

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ



Bakalářská práce

Tenzometrické měření za vyšších teplot

Praha, 2019

Autor: Lukáš Zaslavskij

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou diplomovou práci zpracoval samostatně a souhlasím s tím, že její výsledky mohou být dále využity dle uvážení vedoucího této práce Ing. Karla Doubravy, Ph.D. V případě publikace si přeji být uveden jako spoluautor.

Datum

Podpis

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat všem, kteří mi při vytváření této práce pomáhali. Především děkuji svému vedoucímu bakalářské práce, Ing. Karlovi Doubravovi, Ph.D. za věnovaný čas a připomínky a mé rodině za podporu během studií.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Zaslavskij** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **466631**
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:

Tenzometrické měření za vyšších teplot

Název bakalářské práce anglicky:

Strain Guages Measurements at Higher Temperatures

Pokyny pro vypracování:

- 1) Rešerše měření deformací za vyšších teplot
- 2) Rešerše tenzometrické snímače
- 3) Experimentální určení deformací za vyšších teplot
- 4) Diskuze získaných výsledků

Seznam doporučené literatury:

F. Valenta a kol.: Pružnost a pevnost III, 2003, ČVUT v Praze
K. Hoffmann: An Introduction to Stress Analysis using Strain Gauges, 1987, HBM GmbH, Darmstadt

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

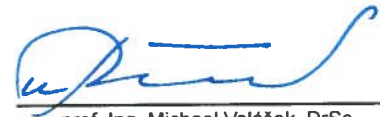
Datum zadání bakalářské práce: **25.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **16.08.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Ing. Karel Doubrava, Ph.D.
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.

30.4.2019

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Název práce: Tenzometrické měření za vyšších teplot

Autor: Lukáš Zaslavskij

Abstrakt Tato bakalářská práce se zabývá tenzometrickým měřením za vyšších teplot. Klade si za cíl řešit problémů vyskytujících se u vyšších teplot a možností kompenzace těchto problémů. V úvodních kapitolách je popsáno tenzometrické měření obecně, dále je kladen větší důraz na měření za vyšších teplot. V následné experimentální části je provedeno měření za vyšších teplot se snahou vyšší teplotu kompenzovat vlastnostmi tenzometru nebo způsobem zapojení. Tato část je doplněna o porovnání s teoretickým výpočtem zatížení.

Klíčová slova: tenzometrie, odporový tenzometr, vyšší teplota

Obsah

1	Úvod.....	7
2	Druhy tenzometrických snímačů.....	8
2.1	Mechanické snímače [1]	8
2.2	Optické metody.....	9
2.3	Elektrické snímače	11
2.3.1	Odporové (kovové) snímače [3]	12
2.3.2	Polovodičové snímače [1,8].....	14
3	Teorie odporového tenzometru	15
4	Parametry odporových tenzometrů.....	16
4.1	Napájecí napětí	16
4.2	K-faktor	16
4.3	Teplotní samokompence	17
4.4	Příčná citlivost.....	18
5	Schéma a aplikace Wheatstoneova můstku.....	20
5.1	Plný můstek.....	22
5.2	½ můstek a ¼ můstek.....	22
5.2.1	½ můstek.....	22
5.2.2	¼ můstek.....	23
6	Měření deformací odporovými tenzometry za vyšších teplot	24
6.1	Dělení teplot	24
6.2	Odporové tenzometry	24
6.3	Problémy spojené s měřením deformací za vyšších teplot	26
6.3.1	Lepidlo [9].....	26
6.3.2	Nepřesnost tenzometru za vyšších teplot.....	26
6.3.3	Kabely	27

6.3.4	Krytí.....	27
6.3.5	Pájka	27
7	Experimentální část	28
7.1	Praktická část	28
7.1.1	Pozice tenzometru.....	28
7.1.2	Úprava povrchu	29
7.1.3	Orientace tenzometru	29
7.1.4	Čištění povrchu	30
7.1.5	Příprava tenzometru.....	30
7.1.6	Instalace tenzometru.....	31
7.1.7	Připojení k tenzometrické ústředně	33
7.2	Teoretický výpočet.....	35
7.3	Výsledky měření.....	36
8	Závěr	42
9	Citace	44
10	Seznam použitých zkratek	46

1 Úvod

V současnosti jsou při návrhu nových konstrukcí velmi důležitou součástí vývoje finanční náročnost a zároveň vysoká kvalita. Důraz je kladen na co nejmenší spotřebu, aniž by to výslednou kvalitu výrobku ovlivnilo.

Nové konstrukce se při vývoji podrobují testování. Jednou z oblastí testování je zkoumání deformací, které se při zatížení projeví i na povrchu tělesa, kde tuto deformaci můžeme měřit a z výsledků upravit původní konstrukci.

V minulosti se měřilo především mechanickými snímači. Ať už to byly délkové měřidla nebo např. Huggenbergerův tenzometr. Postupem času bylo třeba měřit s větší přesností a začalo se přecházet na jiné metody, například optické metody, měření pomocí křehkých laků nebo měření elektrickými snímači, které dnes patří mezi ty nejpoužívanější.

Výhody elektrických snímačů jsou relativně nízké náklady, vysoká efektivita a možnost měřit i malé součásti. Nejrozšířenějším elektrickým snímačem deformace je odporový tenzometr, kterým se ve své práci budu primárně zabývat.

