3 je budící napájení (Obr. 6). Výstupní napájení  $V_o$  je k dispozici na bodech 1 a 4. Pro napájení je možno použít stabilizované stejnosměrné napájecí napětí, střídavé napětí a také proudový zdroj.



Obr. 6: Nákres Wheatstonova můstku,  $R_1 - R_4$  – měřící ramena,  $U_B(V_s)$  – excitační napětí,  $V_o$  – měřící napětí [2]

V případě, že napájecí napětí  $V_s$  je přivedeno na napájecí body 2 a 3, je můstek rozdělen na 2 části a to  $R_1, R_2$  a  $R_3, R_4$  a obvod je tím rozdělen na 2 napěťové děliče. Odpor zdroje musí být zanedbatelně malý a vnitřní odpor zařízení pro měření výstupního napětí velmi vysoký aby nezpůsobil žádné zatížení na můstku. Tento způsob je přijatelný, protože nástroje používané v tenzometrii splňují tyto požadavky ve velké míře.

Když měřící můstek není vyvážený, může to být způsobeno rozdílnými úbytky napětí na rezistorech  $R_1$  a  $R_2$  nebo  $R_3$  a  $R_4$ . Toto můžeme vypočítat vztahem

$$V_o = V_s \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right), \quad (5.3)$$

když má můstek všechny hodnoty rezistorů stejné, platí:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}, \quad (5.4)$$

při rozvažování můstku se pracuje se vztahem:

$$V_o = V_s \left( \frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4} \right). \quad (5.5)$$

Pro měření přetvoření rezistory  $R_1$  a  $R_2$  musí být stejné. To platí i pro rezistory  $R_3$  a  $R_4$

$$R_1 = R_2 = R_1 \text{ a } R_3 = R_4 = R_3, \quad (5.6)$$

tím získáme následující vztah:

$$V_o = V_s \left( \frac{(R_1 + \Delta R_1) \cdot (2R_3 + \Delta R_3 + \Delta R_4) - (R_3 + \Delta R_4) \cdot (2R_1 + \Delta R_1 + \Delta R_2)}{(2R_1 + \Delta R_1 + \Delta R_2) \cdot (2R_3 + \Delta R_3 + \Delta R_4)} \right). \quad (5.7)$$

Když je potřeba výsledky rozšířit tak získáme mnoho podmínek  $\Delta R_x, \Delta R_y$ , které jsou velmi malé v porovnání s ostatními podmínkami, potom můžeme tyto podmínky zanedbat. Takto:

$$V_o = V_s \left( \frac{R_1(\Delta R_3 + \Delta R_4) - R_1(\Delta R_1 + \Delta R_2) + 2R_3\Delta R_3 - 2R_1\Delta R_4}{4R_1R_3 + 2R_1\Delta R_3 + 2R_1\Delta R_4 + 2R_3\Delta R_1 + 2R_3\Delta R_2} \right). \quad (5.8)$$

Toto může být značně zjednodušeno, když jmenovatel je zkoumán důkladněji. Například. Vezmeme-li plný můstek složený z 120  $\Omega$  tenzometrů s přetvořením 10 000  $\mu\text{m}$ . *Tak:*

$$4R_1R_3 = 57600 \Omega^2, \quad (5.9)$$

zatímco ostatní hodnoty jsou mnohem nižší:

$$2R_1\Delta R_3 = 0,48 \Omega^2. \quad (5.10)$$

Tento rozdíl bude mnohem větší, když použijeme tenzometry s větší nominální hodnotou. Z tohoto důvodu můžeme zanedbat všechny ostatní členy ve jmenovateli s výjimkou  $4R_1R_3$  potom výsledek bude následující:

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{R_1\Delta R_3}{4R_1R_3} + \frac{R_1\Delta R_4}{4R_1R_3} - \frac{R_3\Delta R_1}{4R_1R_3} - \frac{R_3\Delta R_2}{4R_1R_3} + \frac{2R_3\Delta R_1}{4R_1R_3} - \frac{2R_1\Delta R_4}{4R_1R_3}, \quad (5.11)$$

odvození je sečteno v následujícím kroku, to by mělo

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_3} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right). \quad (5.12)$$

V dalším kroku nahradíme

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon. \quad (5.13)$$

Tak získáme  $k$  –  $k$ -faktor tenzometru a  $\varepsilon$  je přetvoření. Získáme vztah, který je pro nás velmi důležitý:

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4). \quad (5.14)$$

Rovnice (5.5) a (5.14) předpokládají změnu hodnoty odporu u všech tenzometrů. K této situaci dochází například ve snímačích síly. V experimentálních provedení nemusí docházet ke změnám všech odporů najednou, zbytek mostu je potřeba dokončit, např.: pevnými odpory.

Z rovnic je patrné, že změny odporů vedou k rozvažování můstku a tím i k výsledkům s různými příznaky. Po připojení zařízení určeného na měření deformací. Můžeme sledovat následující.

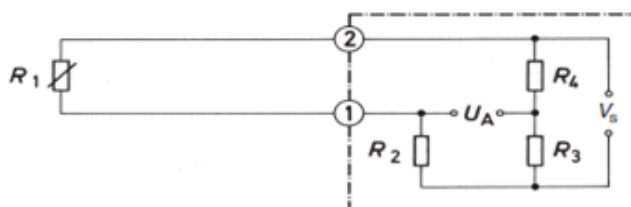
Pozitivní nárůst  $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$  a nebo  $\varepsilon_3 > \varepsilon_4$

Negativní nárůst  $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$  a nebo  $\varepsilon_3 < \varepsilon_4$

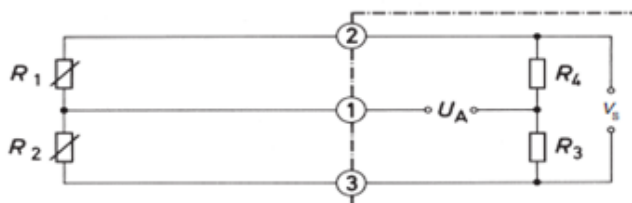
Jedná se o velikosti změn tenzometrů, které jsou umístěny v jednotlivých měřicích větvích. V případě protilehlých větví se odečítají v případě stejné změny. Tohoto se využívá například při teplotní kompenzaci. [2]

### Možnosti zapojení

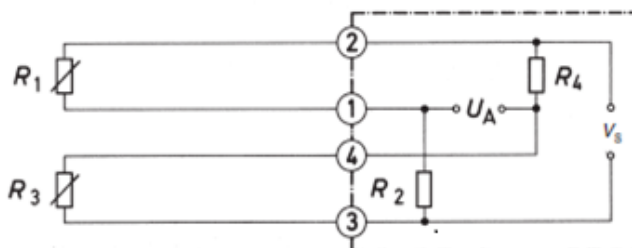
Zapojení můstku, která lze použít se nazývají čtvrt, půl a plný můstek (Obr. 7). Velké požadavky jsou kladeny na kvalitu zpracování doplňovacích odporů s ohledem na dlouhodobou stabilitu měření. Za velmi stabilní se považují kovové foliové odpory. Místo těchto pasivních součástek může být použitý na dokončení můstku i kompenzační tenzometr. V kapitole 7 jsou diskutovány výhody a nevýhody jednotlivých typů zapojení.



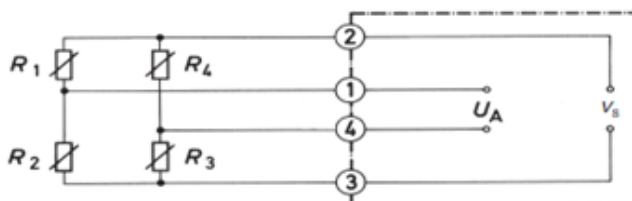
Zapojení do čtvrt můstku



Zapojení do půlmůstku s kompenzací



Zapojení do půlmůstku



Zapojení plného můstku

Obr. 7: Možnosti zapojení můstku [2]

## 6 VOLBA SPRÁVNÉHO ODPOROVÉHO TENZOMETRU

Tenzometr samotný má velké množství parametrů. Vybrány byly pouze ty, které mají výrazné vlivy pro výběr správného tenzometru.

### 6.1 Odpor tenzometru

V dnešní době se vyrábí tenzometry o nominální hodnotě 120  $\Omega$ , 350  $\Omega$ , 700  $\Omega$  a 1000  $\Omega$ . Hodnota tenzometru je důležitá při měření na velké vzdálenosti.

Např.: u 120  $\Omega$  tenzometru s 100 m připojením (100 m jedním směrem = 200 m celkem a průřezu měděného vodiče 0,5 mm<sup>2</sup>) je chyba měření způsobená vodiči 5,8%. Další kombinace vodičů a odporů tenzometrů jsou uvedeny v Tab. 2.

**Tab. 2: Chyby měření při rozdílných parametrech průřezů vodiče a odporu tenzometru**

Průměr měděného vodiče	Odpor tenzometru	Chyba na vedení
[mm <sup>2</sup> ]	[ $\Omega$ ]	[%]
0,5	350	1,8
0,14	120	17,5
0,14	350	6,8

### 6.2 Délka mřížky

Délka mřížky patří spíše k těm méně významným parametrům, protože citlivost tenzometru není závislá na délce. Toto tvrzení platí za předpokladu, že máme homogenní materiál. Jak je uvedeno výše, citlivost je založena na  $\Delta R/R$  tzn. na relativním prodloužení. To znamená, že velikost tenzometru nemá vliv na citlivost. Velmi malé tenzometry se používají jen tam, kde je to nezbytně nutné.

Podložku tenzometru lze také oříznout, ale nedoporučuje se to provádět. Tímto způsobem lze zanést další nežádanou chybu měření, protože tenzometry jsou navrženy tak, aby vliv přechodu mezi jednotlivými vrstvami nezasahoval až na měřicí mřížku. Tato možnost by mohla při nevhodném ořezání nastat.

## **Homogenní pole**

V případě tohoto typu pole můžeme volit tenzometr, pouze jen na základě volného místa na objektu, který chceme měřit. V našem případě se používají tenzometry s měřicí základnou od 3 do 6 mm.

## **Nehomogenní pole**

Volbu velikosti tenzometru musíme volit podle cíle měření, jestli lokální maxima, minima, nebo střední hodnotu. Tenzometr funguje na principu integrátoru tj. výsledná hodnota je střední hodnota pod základnou. V případě zrnitých materiálů (např. beton) kde se vyskytují místa s velkým rozdílem deformací, potřebujeme změřit spolehlivě střední hodnotu, proto se doporučuje velikost tenzometru 5x větší než je největší zrno. Opakem toho je měření špiček. V tomto případě je potřeba tenzometr s co nejmenší mřížkou.

## **6.3 Typy mřížek tenzometrů**

### **Lineární (jednoosé) tenzometry – měření známého směru namáhání**

Jedná se o základní typ tenzometru. Tyto tenzometry se používají pro měření jednoho směru přetvoření. Ve směrech kolmých na hlavní směr mřížky má svoji citlivost sniženou na 30% (záleží na tvaru mřížky tenzometru). Používají se také jako kompenzační tenzometry.

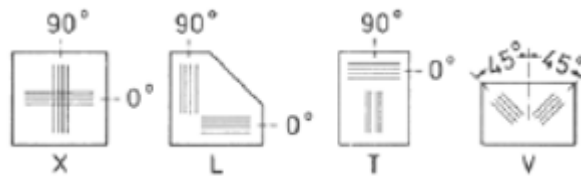
### **Tenzometrické kříže a tenzometrické růžice – měření neznámého směru namáhání**

Pro měření přetvoření v neznámých směrech, nebo pro měření rovinného přetvoření se používají tenzometrické kříže, nebo růžice.

### **Tenzometrické kříže a růžice**

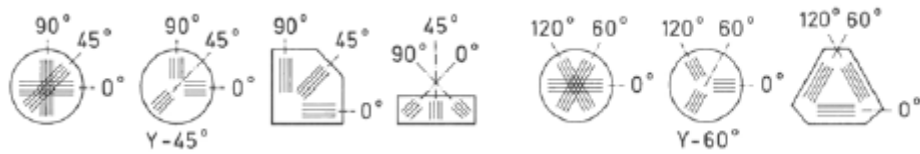
Vyrábí se několik druhů tenzometrických křížů. Nejznámější typy jsou X, L, T a V (Obr. 8). Názvy vycházejí z rozmístění měřících mřížek. Tenzometrické kříže se používají, je-li znám alespoň jeden směr hlavního napětí.