Je třeba si uvědomit, že podmínky, za kterých se měří, jsou u každého experimentu jiné. Ať už se jedná o rozměry součásti, typ namáhání nebo okolní podmínky jako je třeba teplota. Tato práce se zabývá měřením deformací a zkoumáním, jak toto měření ovlivní teplota.



Obr. 1 Použití tenzometrů [3]

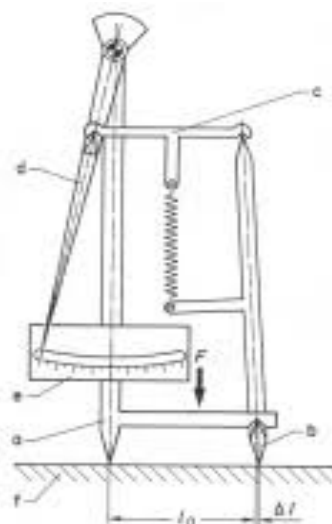
2 Druhy tenzometrických snímačů

2.1 Mechanické snímače [1]

V roce 1678 přišel anglický vědec Robert Hook s novým objevem. Zjistil, že existuje závislost mezi zatížením a deformací. Tato deformace se projevuje i na povrchu zatíženého tělesa, a tudíž je možné ji měřit.

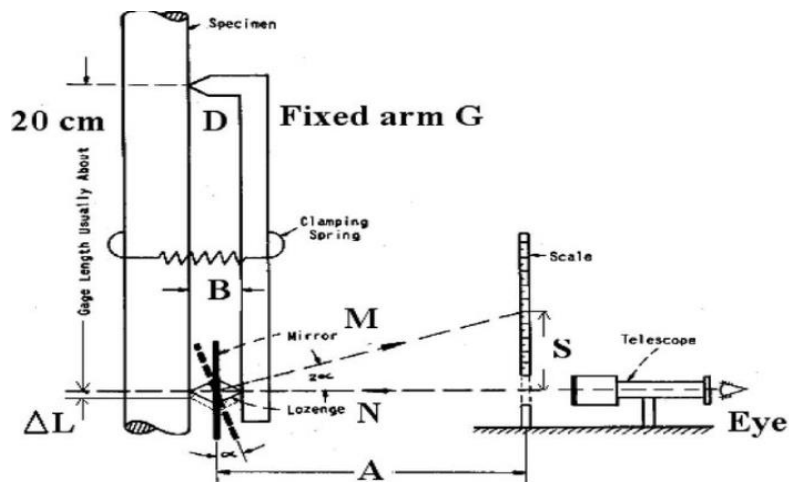
Mezi první mechanické snímače můžeme zařadit například kovová měřítka, posuvná měřítka, mikrometry a další měřidla vzdálenosti.

Poté se používaly Huggenbergerovy tenzometry, u kterých se ručička na stupnici vychýlila při deformaci povrchu viz Obr. 2. Čím větší bylo vychýlení, tím větší byla deformace. Na orientaci vychýlení pak záleželo, jestli je měřená součást namáhána tahem nebo tlakem. Huggenbergerovy tenzometry však měly hodně nevýhod. Zkoumaná součást musela být velice silně upevněná, aby nedošlo k prokluzu měřícího zařízení a zatěžována pouze statickou silou. Huggenbergerův tenzometr byl poměrně veliký. To mělo za následek nemožnost měřit malé součásti nebo správně měřit malé oblasti namáhání.



Obr. 2 Huggenbergerův tenzometr [1]

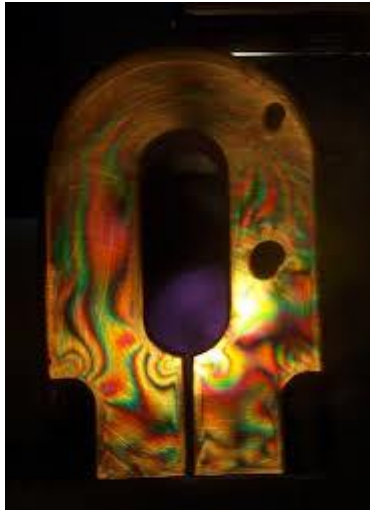
Dalším mechanicko optickým snímačem je Martensův tenzometr. U něj se při deformaci povrchu natáčí zrcadlo, které je pozorováno teleskopem a ze stupnice je odečítáno prodloužení, Obr. 3. [4]



Obr. 3 Martensův tenzometr [4]

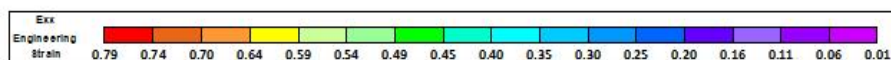
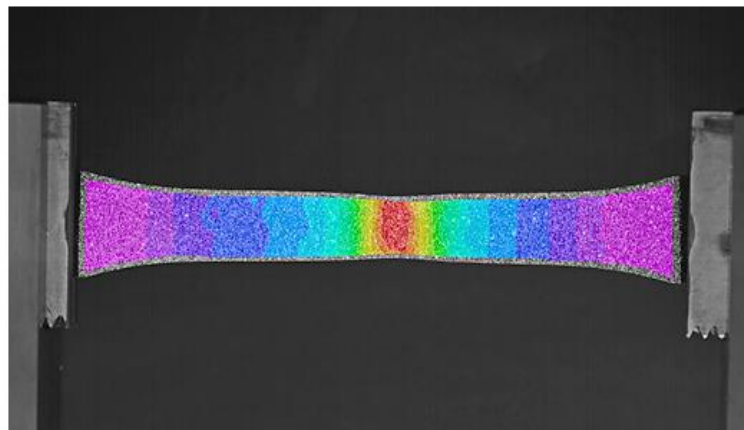
2.2 Optické metody