**Obr. 8: Typy tenzometrických křížů [1]**

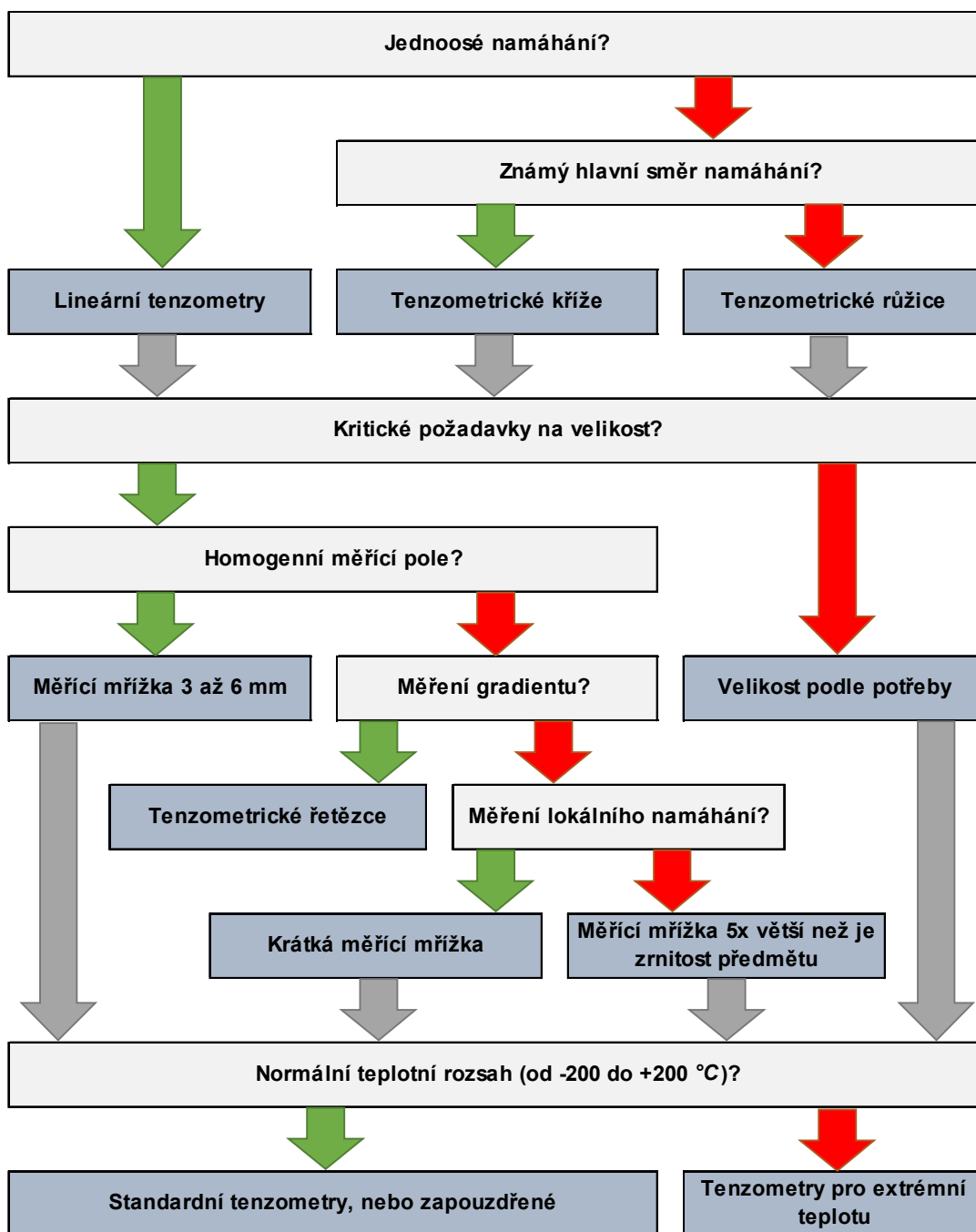
Pro označení tenzometrických růžic se používá podobné označení jako u křížů. Nejčastěji se vyrábějí s třemi mřížkami natočenými  $0^\circ/45^\circ/90^\circ$  a  $0^\circ/60^\circ/120^\circ$  (Obr. 9).



**Obr. 9: Typy tenzometrických růžic [1]**

## 7 VOLBA OPTIMÁLNÍ METODY MĚŘENÍ POMOCÍ TENZOMETRŮ

Pro jednodušší výběr tenzometru může posloužit Obr. 10. Základní parametry pro výběr tenzometru jsou: jmenovitá hodnota odporu, velikost měřicí mřížky, směr napětí, teplota při měření.

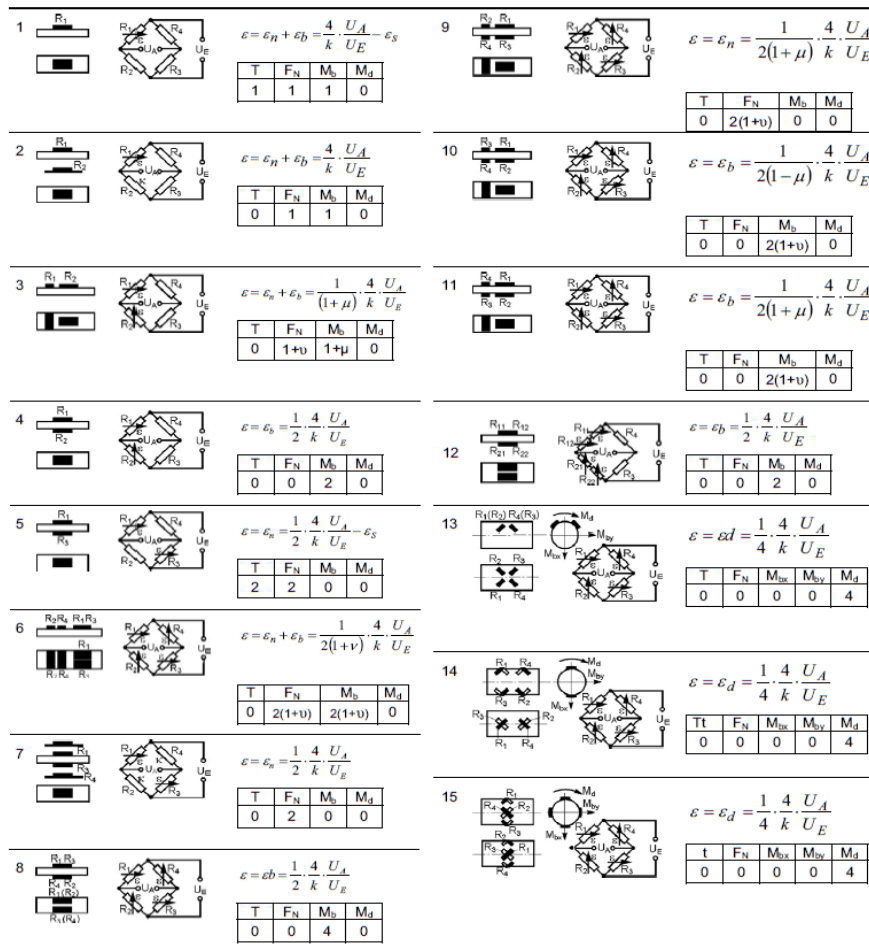


Obr. 10: Diagram pro volbu správného tenzometru [6]

## 7.1 Volba správného zapojení

Jak už víme tak jsou 3 základní zapojení Wheatsnova můstku: čtvrt můstek, půl můstek, plný můstek. Všechna zapojení jsou vždy doplněna na plný most, buď interními odpory, nebo externími popřípadě kompenzačními tenzometry, jinak by nebylo možné provést měření.

Občas se vyskytnou případy, kdy potřebujeme měřit velmi malá přetvoření. Tato malá přetvoření lze snadno měřit jedním měřicím tenzometrem a zapojením do čtvrt můstku s možností velké chyby, ale také variantou s více tenzometry a volbou vhodného zapojení. Tímto lze dosáhnout zesíleného signálu až 4x. Následným přepočítáním se získá velmi snadno původní hodnotu a je tak snížena i citlivost na možné vnější vlivy. Uvedená zapojení najdeme na Obr. 11.



Obr. 11: Používaná zapojení pro měření s tenzometry, T/t – teplota, F<sub>N</sub> – zatížení, M<sub>b</sub> – ohybový moment, M<sub>d</sub> – kroučící moment, M<sub>bx</sub>, M<sub>by</sub> – ohybový moment pro X a Y směr [3]

## 8 VLIVY NA MĚŘENÍ

### 8.1 Teplota

Tenzometry jsou velmi citlivé na teplotu. Samotný tenzometr lze také dobře použít jako teplotní článek,

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (8.1).$$

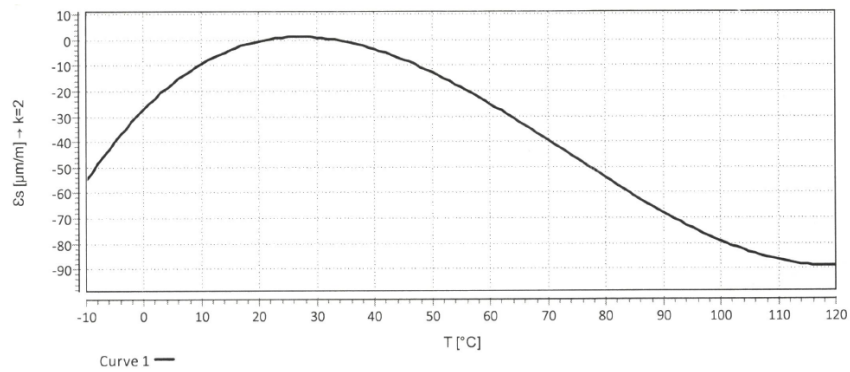
$R_0$  – původní hodnota,  $\alpha$  - teplotní koeficient materiálu,  $\Delta T$  – rozdíl teplot

Pro odstranění teplotních vlivů se používají tři druhy kompenzace. První možností je tzv. samo kompenzační tenzometr. Tuto metodu lze použít při zapojení do čtvrt mostu. Jedná se o jednoduchý princip: materiál měřený se roztahuje, ale tenzometr se teplotou zmenšuje přesně tak, jak se měřený materiál roztahuje. Bohužel se musí jednat o typ materiálu, pro které vyrábí výrobce samo kompenzační tenzometry. Plast je také v této tabulce, ale uváděná  $\alpha$  neplatí pro všechny plasty používané v průmyslu. [4][6]

**Tab. 3: Vyráběné samo kompenzační tenzometry[6]**

Materiál	$\alpha[10^{-6}/^{\circ}\text{C}]$
Feritická ocel	10,8
Hliník	23
Austenitická ocel	16
Křemenné sklo / Kompozit	0,5
Titan / Šedá litina	9
Plastové materiály	65
Molybden	5,4

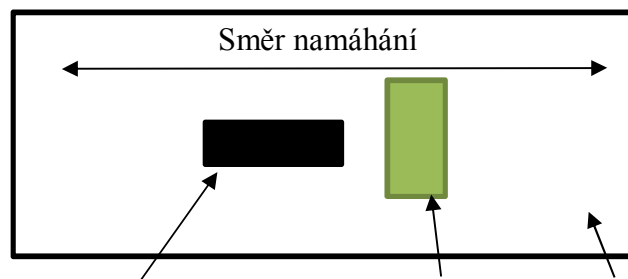
Druhou možností je použít rovnici, která je uváděna v příloze každé krabice tenzometrů (Obr. 12). Rovnice uvedená pod grafem se doplní do měřícího softwaru, ten na základě měřené teploty kompenzuje teplotní posun.



$$\epsilon_s(T) = -14.32 + 1.63 \cdot T - 5.14E-02 \cdot T^2 + 2.35E-04 \cdot T^3 \pm (T-20) \cdot 0.30 [\mu\text{m/m}] + 0.639 \cdot (T-20) [\mu\text{m/m}]$$

**Obr. 12: Teplotní závislost tenzometru**

Třetí možností kompenzování teploty je použití kompenzačního tenzometru (Obr. 13). Při této metodě se používá minimálně zapojení do půl mostu, nebo do celého mostu (s dvěma tenzometry použitými pro kompenzaci vnějších vlivů). Pro správnou funkci kompenzačního tenzometru musí být připevněn na stejný materiál, jako je měřící tenzometr. Velmi často se lepší kompenzační tenzometr blízko k měřicímu a to v pootočení o 90°. V tomto případě se používá jiný k-faktor, který nám pomůže určit Obr. 11.



Měřící tenzometr    Kompenzační tenzometr    Měřený materiál

**Obr. 13: Příklad lepení měřicího a kompenzačního tenzometru**

Další možností s kompenzačním tenzometrem je použití dvou vzorků ze stejného materiálu. Na kterých je nalepen měřící tenzometr stejně jako na Obr. 13. Tyto dva vzorky se zapojí do půl můstku, jeden vzorek se použije jako zatěžovací a druhý jako kompenzační. Tato metoda se používá pro materiály s různou tvarovou roztažností.

## 8.2 Vlhkost

Další z vnějších vlivů, který může mít zásadní vliv na měření s tenzometry. U materiálů, které nemění svůj modul pružnosti v závislosti na vlhkosti (např.: kovy), je nutno použít správné fixační lepidlo, kterým se tenzometr lepí na měřicí podklad. Někteří výrobci tenzometrů vyrábí i svá vlastní lepidla. Může se jednat o jednosložková lepidla a dvousložková lepidla. Pro měření do teplot 120°C se používají nejčastěji jednosložková lepidla na bázi kyanoakrylátu (známé jako „vteřinové lepidlo“). Volba kyanoakrylátového lepidla závisí na materiálu měřeného dílu. Lepidla tohoto typu se vytvrzují vzdušnou vlhkostí. Dvousložková lepidla se používají v případech: větší teploty měření, větší zrnitosti materiálu (dokáže vyrovnat mírné vady a nerovnosti povrchu) a vystavení povětrnostním podmínkám.

Pro ochranu vlastností lepidla se používají různé krycí materiály. Od základního polyuretanového nátěru, přes další ochranné vrstvy. Vrstvy je potřeba volit podle podmínek, kterým je lepidlo vystaveno. Tyto materiály lze najít například v produktovém katalogu HBM.

## 8.3 Tlak

Z literatury je známo, že tenzometry vydrží tlak 1000 MPa bez jakéhokoliv poškození. Při zatížení tlakem dochází k malé změně odporu v závislosti na tlaku, která se projevuje jako chyba měření.

Nejdůležitějším faktorem je zde kvalita lepení tenzometru. Ta je pro měření za působení hydrostatického tlaku a nebo vakua důležitější než v ostatních případech.

Použité lepidlo nesmí obsahovat rozpouštědla, která vytvářejí plynné substance během vytvrzování. Je třeba použít takové lepidlo, které umožní vytvořit tenkou stejnoměrnou vrstvu. Vrstva lepidla musí být bezpodmínečně bez bublinek. Každá takováto vada se projeví např. v hysterezi, změnách nulového bodu a nebo porušením měřicí mřížky. Také krycí vrstva tenzometru musí být bez vzduchových bublinek. Nestejnoměrná vrstva lepidla způsobí pokřivení měřicí mřížky, což rovněž ovlivní velikost měřené veličiny.

Uvedeným problémům lze předejít pečlivou přípravou měřeného místa. [1]

## 9 DALŠÍ CHYBY PŘI MĚŘENÍ

Vlivů na měření je velké množství, zde budou probrány ty dvě nejčastější.

### Vliv nalepení

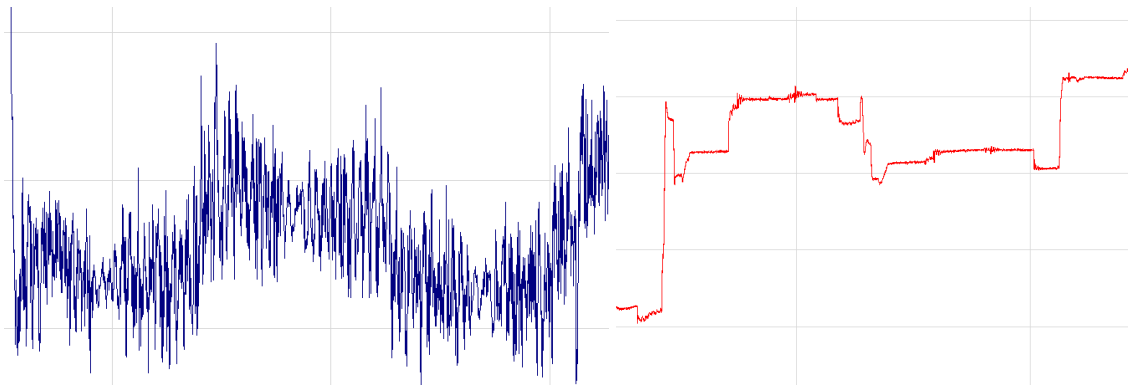
Vzduchové póry pod tenzometrem - mají nepříznivý vliv na opakovatelnost měření, výslednou hodnotu měření a chybu měření v tlaku.

Špatná pozice nalepeného tenzometru – všechny vzorky by měly být stejně, záleží na důvodu měření a požadované přesnosti výsledku.

Natočení tenzometru – v případě, že je tenzometr otočený v ose měření, může každý stupeň odchylky způsobit 1% chybu měření.

### Vlivy zapojení

Špatná stínící smyčka a vnější rušení – může mít vliv na šum měřeného signálu (Obr. 14)



**Obr. 14: Signál ze špatně provedení stínící smyčka a vnějším rušení – vlevo, signál s dobře provedenou stínící smyčkou a bez vnějšího rušení - vpravo**

## 10 PROBLEMATIKA MĚŘENÍ PLASTOVÝCH MATERIÁLŮ

Pro měření byl zvolen materiál Ultramid® A3EG7 s 35% obsahem skla. Měřené díly jsou tahová tělíska, která jsou vyráběna podle normy ISO 527-2. Největší vlivy při měření s tenzometry jsou následující:

### Vlhkost

Plasty mění svůj modul pružnosti v závislosti na vlhkosti. Proto se uvádí katalogových listech plastů stav suchého a mokrého materiálu (Obr. 15).

Mechanical properties	dry / cond	Unit	Test Standard
Tensile modulus	11500 / 8500	MPa	ISO 527-1/-2

Obr. 15: Katalogový list – modul pružnosti [11]

Rozdíl mezi materiály byl velký (12.2). Toto může způsobovat největší problém při matematickém výpočtu přetvoření. Pro přesný výpočet je potřeba znát stav nasycení dílu (Obr. 16). Tuto hodnotu lze zjistit z měření vlhkosti plastů.

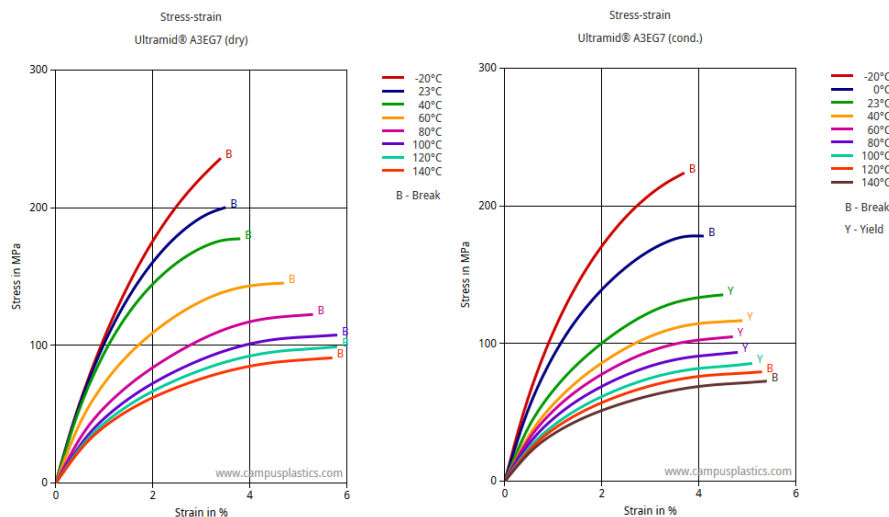
Water absorption	5 / *	%	Sim. to ISO 62
Humidity absorption	1.6 / *	%	Sim. to ISO 62

Obr. 16: Katalogový list – absorpce vlhkosti [11]

### Povrchové napětí

Povrchové napětí pro přesné měření nebylo po celou dobu lineární, viz Obr. 17. Z tohoto důvodu je nutné měřit pouze malé hodnoty přetvoření.





**Obr. 17: Porovnání povrchového napětí suchý a kondiciovaný [11]**

### Teplotní roztažnost

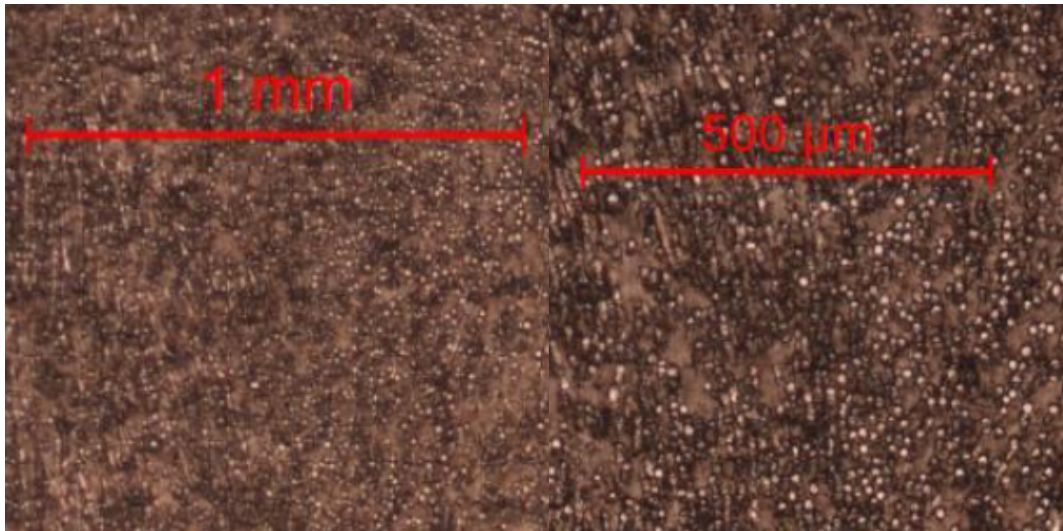
Rozhodující parametr pro správnou volbu kompenzace teploty byla anizotropie materiálu (Obr. 18). Pro ověření tohoto vlivu bylo provedeno měření (viz kapitola 12.1)

Thermal properties	dry / cond	Unit	Test Standard
Coeff. of linear therm. expansion, parallel	25.3 / *	E-6/K	ISO 11359-1/-2
Coeff. of linear therm. expansion, normal	80 / *	E-6/K	ISO 11359-1/-2

**Obr. 18: Katalogový list – roztažnost [11]**

### Orientace vláken

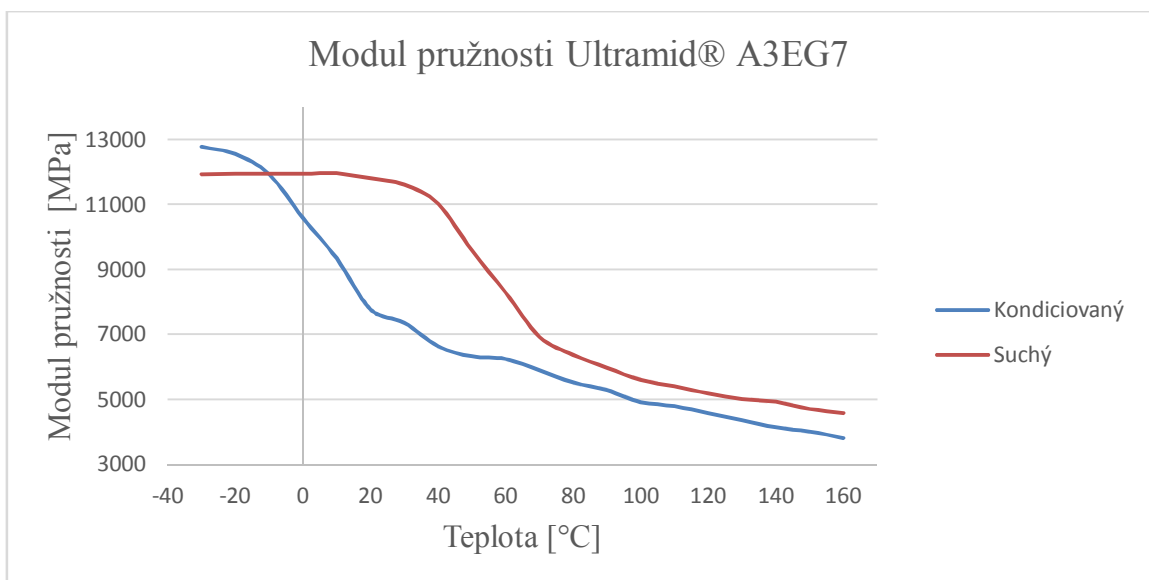
V případě zkušebního tahového tělíska můžeme mluvit o silně orientovaném materiálu, v místě měření bychom mohli mluvit až o 100% orientaci (Obr. 19). Tato vlastnost souvisí s teplotní roztažností. Pevnost vláken v orientovaném materiálu v podélném směru je mnohem vyšší, než napříč vlákny. Tato vlastnost je dána umístěním vtoku materiálu do dílu a tvarem dílu.



**Obr. 19: Mikrotonový řez kompozitním materiálem, bílá tečka – příčná orientace skleněných vláken, čárka – podélná orientace skleněných vláken**

## Teplota

Chování vlhkého a suchého materiálu se od sebe liší v závislosti na teplotě viz Obr. 20. Z tohoto důvodu musí být kusy vystaveny stejné teplotě, abychom je mohly použít pro teplotní kompenzaci.



**Obr. 20: Vliv teploty na modul pružnosti [11]**

## 11 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ S TENZOMETRY

### 11.1 Výběr metody namáhání

V této práci bylo naše experimentální měření prováděno na plastových tělíscích z materiálu Ultramid® A3EG7 a porovnávat s nerezovou ocelí 1.4301. Tento typ namáhání byl měřen pomocí foliových tenzometrů a simulován v softwaru ANSYS. Zvolena byla metoda měření pomocí půl můstku, s kompenzačním materiálem do T a druhým kompenzačním tělískem. To znamenalo, že případný výpočet by vypadal jako při zapojení do čtvrt můstku. V případě kompenzace T se počítá, že výsledek je 1,3x větší než skutečná měřená hodnota.

#### Zapojení do čtvrt můstku

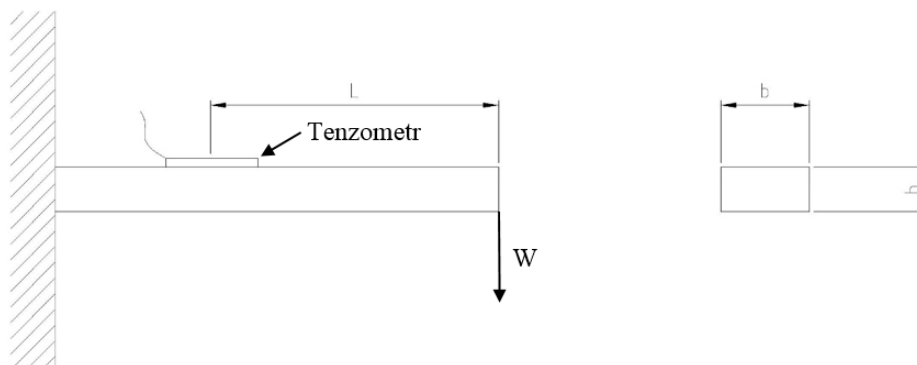
Na Obr. 21 můžete vidět přilepený tenzometr na povrchu tělíska s obdélníkovým půdorysem, je-li na volný konec aplikováno zatížení  $W$ , má místo s tenzometrem povrchové napětí podle následujícího výpočtu:

$$\sigma = \varepsilon_0 \cdot E. \quad (11.1)$$

Poměrné přetvoření  $\varepsilon_0$  získáme přes následující vztah

$$\varepsilon_0 = \frac{6WL}{Ebh^2}. \quad (11.2)$$

$b$  – šířka prutu,  $h$  – výška prutu,  $L$  – vzdálenost středu měřicí mřížky od místa zatížení,  $E$  – modul pružnosti [MPa],  $W$  – zatížení [N]



**Obr. 21: Ohybové napětí měřené pomocí čtvrt můstku,  $L$  – vzdálenost středu měřicí mřížky od místa zatížení [mm],  $W$  – zatížení [N],  $b$  – šířka prutu,  $h$  – výška prutu**

## 11.2 Měřící hardware a software

### Zařízení na měření přetvoření

Použité měřící vybavení bylo měřící stanice QuatumX 840 s 8 měřícími kanály (Obr. 22). Tento měřící hardware vyrábí společnost HBM GmbH. Měřící software byl použit software CatMan Easy verze 3.5.1.48.