Jako příklad zkoumání napětí optickým principem můžeme uvést například fotoelasticimetrii. Při této metodě musí být zkoumaná součást vyrobena z materiálů, u kterých lze pozorovat umělou anizotropii vyvolanou mechanickou deformací například organické sklo. Anizotropie je vlastnost materiálů, která označuje závislost určité veličiny, v našem případě průchod světla, na směru, ve kterém tato veličina působí. Umělá anizotropie je vnějšími účinky vyvolaná anizotropie u jinak izotropních materiálů. U opticky izotropních materiálů dochází k dočasnému dvojlomu vnesením napětí. Dvojlom se projeví rozkladem světelného paprsku na dva paprsky, z nichž každý se šíří jinou rychlostí a kmitá v jiné rovině. V současnosti už tato metoda není často používána. Jednou z variant měření deformací na povrchu součásti je reflexní fotoelasticimetrie. Model či skutečná součást nejsou z opticky citlivého ani transparentního materiálu, proto je na ně nanášena tenká vrstva opticky citlivého materiálu. Poté je součást možno pozorovat stejně jako u rovinné fotoelasticimetrie. [2]



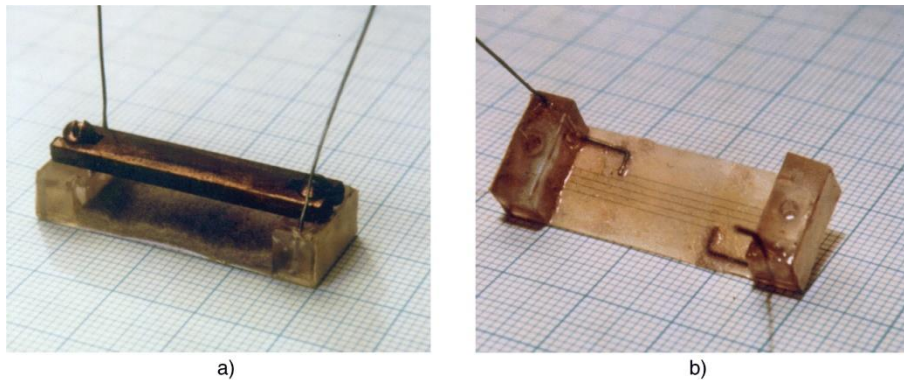
Obr. 4 Příklad užití metody fotoelasticimetrie [2]

Další z využívaných metod je digitální korelace obrazu. Princip této metody je založen na viditelné deformaci zkoumané součásti. Na povrchu součásti se barvou vytvoří libovolný, dobře viditelný a nepravidelný vzor. Ten se pomocí videokamery a softwaru pozoruje. V softwaru se povrch nezatížené součásti rozdělí na určitý počet oblastí a pozoruje se jejich posunutí na jednotlivých snímcích. Kromě samotného měření deformací se tato metoda používá i například jako kontrola výpočetních simulací, jelikož výstupem je obraz měřené součásti s barevně oddělenými oblastmi namáhání.[6]



Obr. 5 Digitální korelace obrazu [7]

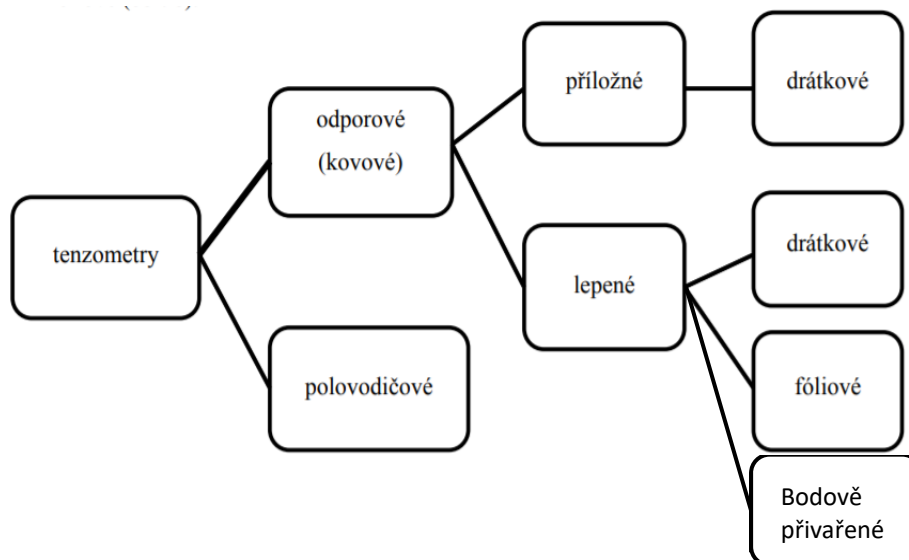
2.3 Elektrické snímače



Obr. 6 Rugeho tenzometr a) tenzometr v přepravní poloze b) detail vinutí [10]

Kolem roku 1930 se u tenzometrů začal používat efekt, při kterém se deformace vodiče projeví na změně jeho odporu. Ačkoliv byl samotný efekt objeven již v polovině 18. století, změna odporu byla tak malá, že ho tehdejší přístroje nedokázaly změřit. Jako vynálezce elektrických tenzometrů, které známe dnes, můžeme považovat Arthura Claude Rugeho. Jeho konstrukce tenzometru umožňovala přilepit tenzometr na jakýkoliv povrch, jelikož tenzometr již nebyl spojen s měřicím přístrojem pevně, ale pomocí vodících kabelů. Součásti se proto daly zatěžovat jak staticky, tak dynamicky, což předtím nebylo možné.