### Parametry stanice

Rozlišení A/D převodníku: 24 bit na kanál

Pracovní teplota: (-20 ...+65) [°C]

Použitá frekvence vzorkování: 50 Hz

Třída přesnosti: od 0,05 až 0,1 (v závislosti na technologii snímačů)



Obr. 22: Univerzální měřící stanice QuantumX [12]

### Zařízení na zatěžování a teplotní komora (Obr. 23)

Jednalo se o dvousloupové laboratorní zatížení zařízení Instron.

Zatěžovací hlava: 500 N.

Přesnost:  $\pm 0,5\%$  z měřené hodnoty

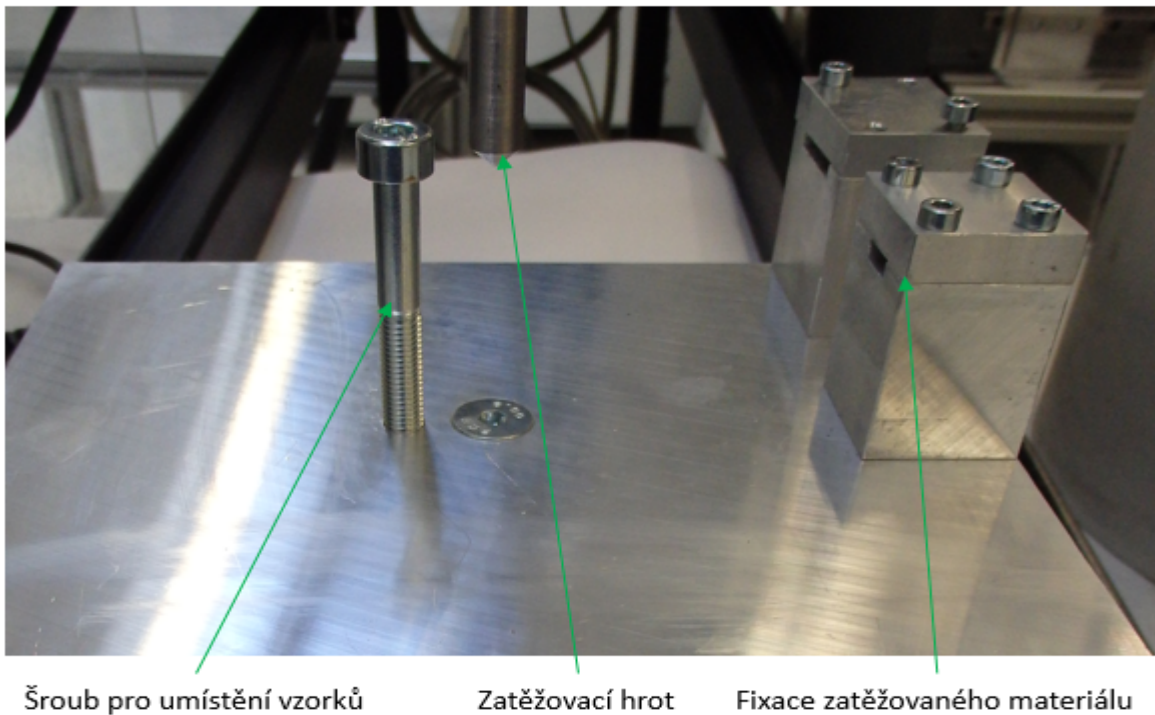
Rychlost posuvu:  $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$



**Obr. 23: Univerzální tahové zařízení Instron s teplotní komorou (v levé části) [13]**

### **Testovací přípravky**

Přípravky (Obr. 24) byly vyrobeny pro uchycení měřeného materiálu, tak aby bylo zajištěno pevné uchycení testovaného materiálu, aby nedošlo k jeho posunu při měření. Díky tomuto postupu se nevnaší do měření další vlivy.



Šroub pro umístění vzorků

Zatěžovací hrot

Fixace zatěžovaného materiálu

**Obr. 24: Přípravek pro upevnění testovaného materiálu**

## **Použité tenzometry**

KFH-1.5.-120-C1-11L3M3R – Odpor  $120,1 \pm 0,35 \text{ } \Omega$ ; Gage faktor  $1,93 \pm 1,5\%$ ; Příčná citlivost 0,3%.

## **11.3 Příprava vzorků**

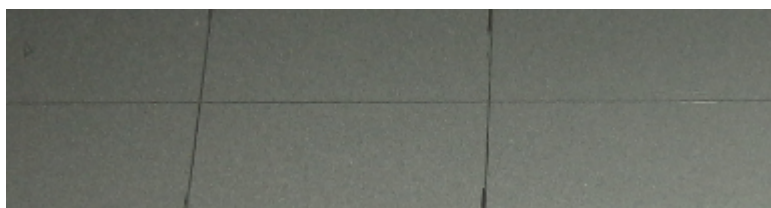
V našem případě probíhala příprava podle metodického pokynu od společnosti HBM GmbH. Pro přípravu vzorků je potřeba mít všechny nástroje očištěny od olejů a mechanických nečistot. S tenzometry je nutno zacházet velmi opatrně, aby nedošlo k mechanickému poškození.

### **Příprava povrchu**

Je potřeba zdrsňit povrch, na který budeme lepit. Toto zdrsnění můžeme použít smirkový papír o zrnitosti 320 – 400 [P]. Tuto hrubost lze dosáhnout také pomocí pískování (používá se hlavně u kovů).

### **Značení pozice**

Pomocí kuličkového pera si narýsuje kříž, na který budeme tenzometr usazovat (Obr. 25). Pro značení kříže je zakázáno používat ostré předměty. Mohly by vzniknout otřepy, které by mohly mít vliv na měření, v horším případě poškodit tenzometr.



**Obr. 25: Značení pozice tenzometru na dílu**

### **Očištění povrchu a maskování okolí**

Pro očištění povrchu je možno použít kapalinu od společnosti HBM GmbH RMS 1, dobře poslouží také isopropanol. Pro čištění je nutné použít tampóny, které nezanechávají vlákna na povrchu. Povrch musí být dokonale čistý a odmaštěný. Pro usnadnění čištění dílu

od přebytečného lepidla je dobré použít lepicí pásku pro zakrytí ploch, kde nebudeme lepit tenzometr.

## Lepení

Pro správné umístění tenzometru, se používá umístování tenzometru na kříž pomocí lepicí pásky. Přes tenzometr se nalepí páska, která překryje tenzometr ze všech stran. Ořízneme pásku ze 3 stran tenzometru a necháme pouze po delší straně. Takto připravený tenzometr pomocí pinzety přeneseme na měřený díl a usadíme pomocí kříže na tenzometru do správné pozice.

Před zafixováním tenzometru lepidlem je dobré ještě jednou očistit tenzometr i plochu určenou pro tenzometr. Nechte dostatečně oschnout. Poslední očištění provádíme tahem jedním směrem. Pro urychlení se na díl nefouká, ani nepoužívá stlačený vzduch. Ten bývá často mazán oleji a může dojít ke kontaminaci povrchu.

Připravený tenzometr odklopíme pomocí pinzety a nanese lepidlo a pomocí separační folie přitiskneme tenzometr k ploše. Pro přitlačení je dobré použít prst. Nepoužívat tvrdé předměty, tyto předměty by mohli deformovat tenzometr. Při přitlačování tenzometru k ploše jedeme jedním směrem a vytlačujeme lepidlo směrem ven, aby nevznikly pod tenzometrem vzduchové póry (Obr. 26).



**Obr. 26: Správně nalepený tenzometr**

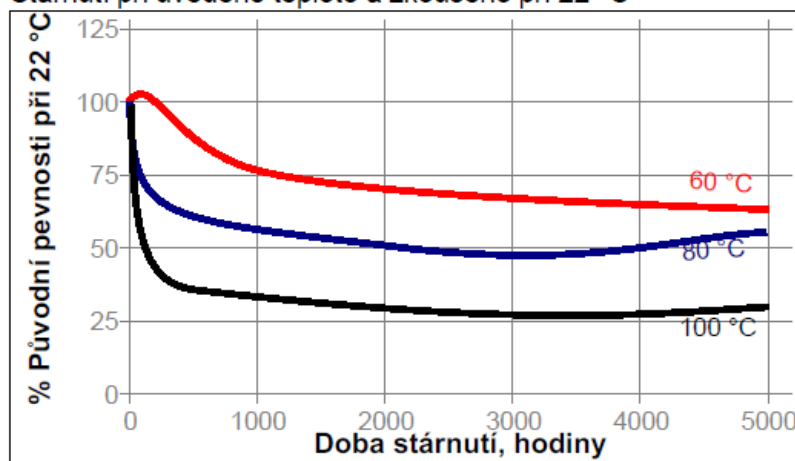
Před odstraním separační folie a krycí masky je potřeba nechat lepidlo dostatečně vytvrdnout, aby nedošlo při odstraňování i k odstranění tenzometru, nebo narušení lepidla. Doba vytvrzování lepidla je dána relativní vzdušnou vlhkostí. Čím je vlhkost vyšší, tím je rychlost vytvrzování rychlejší. [10]

## Ošetření dílu na degradaci lepidla

Důvod potřeby ochránit lepidlo před degradací je diskutováno v kapitole 8.2. V našem případě používáme lepidlo Loctite 401. Toto lepidlo má hlavní vlastnosti viz Obr. 27. Toto jsou důležité informace pro dlouhodobá měření pomocí tenzometrů.

### Stárnutí za tepla

Stárnutí při uvedené teplotě a zkušeno při 22 °C



### Odolnost proti chemikáliím a rozpouštědlům

Stárnutí za uvedených podmínek a zkušeno při 22 °C.

Prostředí	°C	% původní pevnosti			
		100 h	500 h	1000 h	5000 h
Motorový olej	40	120	110	110	85
Bezolovnatý benzín	22	85	80	80	75
Ethanol	22	100	105	110	120
Isopropanol	22	100	110	105	120
Voda	22	80	70	55	65
98% RV	40	70	60	55	55

Pevnost ve smyku, ISO 4587:

Polykarbonát

Prostředí	°C	% původní pevnosti			
		100 h	500 h	1000 h	5000 h
Vzduch	22	120	125	115	130
98% RV	40	120	110	120	115

Obr. 27: Vlastnosti lepidla Loctite 401. [10]



## 11.4 Experimentální materiál

### Plastové tělísko A3EG7

Pracovní označení ve vyhodnocení: Plast

Material: Ultramid® A3EG7

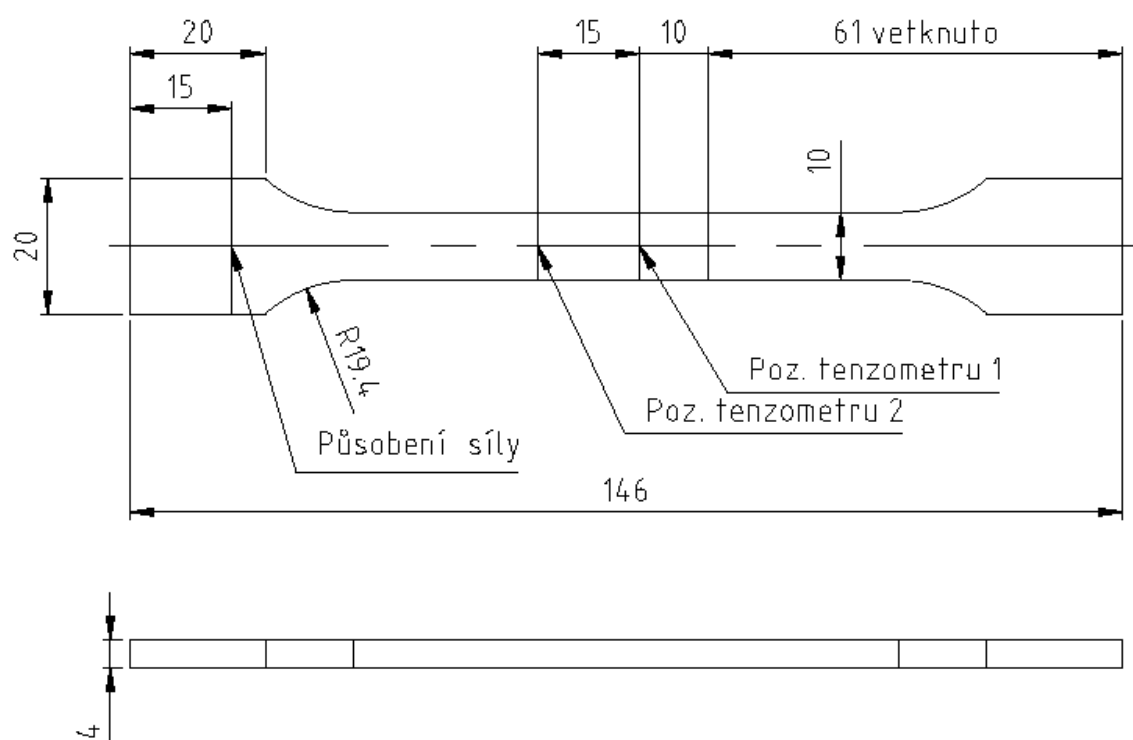
Tvar vzorku je vyobrazen na Obr. 28, ale používá se pouze tenzometr na pozici 1 nalepený v podélném směru, protože zapojení do půl můstku jsou potřeba dva kusy tohoto typu, jedno tělísko je zatěžováno, druhé slouží pro kompenzaci vnějších podmínek (bez zatížení).

### Plastové tělísko T

Pracovní označení ve vyhodnocení: Plast T

Material: Ultramid® A3EG7

Tvar vzorku je vyobrazen na Obr. 28. Pro zapojení do půl můstku je potřeba jeden kus tohoto typu: tenzometr 1 je zatěžován, tenzometr 2 slouží pro kompenzaci vnějších podmínek a je zatěžován v příčném směru.



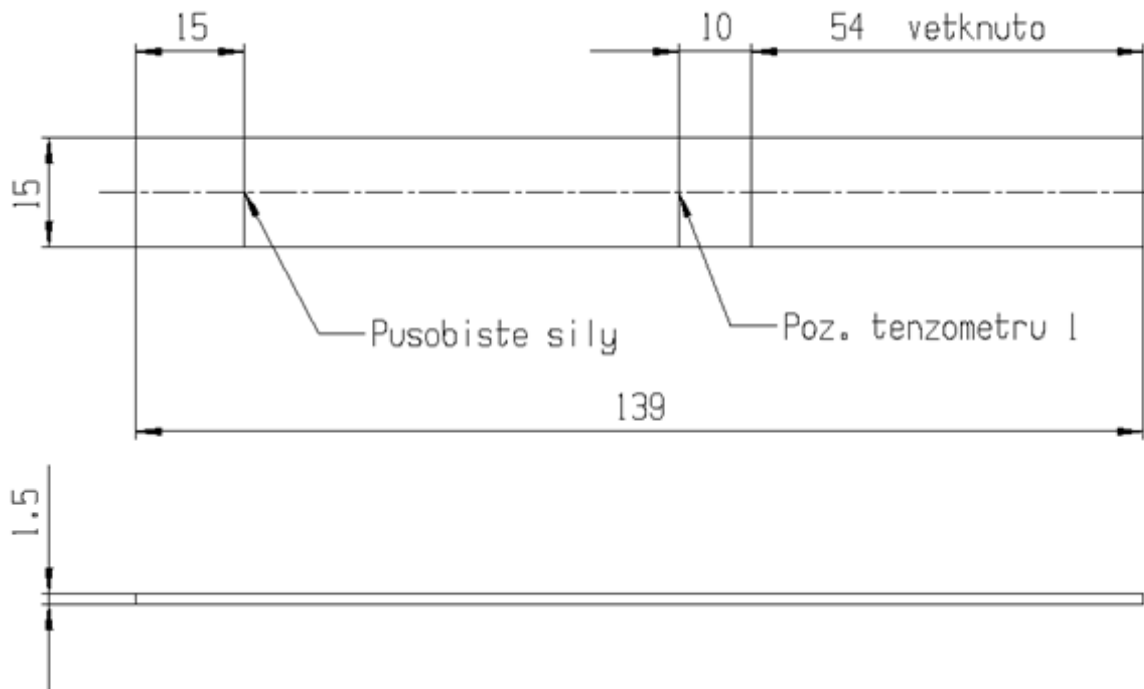
Obr. 28: Schéma tvaru plastového tělíska

## Nerezový plech

Pracovní označení ve vyhodnocení: Plech

Material: Nerezová ocel 1.4301 (X5CrNi 18-10)

Tvar vzorku je vyobrazen na Obr. 29. Pro zapojení do půl můstku jsou potřeba dva kusy tohoto typu: jeden je zatěžován, druhý slouží pro kompenzaci vnějších podmínek (bez zatížení).



Obr. 29: Schéma tvaru vzorku nerezového plechu

## 11.5 Parametry testů

Pro pozorování chování jednotlivých vlivů byly vybrány testy, pro které lze provést simulace, abychom mohli porovnat výsledky měření. Všechny vzorky prošly před provedením testů s teplotou a vlhkostí základním měřením za pokojových podmínek se zátěží, aby bylo možné provést porovnání v jednotlivých testech. Hodnoceny budou výsledky měření a jejich použitelnost v praxi. Vzorky budou vystaveny testům viz Tab. 4.

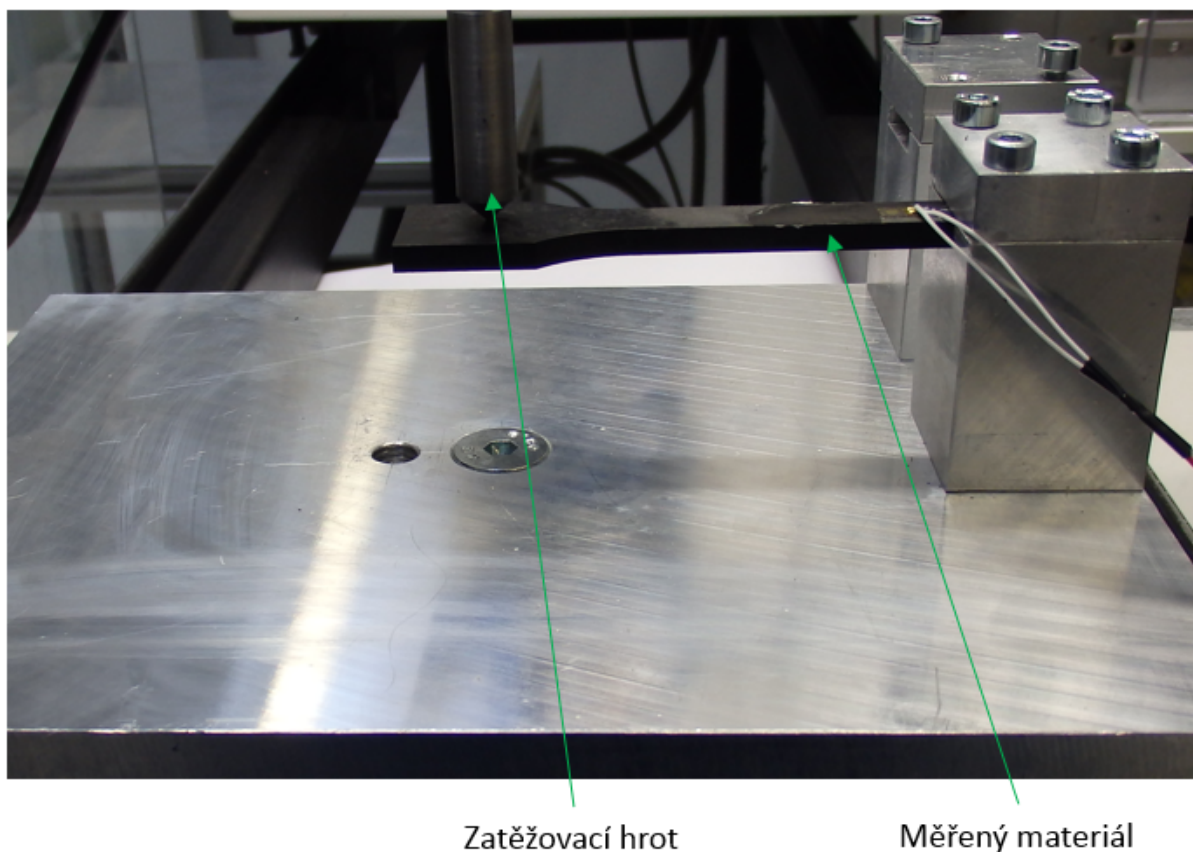
**Tab. 4 Plán testů**

<b>Měření za pokojových podmínek při zatížení</b>	
Teplota:	25 ± 2 [°C]
Vlhkost:	40-50 %
Zatížení:	5,4 [N]
Materiál:	Plast, Plast T, Plech
<b>Měření při změně teploty bez zatížení</b>	
Teplota:	- 10 [°C] a + 50 [°C].
	Rychlé přechody mezi těmito teplotami (doba přechodu na požadovanou teplotu cca 1 min)
Vlhkost:	40-50% Relativní vlhkosti
Zatížení:	Bez zatížení
Zkušební materiál	Plast, Plast T, Plech
<b>Měření při vlivu teploty a zatížením</b>	
Teplota:	- 10 [°C] a 50 [°C]
Vlhkost:	40-50%
Zatížení:	5,4 [N]
Zkušební materiál:	Plast, Plech
<b>Měření za pokojových podmínek při zatížení a vlhkých vzorcích</b>	
Teplota:	25 ± 2 [°C]
Vlhkost:	voda po dobu 36 hodin při teplotě 60 [°C]
Zatížení:	5,4 [N]
Zkušební materiál:	Plast, Plech

## 11.6 Postupy měření

### Měření za pokojových podmínek při zatížení

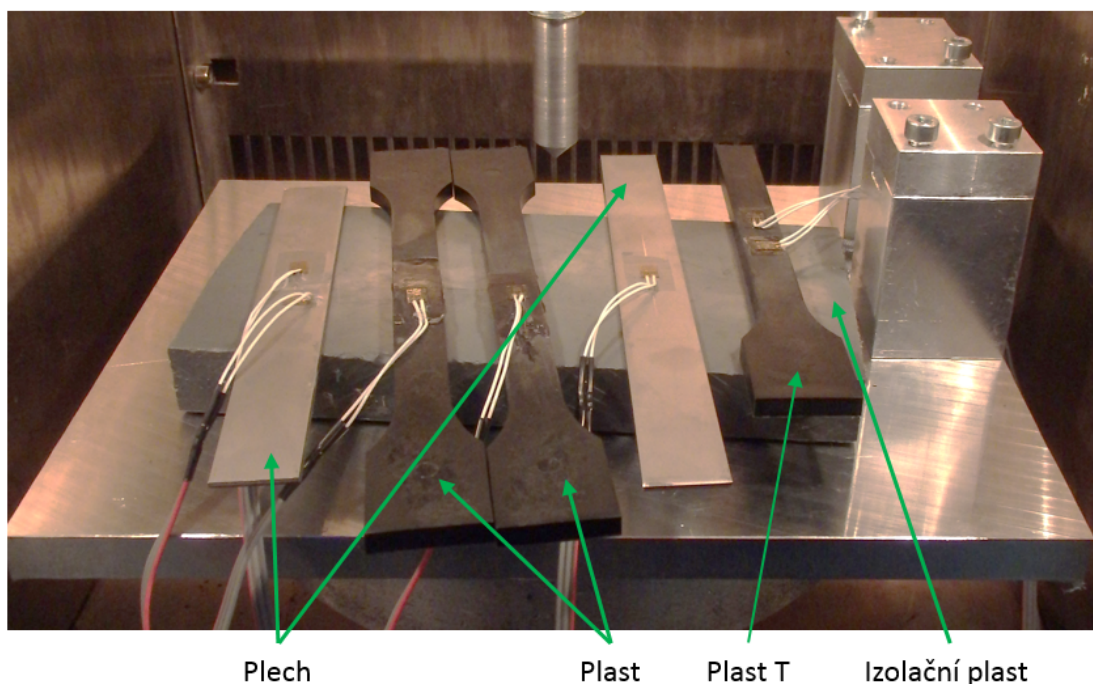
Měřený materiál byl upnut do přípravku, instalován do zatěžovacího zařízení a proběhlo připojení tenzometrů do měřicí stanice (Obr. 30). U obou měřících zařízení byl nastaven offset tak, aby zařízení ukazovala 0. Následně bylo provedeno měření. Po otestování plastových materiálů se objevila časově závislá vratná deformace. Plast se vrátil zpět do počáteční hodnoty za dobu 2 minut. U měření kovu tento problém nebyl sledován. Tímto způsobem byl otestován veškerý měřený materiál. Tyto hodnoty byly referenční pro výsledné vyhodnocení. Profil zatížení: 1. zatížení materiálu na sílu 5,4 N; 2. prodleva 30s; 3. uvolnění zatížení na 0,1 N; 4. vrácení do původní pozice.



Obr. 30: Vzorek před spuštěním testu

## Měření při změně teploty bez zatížení

Měřený materiál byl volně vložen do teplotní komory. Komora je ochlazována přímým vstřikováním plynu, z tohoto důvod bylo potřeba ochránit vzorky před přímým vstřikováním na jednotlivá tělíska. Všechna tělíska byla odizolována pomocí plastové desky (Obr. 31). Teplotní průběh testu viz Tab. 5. Tento test simuloval chování v teplotních komorách. Principem testu bylo zatížit ho střídání teplot a sledovat jeho reakci na vzniklé teplotní podmínky.



Obr. 31: Umístění vzorků v teplotní komoře

Tab. 5 Průběh testu měření při změně teplot

Typ děje	Nastavená teplota [°C]	Čas od-do [s]				
Ohřívání	+50±1	0-540		1040-1560		
Chlazení	-10±1		540-1040		1560-2040	
Pokožová teplota	+25±1					2040-6000

### **Měření při vlivu teploty a zatížením**

Příprava byla provedena stejně jako v případě měření za pokojových podmínek při zatížení, pouze s tím rozdílem že materiál byl vložen do teplotní komory. Měření probíhalo po vytemperování.

### **Měření za pokojových podmínek při zatížení a vlhkých vzorkách**

Tenzometry byly doplněny o dodatečnou ochranu proti vlhkosti (ABM75 – katalog HBM) a celé vzorky byly umístěny před měřením na dobu 36 hodin do vodní lázně o teplotě 60 °C. Navíc byl vložen jeden vzorek bez ochran. Vychladlé díly byly testovány stejně jako v případě měření za pokojových podmínek při zatížení.