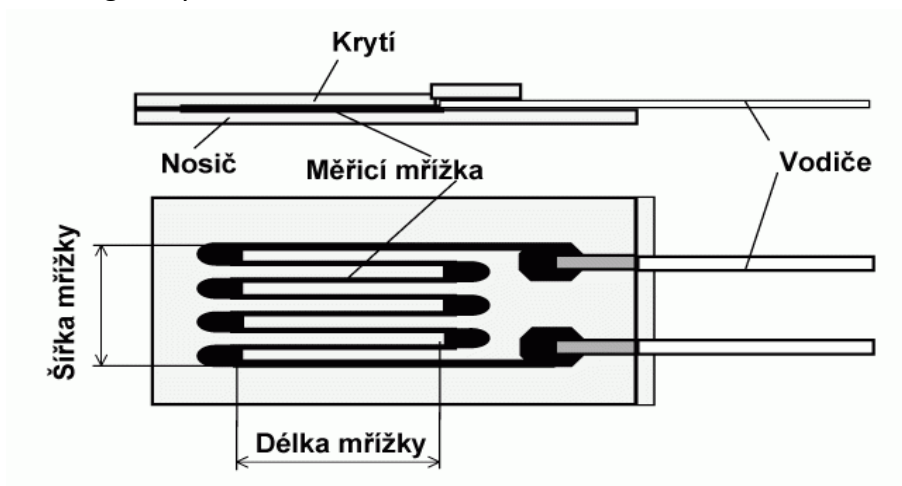
Jeden z možných způsobů dělení tenzometru je patrný na Obr. 7



Obr. 7 Dělení elektrických tenzometrů

2.3.1 Odporové (kovové) snímače [3]

První tenzometry byly drátkové příložné, které se na součást přikládaly nebo lepily. V roce 1952 se začal používat tenzometr fóliový, který se dnes převážně používá. Jedná se o vodivou mřížku, která je vyleptána na nosnou fólii a překryta druhou vrstvou fólie. Tenkými vodiči je potom signál vyveden ze sendviče ven.



Obr. 8 Struktura tenzometru [3]

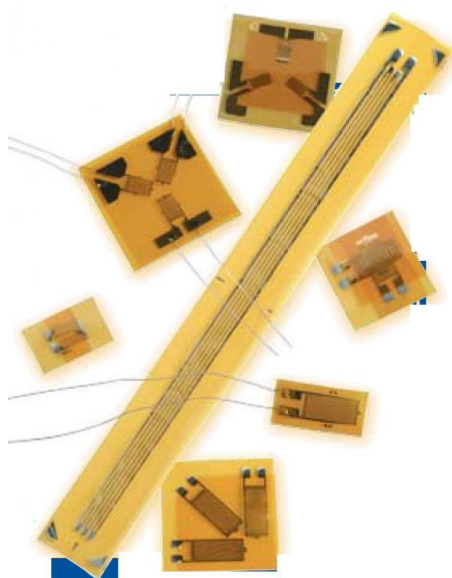
Výhody jsou snadná aplikace, cenová dostupnost, široký výběr, oproti drátkovým tenzometrům lepší odolnost vůči teplu a mnoho dalších. Oproti polovodičovým se vyznačují vysokou linearitou, a tedy i vysokou přesností. S širokým výběrem je spojen i široký výběr materiálů tenzometrů, který je třeba volit dle požadované přesnosti, podmínek měření, materiálu měřené součásti nebo cenové dostupnosti.

Název materiálu	Přibližné složení
konstantan	57 % Cu, 43 % Ni
karma	73 % Ni, 20 % Cr (příp. Fe+Al)
nichrome V	80 % Ni, 20 % Cr
platina-wolfram	92 % Pt, 8 % W

Obr. 9 Materiály odporových tenzometrů [3]

Příklady použití odporových tenzometrů:

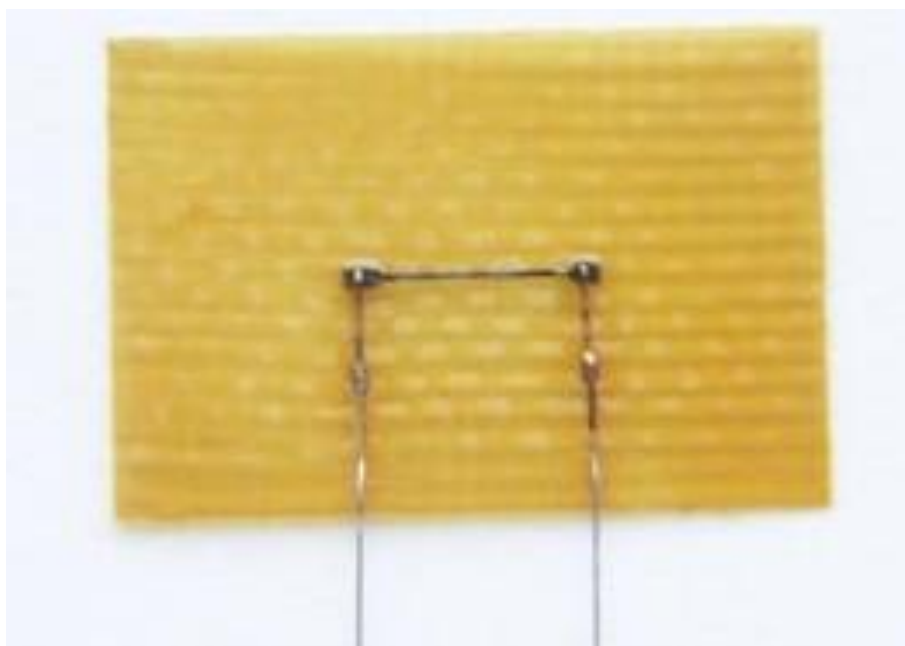
- Měření deformací objektů.
- Vážní systémy v průmyslu.
- Měřicí konstrukce síly, tlaku, kroutícího momentu, momentu síly, mechanického napětí spojů (např. svařovaných nebo lepených).



Obr. 10 Fóliové tenzometry [3]

2.3.2 Polovodičové snímače [1,8]

Princip měření polovodičovým snímačem je založen na piezorezistivním jevu objeveném v roce 1954 C.S. Smithem. Tento jev způsobuje změnu měrného elektrického odporu působením vnější síly a deformací krystalické mřížky. Konstrukcí se od odporového tenzometru téměř neliší. Avšak jeho vlastnosti a materiálové složení je jiné. Vyznačuje se až 60x větší citlivostí, což nám zjednodušuje konstrukci vstupních obvodů a umožňuje měřit i malé změny odporu. Má však i několik nevýhod jako např. nelinearita mezi změnou odporu na deformaci, cenová dostupnost, vysoká citlivost na změnu teploty, která je nelineární nebo náchylnost k lomu během manipulace kvůli křehkosti polovodičových materiálů. Nejčastěji jsou polovodičové snímače vyráběny z křemíku dotovaného bórem nebo aluminím.



Obr. 11 Polovodičový snímač

Příklady použití polovodičových snímačů:

- Přesné váhy využívané například v automobilovém průmyslu
- Nedílná součást některých integrovaných senzorů tlaku, síly, váhy
- Měření vibrací a deformací apod.
- Měření a detekce pnutí vlivem teploty, externího zatížení apod.
- Měření rozsáhlých deformačních polí složitě namáhaných mechanických konstrukcí

3 Teorie odporového tenzometru

Při měření tenzometry je důležité dbát na to, aby byl tenzometr s měřeným povrchem pevně spojen. U odporových tenzometrů je tento spoj realizován několika způsoby. Nejběžněji dostupný z hlediska použitelnosti a finanční náročnosti je lepidlo, např. lepidlo na bázi epoxidové pryskyřice. Při měření ocelových konstrukcí je možné tenzometr na konstrukci bodově přivařit. Díky správnému spojení tenzometr snímá z povrchu deformace, které dále měříme.

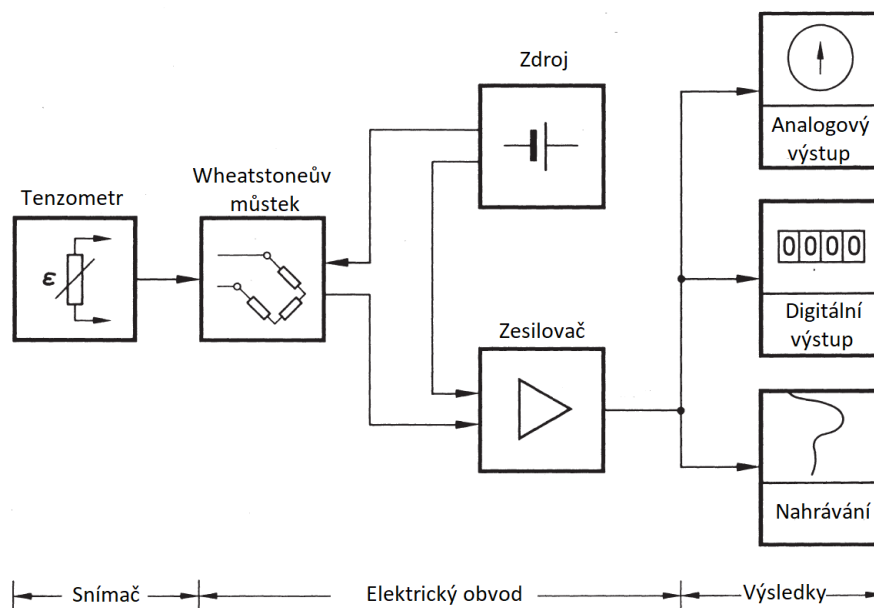
Měřicí princip je založený na vztahu mezi napětím a rezistivitou vodiče, který v druhé polovině 40. let 19. století objevil Charles Wheatstone a William Thomson. Zjistili, že rezistivita každého vodiče se mění s mechanickým napětím. Tato změna je způsobena deformací vodiče a změnami ve struktuře jeho materiálu. Lze ji popsat následujícím vztahem:

$$\frac{dR}{R_0} = \varepsilon(1 + 2\nu) + \frac{dQ}{Q} \quad (1)$$

$\varepsilon(1 + 2\nu)$ je změna odporu vlivem geometrické deformace vodiče

$\frac{dQ}{Q}$ je změna odporu vlivem změn ve struktuře materiálu vodiče

Takovéto změny měrného odporu jsou však velmi malé. Tenzometr je zapojen do obvodu, kde je možné i tyto malé změny měřit. Samotný tenzometr se nejčastěji zapojuje do elektrického obvodu jako jedno z ramen Wheatstoneova můstku (viz kapitola 5). Aby bylo možné odpor měřit, je nutné do tohoto elektrického obvodu přivést napětí ze zdroje připojeného do elektrického obvodu. Dalším článkem je zesilovač, který dokáže drobnou změnu vstupního napětí ze zdroje, způsobenou změnou odporu tenzometru, zesílit (některé i převést na proudový výstup) tak, aby bylo možné ji měřit. Zesílený signál je možné dále zpracovat, v dnešní době hlavně pomocí A/D převodníků a poté zesílený signál i ukládat. Elektrický obvod a software poskytující výsledky je v moderních zařízeních integrován přímo v tenzometrické ústředně.



Obr. 12 Schéma měřícího zapojení (upraveno podle [1])

4 Parametry odporových tenzometrů

Každý dodavatel vždy udává několik základních informací o tenzometru. Podle typu měření se z nich pak vybírá ten nejvíce vyhovující. Mezi parametry udávané výrobcem patří:

4.1 Napájecí napětí

Napájecí napětí je nutné volit tak, aby se nepřehřívala měřící mřížka, měřený povrch nebo spoj tenzometru s měřeným povrchem, stejně jako kdyby se zahříval vlivem vysoké teploty okolí. Následkem nesprávné volby napájecího napětí je hystereze, creep, nestálá nulová hodnota a zhoršení teplotní samokompensace. Volbu napájecího napětí ovlivňuje teplota okolí a tepelné vodivosti měřeného povrchu. Čím větší je teplota a horší vodivost měřeného materiálu, tím menší napájecí napětí je možno použít.

Redukce napájecího napětí je účinným způsobem, jak zmenšit teplo, způsobené elektrickým vedením, jelikož je závislost teploty (výkonu) na napětí kvadratická.

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (2)$$

4.2 K-faktor

K-faktor neboli součinitel deformační citlivosti nám udává vztah mezi změnou odporu a deformací ve směru délky tenzometru.

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon \quad (3)$$

Při výrobě nových tenzometrů se K-faktor vždy experimentálně zjistí a je uveden v dokumentaci přiložené k tenzometru. Čím větší je K-faktor, tím větší je změna odporu vlivem deformace. U kovových tenzometrů se hodnota K-faktoru pohybuje kolem hodnoty $K=2$. Existují však i výjimky. Například u slitiny platiny a wolframu je hodnota K-faktoru dvojnásobná.

Název materiálu	Průměrná hodnota K
Konstantan	2,05
Karma	2,1
Niklchrom V	2,2
Platina-chrom	4,0

Tab. 1 K-Faktor různých materiálů tenzometru

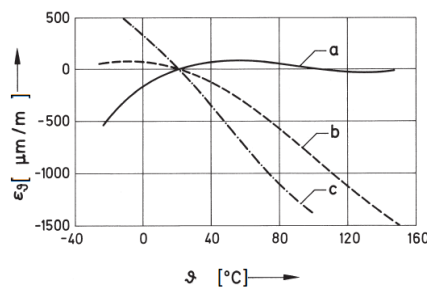
4.3 Teplotní samokompence

Většina materiálů se při zvýšené teplotě deformuje, v závislosti na jejich teplotních roztažnostech. V případě tenzometrického měření je to teplotní roztažnost měřené součásti α_C a teplotní roztažnost mřížky tenzometru α_M . Se zvýšenou teplotou se mění také teplotní koeficient odporu mřížky tenzometru α_R . Výsledná deformace způsobená teplotou je:

$$\varepsilon_T = \left(\alpha_C - \alpha_M + \frac{\alpha_R}{K} \right) \cdot \Delta T \quad (4)$$

Jeden ze způsobů, jak nepřesnost měření vlivem teploty zmenšit, je omezit maximální teplotu měření. To by ovšem znamenalo, že nelze měřit součásti, které se využívají v prostředí s vyšší teplotou. Proto se kovy, ze kterých se tenzometry vyrábí, legují jinými prvky, které ovlivňují jejich teplotní roztažnost.

Další ze způsobů, jak zmenšit nepřesnosti měření způsobené vyšší teplotou, je zvolit správný materiál tenzometru vzhledem k materiálu měřené součásti. Cílem je volit takový materiál tenzometru, který má s materiálem měřené součásti podobné vlastnosti. Ty nezáleží jenom na materiálu, ale taky například na způsobu výroby. O kolik se vlivem teploty zvětší odpor tenzometru, o tolik se zmenší vlivem teplotního součinitele materiálu tenzometru. Na obrázku níže je vynesena závislost mezi deformací tenzometru vlivem teploty a teplotou okolí. Byl použit jeden stejný druh tenzometru na tři povrchy z různých materiálů.



a	Hliník	$\alpha_C = 23 \cdot 10^{-6}/K$
b	Ocel	$\alpha_C = 12 \cdot 10^{-6}/K$
c	Křemík	$\alpha_C = 0.5 \cdot 10^{-6}/K$