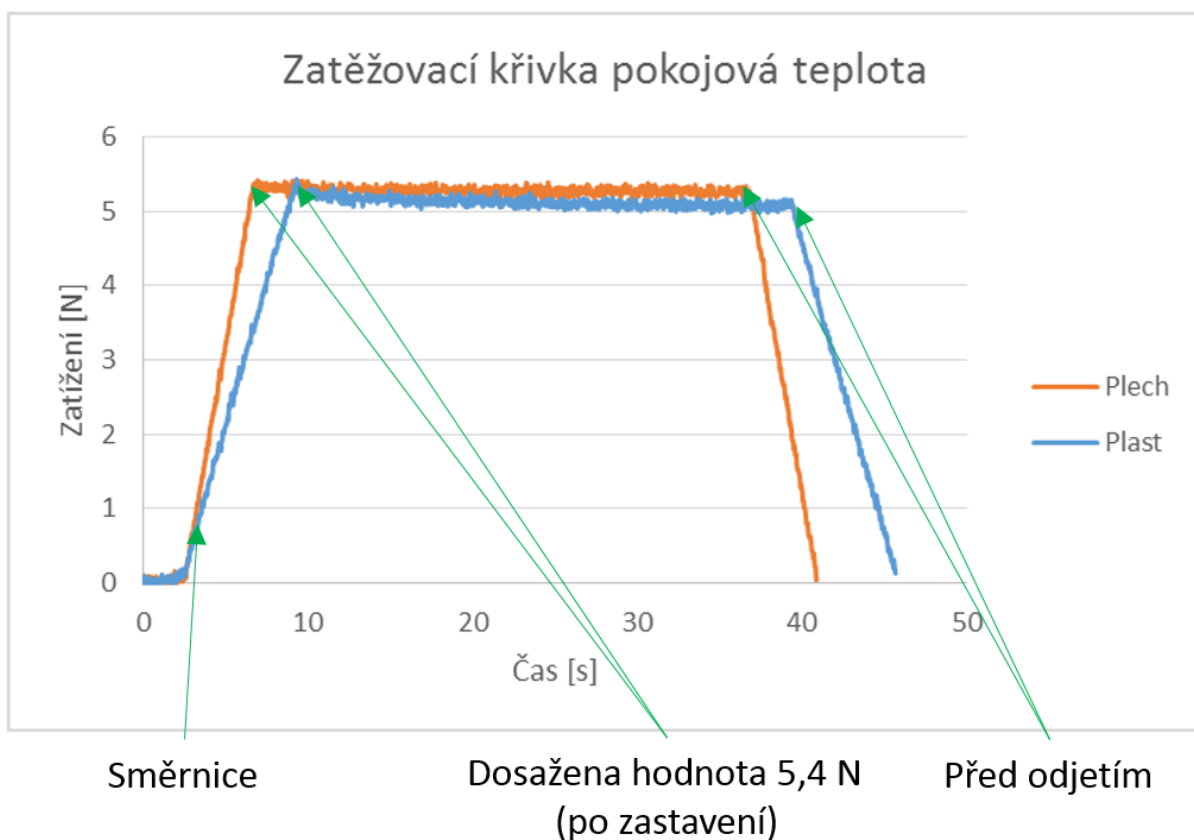
## 12 VÝSLEDKY A DISKUSE

### 12.1 Vliv teploty

- **Měření za pokojových podmínek při zatížení**

U obou plastových dílů došlo během 30 s prodlevy k mírnému poklesu síly. Na zatěžovacích křivkách (Obr. 32) je možno vidět vliv modulu, ten se projevuje v podobě směrnice zatížení měřeného materiálu. Pro představu u plastu je  $E = 8,5 \text{ GPa}$  a u plechu  $200 \text{ GPa}$  (tabelové hodnoty).

Stroj byl nastaven na zatížení  $5,4 \text{ N}$ . Procentuální odchylku od požadované hodnoty viz Tab. 6. Chyba zatížení odpovídá předepsané kalibraci stroje. Výsledkem bylo dobré nastavení stroje na měření tenzometrů bez vlivu síly. Reálné hodnoty na začátku a na konci zatížení viz Tab. 7 Pokles zatížení můžeme sledovat i u plechového materiálu.



Obr. 32: Průběh zatížení při testu

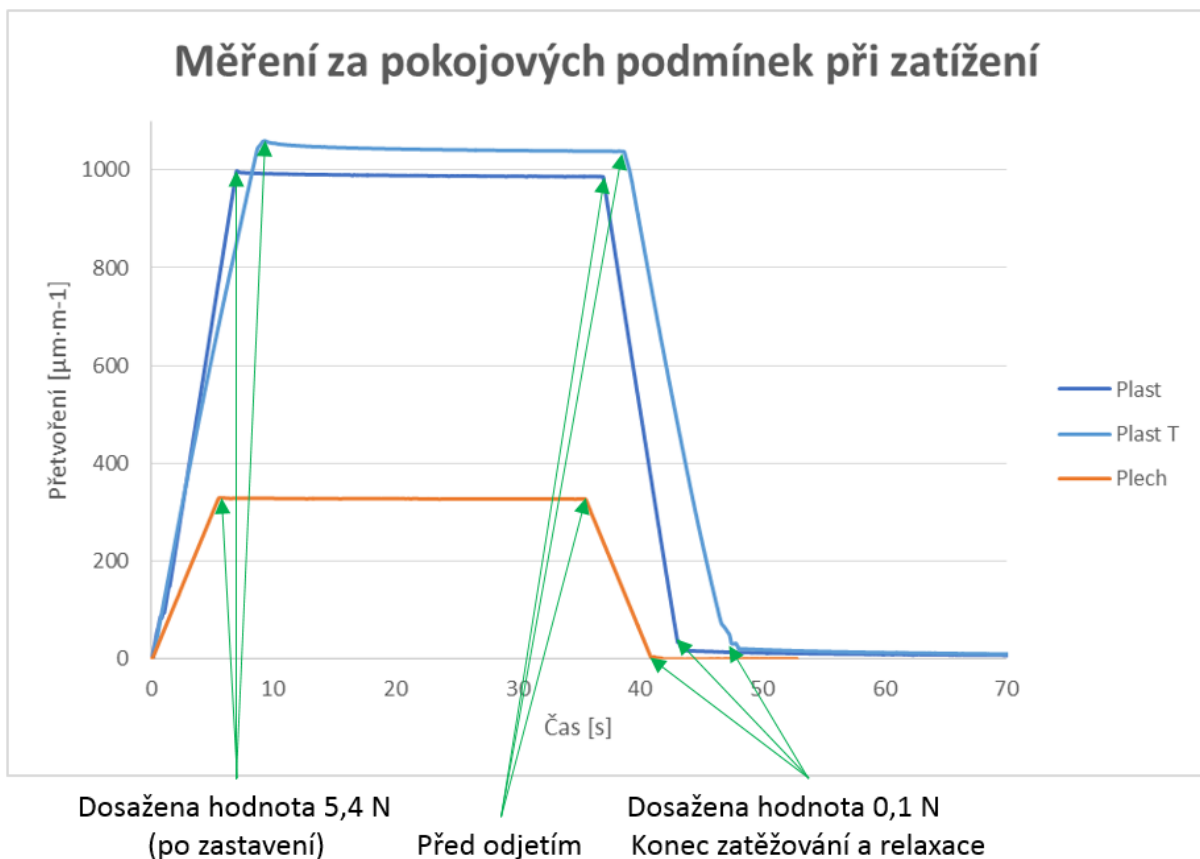
**Tab. 6 Chyba zatížení**

Materiál	Požadavek [N]	Reálné zastavení [N]	Rozdíl [%]
Plast	5,40	5,42	0,41
Plech	5,40	5,42	0,31

**Tab. 7 Relaxace síly při zatížení**

Materiál	Po zastavení [N]	Před odjetím [N]	Rozdíl [N]	Rozdíl [%]
Plast	5,43	5,04	0,39	- 7,15
Plech	5,42	5,24	0,18	- 3,32

Přetvoření mělo podobný průběh jako zatížení silou (Obr. 33). U plastových dílů docházelo ke creepovému tečení materiálu. Aby další měření mohlo proběhnout korektně, bylo mezi jednotlivými měřeními počkat minimálně 5 min, než došlo k vrácení stavu dílu do původní polohy. U plechu bylo možné provádět měření bez této prodlevy viz Tab. 8.



**Obr. 33: Porovnání přetvoření zatěžovaných vzorků při pokojové teplotě**



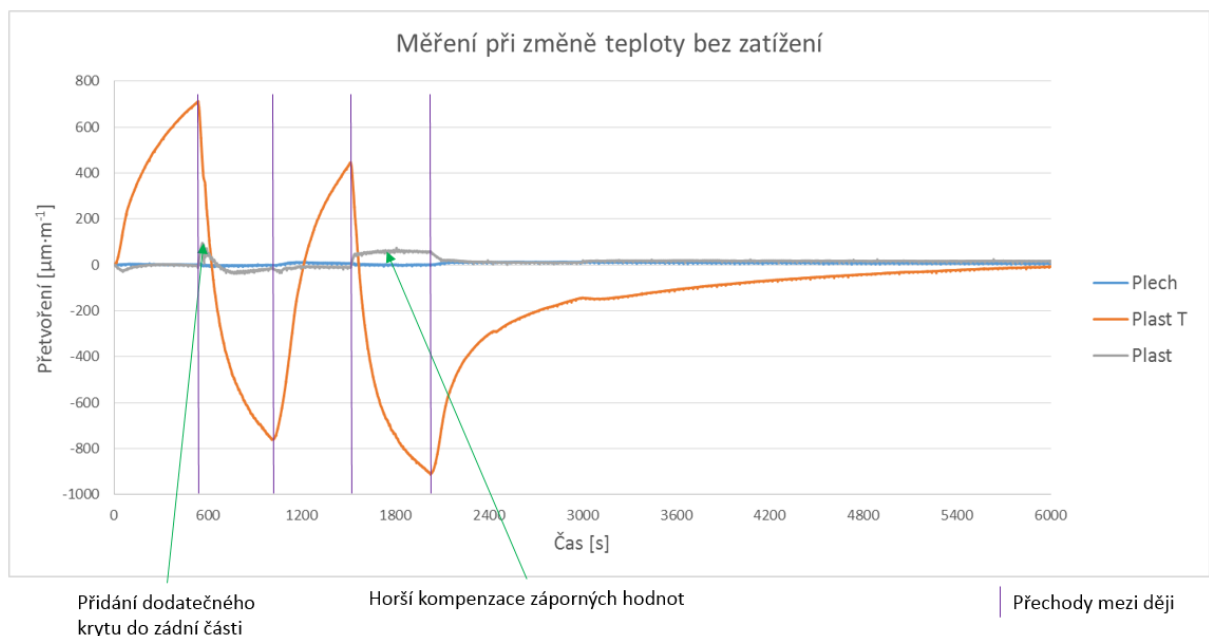
**Tab. 8 Hodnoty relaxace přetvoření**

Materiál	Po zastavení [N]	Před odjetím [N]	Rozdíl [N]	Rozdíl [%]
Plast	998,39	986,68	11,71	- 1,17
Plast T	1 060,15	1 038,43	21,72	- 2,05
Plech	329,45	326,73	2,72	- 0,83

- **Měření při změně teploty bez zatížení**

Při měření se změnami teplot se projevilo anizotropní chování plastů. To zapříčinilo chování plastu T, že nedokázal kompenzovat teplo, jako ostatní díly (Obr. 34).

Správnou kompenzaci tepla by měla fungovat jako v případě Plechu. V průběhu měření byl ještě přidán další ochranný plast, který měl zlepšit distribuci chladicího plynu v komoře. Horší kompenzace záporných hodnot u plastu byla s největší pravděpodobností způsobena distribucí plynu do komory. Výsledky kompenzace viz Tab. 9. Vybraný typ kompenzace fungoval v případě Plechu a Plastu s velmi malou chybou v poměru k měřené hodnotě. V případě Plastu T nemůžeme mluvit o funkční teplotní kompenzaci, ve smyslu zanedbatelného vlivu teploty na měření. Z toho důvodu byl vyřazen z dalších testů materiál Plast T.



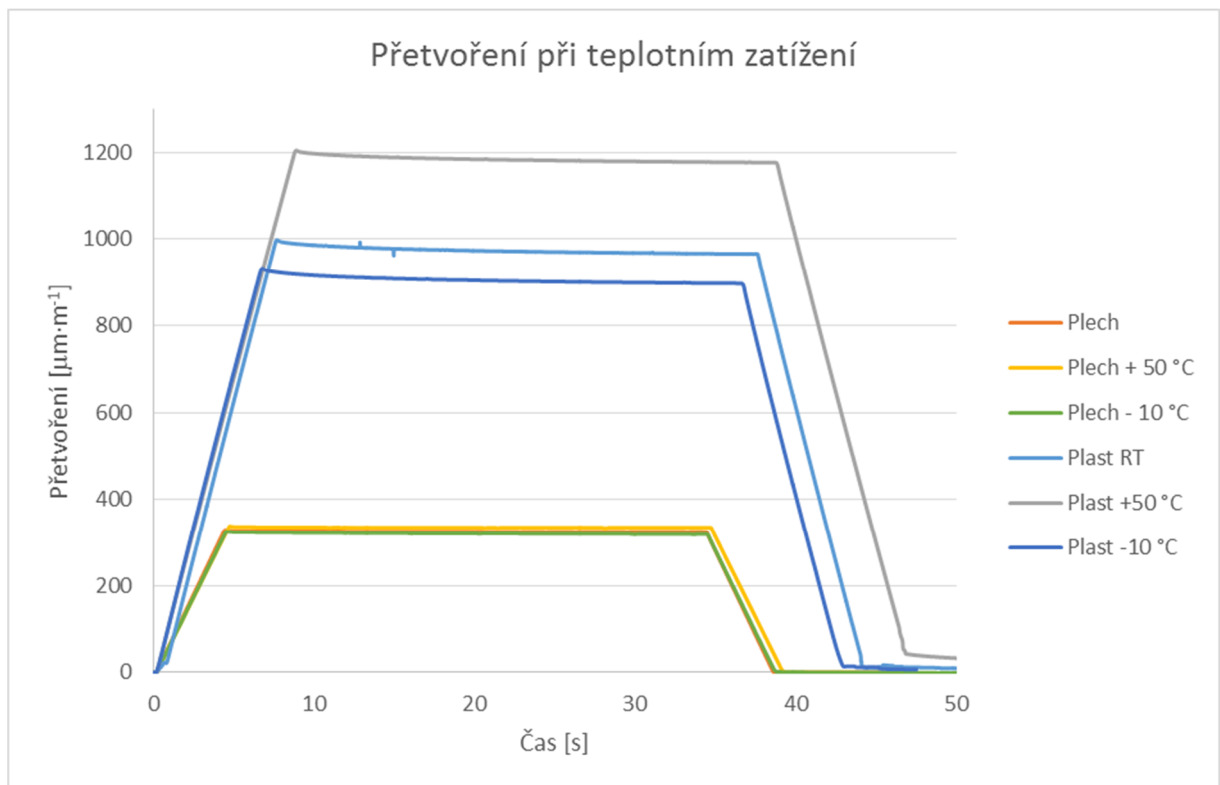
**Obr. 34: Přetvoření při změně teplot bez zatížení**