Obr. 13 Graf závislosti teplotní roztažnosti na teplotě (upraveno podle [1])

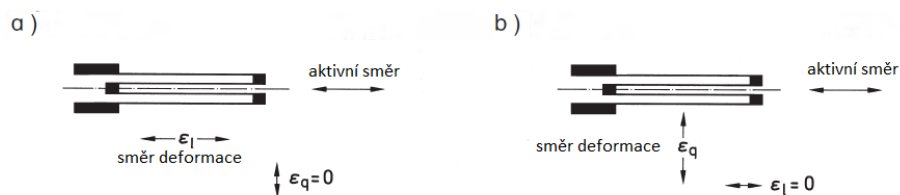
Z grafu je dobře vidět, že při použití tenzometru na součást z hliníku se deformace vlivem teploty pohybuje kolem nuly. Použitý tenzometr je tedy nejvýhodnější používat na součásti vyrobené z hliníku.

Cílem samokompensace je deformaci vlivem teploty úplně vyloučit. V rovnici (4) je tedy $\epsilon_T = 0$, z čehož vyplývá:

$$\alpha_R = (\alpha_C - \alpha_M)K \quad (5)$$

4.4 Příčná citlivost

Při měření je tenzometr nalepen vždy tak, aby směr deformace působil ve směru délky tenzometru (aktivní směr). Součást se ovšem nikdy nedeformuje pouze v jednom směru.



Obr. 14 Deformace v aktivním směru (a) a směru na něj kolmém (b)

Proto se zavedl pojem příčná citlivost, který zavádí vztah mezi deformací v aktivním směru a směru na něho kolmém.

a) Deformace v aktivním směru

Aktivní směr udává směr hlavní deformace, který je třeba změřit. Ze vztahu uvedeného v kapitole o K-faktoru vychází i následující vztah:

$$k_l = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon_l} \quad (6)$$

b) Deformace ve směru kolmém na aktivní směr

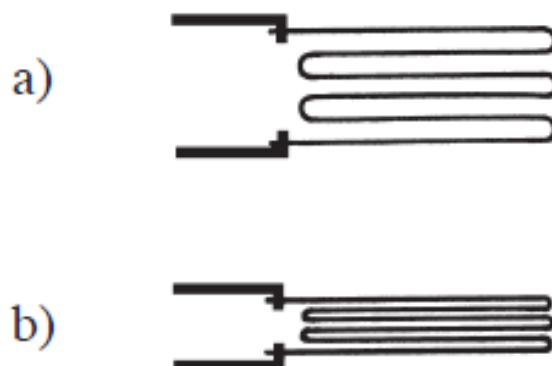
Snaha je, aby deformace v tomto směru byla co nejmenší, jelikož deformace v tomto směru ovlivňuje přesnost výsledku. Stejně tak jako u aktivního směru lze vyjádřit vztah uvedený níže:

$$k_q = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon_q} \quad (7)$$

Příčná citlivost je poté definována jako:

$$q = \frac{k_q}{k_l}$$

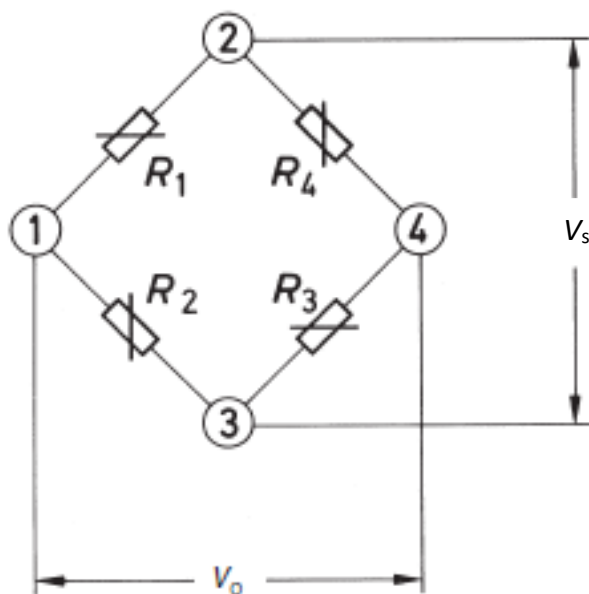
Příčnou citlivost lze omezit zmenšením mezery mezi jednotlivými vodiči v měřící mřížce. Z počátku se používaly měřící mřížky s velkými mezerami. U těchto tenzometrů byla příčná citlivost velká. Proto se začaly vyvíjet tenzometry s mezerami menšími a z toho vyplývající menší příčnou citlivostí. V současné době mají většinou tenzometry dodávané renomovanými výrobci příčnou citlivost zanedbatelnou.



Obr. 15 Zmenšování mezery mezi jednotlivými vodiči měřící mřížky

5 Schéma a aplikace Wheatstoneova můstku

V roce 1843 zveřejnil sir Charles Wheatstone nový elektrický obvod, umožňující přesné měření elektrického odporu. Pomocí obvodu lze měřit změnu odporu vůči známému odporu nebo měřit jeho relativní odpor. Při tenzometrickém měření se relativní změny odporu pohybují mezi 10^{-4} a $10^{-2} \Omega/\Omega$ a při klasickém zapojení by nemohly být změřeny tak přesně, jako při měření Wheatstoneovým můstkem.