**Tab. 9 Přetvoření při změnách teplot**

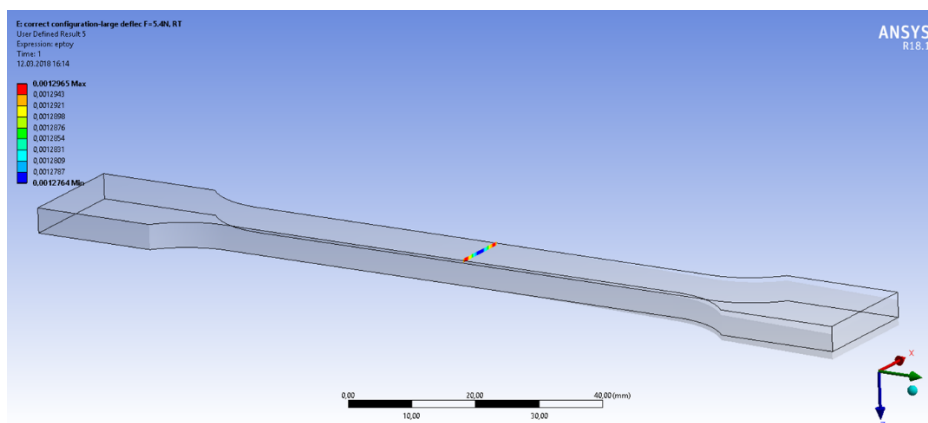
Hodnoty přetvoření při změnách teplot			Odchylka od prvního měření		
Materiál	Maximum [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ ]	Minimum [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ ]	Hodnoty [ $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$ ]	Maximum [%]	Minimum [%]
Plech	12,98	- 9,28	329,45	3,94	- 2,82
Plast T	712,95	- 912,87	1 060,15	67,25	- 86,11
Plast	95,25	- 38,18	998,39	9,54	- 3,82

- **Měření při vlivu teploty a zatížením**

U tohoto měření se nám potvrdila změna modulu pružnosti v závislosti na teplotě. Teplota samotná se neprojevila, vlivem volby vhodné teplotní kompenzace viz Obr. 35. Výsledky tohoto měření byly porovnány se simulací, jestli zadávaná data do simulace odpovídají reálným materiálům. Simulace byla provedena v programu ANSYS (Obr. 36). Z výsledků (Tab. 10) se projevuje vliv laboratorních dat z [www.campusplastics.com](http://www.campusplastics.com) od reálných materiálů. Pro Plech je použit pouze jeden model pružnosti, protože se v tabulkových hodnotách neudává pro malé teploty. I přes to byl výsledek odchylky simulace menší než 5 %. Tento výsledek ze simulace byl považován za uspokojivý. V případě plastu byl výsledek horší i při počítání s přesnějšími daty, pouze hodnota u Plast - 10 °C byla uspokojivá.



**Obr. 35: Změna modulu pružnosti**



**Obr. 36: Simulace Plastu v programu ANSYS**

**Tab. 10 Porovnání výsledků simulace a reálného měření**

Teplotním zatížení				
Materiál	Reálný díl [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ ]	Simulace [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ ]	Rozdíl [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ ]	Rozdíl [%]
Plech RT	329,45	340,76	- 11,31	3,32
Plech + 50 °C	338,15	340,76	- 2,61	0,77
Plech - 10 °C	325,75	340,76	- 15,01	4,40
Plast RT	998,39	1296,50	- 298,11	22,99
Plast + 50 °C	1204,46	1639,70	- 435,24	26,54
Plast - 10 °C	932,00	878,25	53,75	- 6,12

## 12.2 Vliv vlhkosti

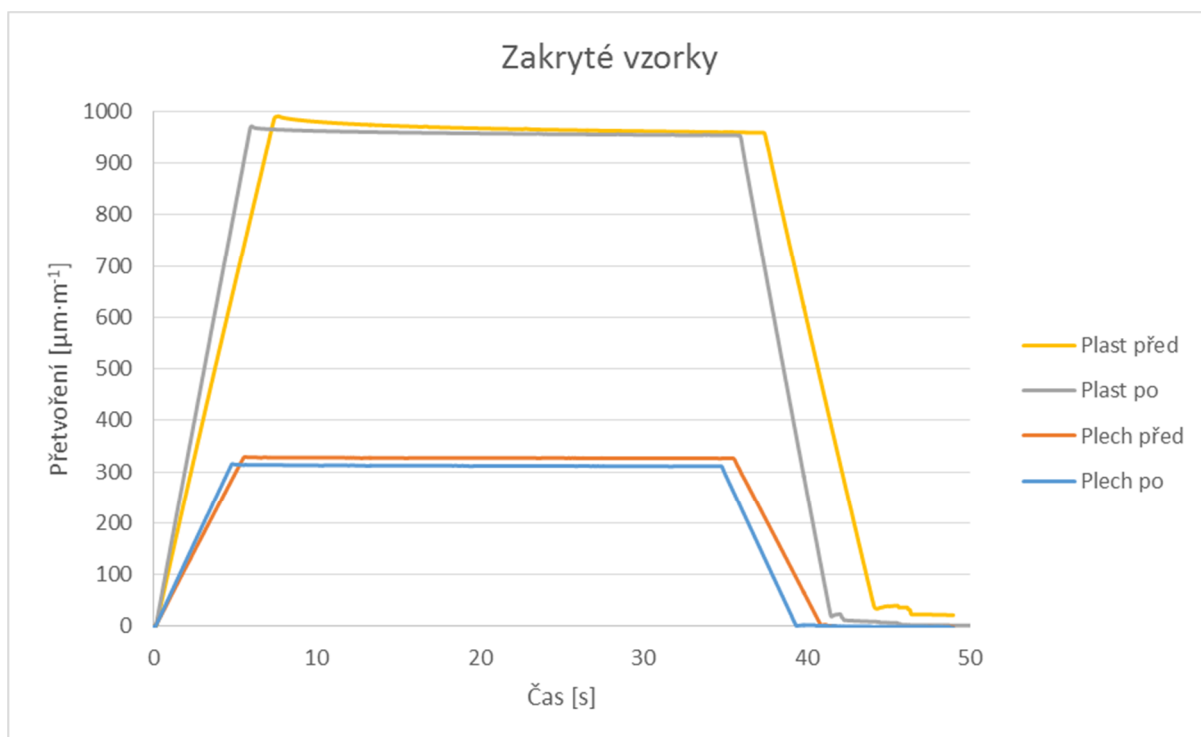
### Měření při pokojové teplotě při zatížení po 36 hodinách máčení

Do tohoto testu vstupovali 3 vzorky viz 11.6 Postupy měření. U materiálů Plech a Plast (Obr. 37) se zakrytím došlo ke snížení měřené hodnoty přetvoření. To zapříčinila změna pevnosti lepidla i přes udávané parametry lepidla výrobcem.

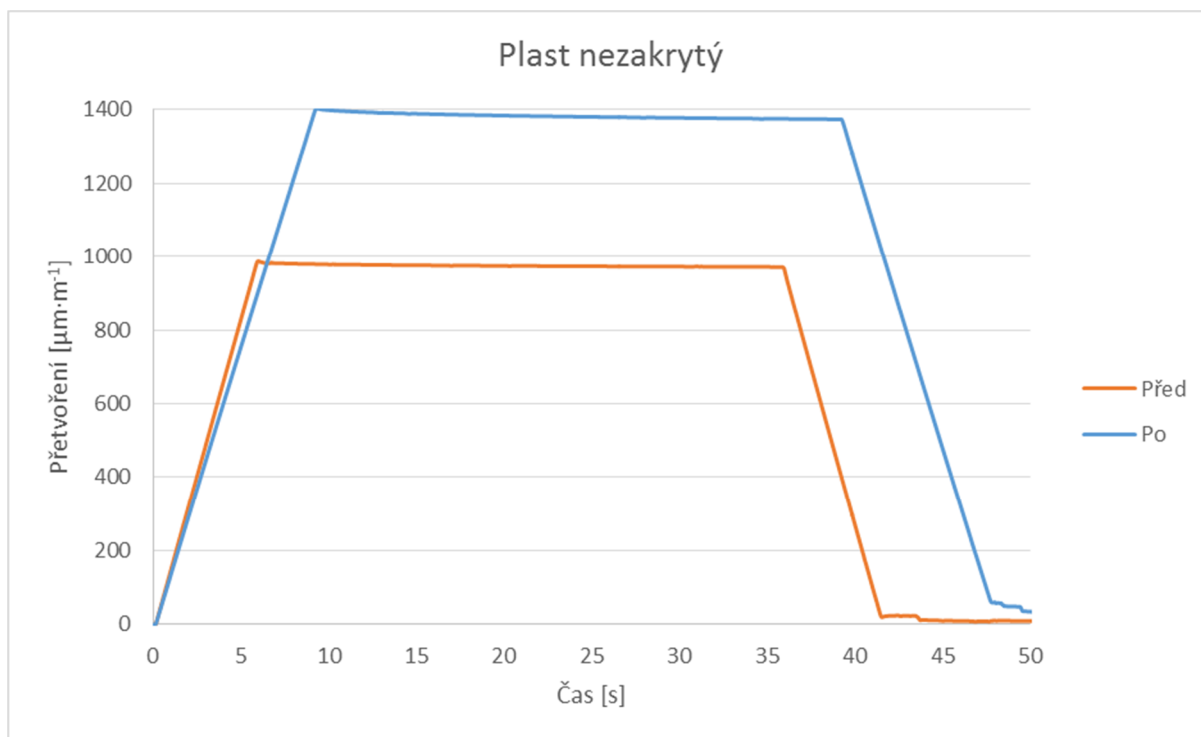
U nezakrytého Plastu došlo k projevu dvou chyb (Obr. 38). První z nich byla změna modulu pružnosti materiálu. Tato změna zapříčinila, že při stejné síle došlo k mnohem vyššímu přetvoření oproti původnímu stavu (podobné chování jako změnou modulu pružnosti při vyšších teplotách), změnu modulu pružnosti zapříčinilo vyšší nasycení plastového materiálu

vodou. Předpokládejme, že díl měl před vložením do lázně vlhkost 1,5 % a po vytažení z lázně 5 %, tyto hodnoty jsou uvedeny v kapitole 10. V materiálových datech se neuvádí vliv vlhkosti materiálu na modul pružnosti. Ten jsme tímto potvrdili. Na toto měření měl vliv i již zmiňovaný problém změny pevnosti lepidla. V případě odstranění vlivu snížení pevnosti lepidla by rozdíl byl ještě vyšší.

Problém s lepidlem by pravděpodobně odstranilo použití dvousložkového lepidla.



Obr. 37: Výsledky měření přetvoření zakrytého materiálu před a po máčněním



Obr. 38: Výsledky měření přetvoření nezakrytého materiálu před a po máčněním

Tab. 11 Výsledky materiálů před a po máčnění

Materiál	Před [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ ]	Po [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ ]	Rozdíl [ $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ ]	Rozdíl [%]
Zakryté				
Plech	329,45	315,58	13,88	-4,21
Plast	990,69	971,28	19,41	-1,96
Nezakryté				
Plast	986,98	1403,18	-416,21	42,17

### 12.3 Vliv tlaku

Tlakové nádoby nebývají většinou vybaveny výstupy pro vyvedení vodičů, které bylo pro měření s tenzometry klíčové. Z tohoto důvodu nebylo měření provedeno.

## 13 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo seznámit čtenáře s problematikou měření přetvoření u plastových materiálů za působení vnějších podmínek, které jsou nejčastější a mívají většinou největší vliv na měření. Pro demonstraci vlivů byla provedena sada měření, která nastiňují problematiku měření přetvoření u plastových materiálů. Plast nemá jako kovy pevnou krystalickou mřížku, to způsobuje problémy s kompenzací vnějších vlivů při měření.

Díly byly zatěžovány stejnou silou. Z toho plyne, že rozdíly přetvoření byly vždy závislé jen na změně modulu pružnosti u daného typu materiálu, nebo případně na nevhodné volbě kompenzace vnějších vlivů.

Funkčnost vybrané metody kompenzace byla potvrzena na kovových tělískách. Měření plastů bylo značně ovlivněno změnou modulu pružnosti způsobenou vlivem tepla a vlhkosti.

Pro kompenzaci většiny vlivů u kovů se používá nejčastěji kompenzace do T. Toto u plastů díky anizotropii neplatí. V našem případě byly použity tahová tělíska, která mají orientaci skleněných vláken v podélném směru. V případě provádění měření na tvarově složitějším dílu by musel být kompenzační tenzometr nalepen na to samé místo na druhém nezatíženém dílu. (Nelze použít libovolné místo na díle. Toto by v případě tahových tělísek fungovalo, z důvodu stejné orientace skleněných vláken.)

Výsledky měření nám ukazují, jak složitě funguje měření přetvoření u plastů při změně jednoho parametru v celém vzorci pro výpočet přetvoření.

Tento typ měření by se mohl použít i pro upřesnění dat používaných v simulačních procesech. Za předpokladu že budeme moci přesně definovat stav plastového materiálu (vlhkost a orientace vláken).

## 14 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Vlk, M., Houfek, L., Hlavouň, P., Krejčí, P., Kotek, V., Klement, J., : Experimentální mechanika, VUT Brno, 2003.
- [2] Hoffman, K.: An Introduction to measurements using Strain Gages, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1987.
- [3] Hoffman, K.: Applying the Wheatstone Bridge Circuit, Hottinger Baldwin Messtechnik, GmbH, 2005
- [4 ] Kyowa: Strain Gages, Kyowa Electronic Instruments CO., LTD., 2011.
- [5] VDE/VDI-Handbuch Messtechnik II, Reg. Nr. 6, Beuth-Verlag GmbH, Berlin-Köln, 1976.
- [6] *HBM Strain Gauge Catalog*. (2017) (5 ed). Germany: HBM. Retrieved from <https://www.hbm.com/fileadmin/mediapool/hbmdoc/technical/s1265.pdf> [15.4.2018]



## 15 POUŽITÉ INTERNETOVÉ ODKAZY

- [7] DVOŘÁK, Milan. Stručný úvod do problematiky optických tenzometrů. Základní popis principů metody a její použití. [online]. [http://www.kompozity.info/clanky/optik\\_ten/opticke\\_senzory.pdf](http://www.kompozity.info/clanky/optik_ten/opticke_senzory.pdf) .[15.4.2018]
- [8] Dobrovolný, P. Základy fotogrammetrie [Online] <https://is.muni.cz/el/1431/jaro2005/Z8101> [15.4.2018]
- [9] Shear test of FRC notched specimens principal strain [Online] [https://www.youtube.com/watch?v=mQhklNxVCbY&index=2&list=PLf80oiM3f-gKltrBpCa9mQ8LwFcAIE\\_G](https://www.youtube.com/watch?v=mQhklNxVCbY&index=2&list=PLf80oiM3f-gKltrBpCa9mQ8LwFcAIE_G) [15.4.2018]
- [10] Datasheet Loctite 401. [Online] <https://proprumysl.cz/soubory/183/Loctite-401-technicky-list.PDF> [15.4.2018]
- [11] Materiálový list Ultramid® A3EG7 <https://www.campusplastics.com/campus/en/datasheet/Ultramid%c2%ae+A3EG7/BASF/20/334bc999> [15.4.2018]
- [12] Stanice QuantumX [Online] [http://www.quantarad.com/wp-content/uploads/2015/03/daq-quantumx-mx840b\\_514-330x141.jpg](http://www.quantarad.com/wp-content/uploads/2015/03/daq-quantumx-mx840b_514-330x141.jpg) [15.4.2018]
- [13] Zařízení instron [Online] <http://www.instron.us/-/media/images/instron/catalog/accessory-categories/environmental-chambers/mounting-brackets-and-lift-stands-for-environmental-chambers/3119230pjpg.jpg> [15.4.2018]
- [14] Lineární optický tenzometr [Online] <https://www.hbm.cz/produkty/op-line/ol-linearni-opticky-tenzometr/> [15.4.2018]

## 16 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Obvyklý vzhled drátového tenzometru, a) Nosný materiál, b) měřicí mřížka, c) připojovací vodiče [2] .....	10
Obr. 2: Obvyklý vzhled jednoosého foliového tenzometru, a) nosný materiál, b) měřicí mřížka, c) připojovací vodiče, d) efektivní měřicí mřížka [2] .....	10
Obr. 3: Schématická reprezentace polovodičového tenzometru a) měřicí mřížka, b) nosný materiál, c) propojovací zlaté vodiče [2] .....	11
Obr. 4: Princip optického tenzometru s Braggovou mřížkou [7] .....	11
Obr. 5: Digitální korelační metoda [9] .....	12
Obr. 6: Nákres Wheatstonova můstku, $R_1 - R_4$ – měřicí ramena, $U_B(V_s)$ – excitační napětí, $V_0$ – měřicí napětí [2] .....	16
Obr. 7: Možnosti zapojení můstku [2] .....	18
Obr. 8: Typy tenzometrických křížů [1] .....	21
Obr. 9: Typy tenzometrických růžic [1] .....	21
Obr. 10: Diagram pro volbu správného tenzometru [6] .....	22
Obr. 11: Používaná zapojení a měření s tenzometry, $T/t$ – teplota, $F_N$ – zatížení, $M_b$ – ohybový moment, $M_d$ – kroučící moment, $M_{bx}$ , $M_{by}$ – ohybový moment pro X a Y směr [3].	23
Obr. 12: Teplotní závislost tenzometru .....	25
Obr. 13: Příklad lepení měřicího a kompenzačního tenzometru .....	25
Obr. 14: Signál ze špatně provedení stínící smyčka a vnějším rušení – vlevo, signál s dobře provedenou stínící smyčkou a bez vnějšního rušení - vpravo .....	27
Obr. 15: Katalogový list – modul pružnosti [11] .....	28
Obr. 16: Katalogový list – absorpce vlhkosti [11] .....	28
Obr. 17: Porovnání povrchového napětí suchý a kondiciovaný [11] .....	29
Obr. 18: Katalogový list – roztažnost [11] .....	29
Obr. 19: Mikrotonový řez kompozitním materiálem, bílá tečka – příčná orientace skleněných vláken, čárka – podélná orientace skleněných vláken .....	30
Obr. 20: Vliv teploty na modul pružnosti [11] .....	30
Obr. 21: Ohybové napětí měřené pomocí čtvrt můstku, $L$ – vzdálenost středu měřicí mřížky od místa zatížení [mm], $W$ – zatížení [N], $b$ – šířka prutu, $h$ – výška prutu .....	31
Obr. 22: Univerzální měřicí stanice QuantumX [12] .....	32
Obr. 23: Univerzální tahové zařízení Instron s teplotní komorou (v levé části) [13] .....	33
Obr. 24: Přípravek pro upevnění testovaného materiálu .....	33

Obr. 25: Značení pozice tenzometru na dílu.....	34
Obr. 26: Správně nalepený tenzometr .....	35
Obr. 27: Vlastnosti lepidla Loctite 401. [10].....	36
Obr. 28: Schéma tvaru plastového tělíska .....	37
Obr. 29: Schéma tvaru vzorku nerezového plechu .....	38
Obr. 30: Vzorek před spuštěním testu.....	40
Obr. 31: Umístění vzorků v teplotní komoře.....	41
Obr. 32: Průběh zatížení při testu.....	43
Obr. 33: Porovnání přetvoření zatěžovaných vzorků při pokojové teplotě.....	44
Obr. 34: Přetvoření při změně teplot bez zatížení.....	46
Obr. 35: Změna modulu pružnosti .....	47
Obr. 36: Simulace Plastu v programu ANSYS .....	48
Obr. 37: Výsledky měření přetvoření zakrytého materiálu před a po máčněním.....	49
Obr. 38: Výsledky měření přetvoření nezakrytého materiálu před a po máčněním .....	50

## 17 SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Přehled metod.....	13
Tab. 2: Chyby měření při rozdílných parametrech průřezů vodiče a odporu tenzometru...	19
Tab. 3: Vyráběné samo kompenzační tenzometry[6].....	24
Tab. 4 Plán testů.....	39
Tab. 5 Průběh testu měření při změně teplot .....	41
Tab. 6 Chyba zatížení.....	44
Tab. 7 Relaxace síly při zatížení .....	44
Tab. 8 Hodnoty relaxace přetvoření.....	45
Tab. 9 Přetvoření při změnách teplot .....	46
Tab. 10 Porovnání výsledků simulace a reálného měření .....	48
Tab. 11 Výsledky materiálů před a po máčení.....	50

## **18 SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha č. 1.: Data sheet KFH-1.5-120-C1-11L3M3R

Resistance  
Resistencia  
电阻 121.2 Ω ±0.35 %

Gage factor  
Factor k  
k因数 1.93 ±1.5 %

Transverse sensitivity  
Sensibilidad transversal  
横向效应系数 0.3 %

Order No.  
Núm. de pedido  
订货号

**KFH-1.5-120-C1-11L3M3R**

Contents  
Número de piezas  
数量

10

Temperature coefficient  
of gage factor  
Coeficiente térmico del  
factor k  
k因数的温度系数

93 ±10 [10<sup>-6</sup> / K]  
(-10°C ... +45°C)

Foil lot  
Lote de láminas  
膜批号

A413/20

Production batch  
Lote de producción  
生产批号

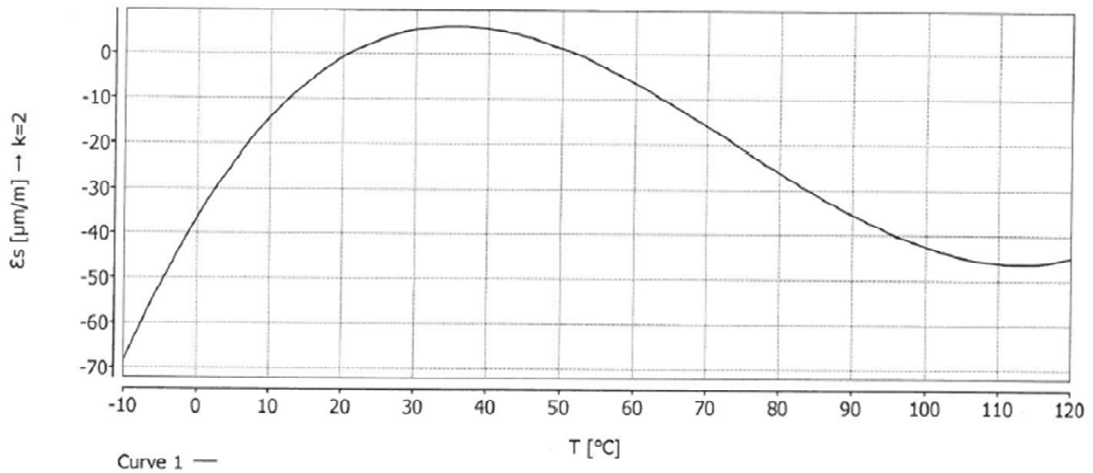
812079150

Data / Datos / 数据



Temperature compensation: steel with  
Compensación térmica: Acero ferrita con  
温度补偿: 铁素体钢和α值为

$\alpha = 10.8 [10^{-6} / K]$



$$\epsilon_s(T) = -23.65 + 2.06 * T - 5.02E-02 * T^2 + 2.26E-04 * T^3 \pm (T-20) * 0.30 [\mu\text{m/m}] + 0.639 * (T-20) [\mu\text{m/m}]$$

All specifications in accordance with VDI/VDE 2635. In case of further inquiries please indicate order no. and production batch number

Todos los datos técnicos conforme a VDI/VDE 2635. En caso de cualquier duda, por favor incluya el número de pedido y lote de producción.

所有技术参数符合 VDI/VDE 2635。有疑问并向我们联系时，请提供订货号码和生产批号。

The temperature response refers to strain gages bonded to materials with specified coefficients of thermal expansion  $\alpha$ . Values are measured with continuous temperature variation.

Curve 1: Strain gages with PVC cable.  
T = temperature in °C  
(dimensionless)

Respuesta de temperatura de las bandas extensométricas en aplicaciones con coeficientes de dilatación térmica  $\alpha$  indicados. Medido bajo continuo cambio de temperaturas.

Curva característica 1: banda extensométrica con cable de PVC.  
T = Temperatura en °C  
(adimensional)

应变片的温度漂移 (用的贴装材料具有上述热膨胀系数 $\alpha$ )。

特征线 1: 带有PVC线的应变片  
T = 温度 (°C)  
(不带单位)

Header / Datos de encabezamiento / 文件头



A point (".") is used as decimal separator in data, the separator needs to be configured accordingly for import into Excel.

**Strain gauge installation report**  
**Protocolo de instalación de bandas extensométricas**  
**应变片贴装记录**

Installation carried out:  
Instalación realizada:  
进行贴装者:

Date:  
Fecha:  
日期:

Test object:  
Objeto de medida:  
被测设备:

Installation conditions:  
Condiciones de instalación:  
贴装条件:

Adhesive:  
Adhesivo:  
胶粘剂:

Connection:  
Cableado:  
连接方式:

Optical inspection of measuring point:  
Comprobación óptica de puntos de medición:  
对测量点的光检:

Electrical inspection of measuring point:  
Comprobación eléctrica de puntos de medición:  
对测量点的电检:

Insulation resistance:  
Resistencia de aislamiento:  
绝缘电阻:

Measuring point resistance:  
Resistencia del punto de medición:  
流阻:

Protective cover:  
Cubierta de protección:  
保护覆盖:

Notes  
Observaciones:  
注明:

 **OMEGA**<sup>®</sup>  
*The Latest Technological Innovations*

**United States:** 1.800.826.6342 • omega.com • pressure@omega.com  
**Benelux:** 0800 099 33 44 • omega.nl • sales@omegaeng.nl  
**Canada:** 1.800.826.6342 • omega.ca • salesinfo@omega.ca  
**China:** 800 819 0559 • 400 619 0559 • cn.omega.com • info@cn.omega.com  
**Czech Republic:** +420 596 311 899 • omegaeng.cz • info@omegashop.cz  
**France:** 0805 541 038 • omega.fr • esales@omega.fr  
**Germany/Austria:** 0800-8266342 • omega.de • info@omega.de  
**Mexico/Latin America:** 001 203 359 7803 • omega.com • espanol@omega.com  
**United Kingdom:** 0800 488 488 • omega.co.uk • sales@omega.co.uk

A3897-2-0 1-2002-3657