Obr. 16 Wheatstoneův můstek

Za předpokladu, že odpor na zdroji je nulový a můstek není vyvážený vlivem rozdílného napětí mezi odpory R_1 a R_2 a zároveň R_3 a R_4 , mezi výstupním napětím V_o a napájecím napětím V_s jako:

$$V_o = V_s \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \quad (8)$$

Pokud by byl můstek vyvážený, výstupní napětí by bylo nulové a platil by vztah:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (9)$$

U tenzometrického měření se předpokládá, že R_1 a R_2 a zároveň R_3 a R_4 jsou stejné. Po součtu lze dostat vztah:

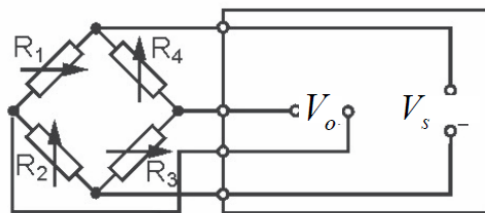
$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (10)$$

V posledním kroku se do rovnice dosadí rovnice (3), vyjadřující vztah mezi změnou odporu a deformací. Výsledkem je tedy vztah mezi poměrem vstupního a výstupního napětí a deformací měřenou tenzometry na pozicích 1-4:

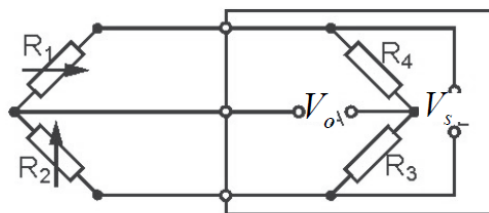
$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (11)$$

Tento finální vzorec předpokládá změnu všech čtyř odporů. V praxi se používají tři základní druhy můstků – plný můstek, ½ můstek a ¼ můstek. U ½ můstku a ¼ můstku se během měření mění jen některé odpory. Ostatní jsou tvořeny konstantními odpory s co největší dlouhodobou stabilitou a s co nejmenší ovlivnitelností teplotou. Místo konstantních odporů lze použít také kompenzační odpory. Další ze způsobu zpřesnění měření je kompenzace chyby vedení. V případě ¼ můstkového zapojení se používá tři nebo čtyřvodičové zapojení, u ½ můstkového zapojení pětivodičové připojení, respektive šestivodičové u plného můstku, pomocí kterých se měří úbytek napětí způsobený vedením.

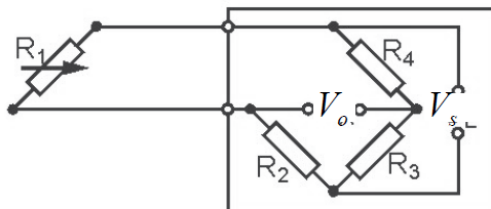
plný můstek



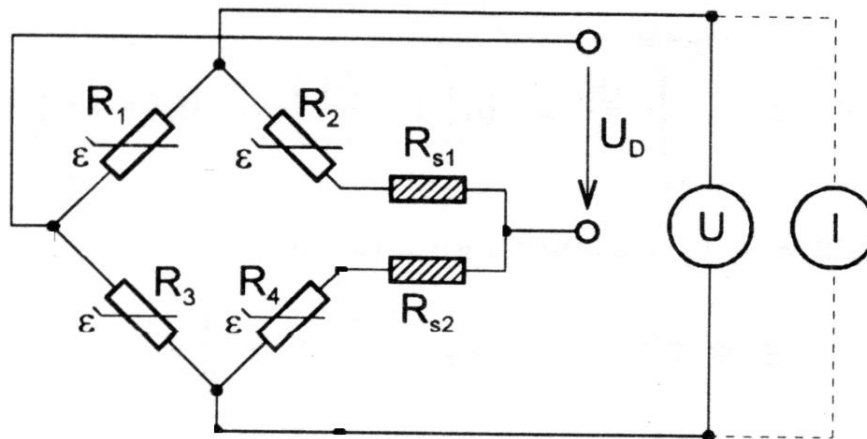
½ můstek



¼ můstek



Obr. 17 Způsoby zapojení do wheatstoneova můstku



Obr. 18 Třívodičové zapojení

5.1 Plný můstek

Zapojení do plného můstku je dáno 4 proměnnými odpory, v našem případě tenzometry. Ze vzorce (11) je patrné, že deformace tenzometrů na pozici 1 a 3 se sčítají a na pozici 2 a 4 se odčítají. To umožňuje teplotní kompenzaci, jelikož se deformace $\alpha \cdot \Delta T$ vzniklé působením teploty odečtou. Všechny tyto tenzometry se nachází v místě měření deformace. Z toho důvodu je důležité umístit tenzometry tak, aby se výsledná deformace neodečetla. Pokud se ovšem zapojí správně, výsledný signál je až 4x větší a deformace způsobená teplotou se odečte. Výhody tohoto zapojení spočívají v tom, že pokud je zapojení krátké a symetrické, můžeme u něj zanedbat odpor vedení, který je v tomto případě velmi malý. Plný můstek se používá například u snímačů jako je siloměr nebo tlakový převodník, v němž je tlak měřen pomocí deformace membrány s tenzometry. Při tomto měření je na přesnost měření kladen větší důraz než u měření napětí na povrchu součástí, a proto se používá zapojení do plného můstku.

5.2 ½ můstek a ¼ můstek

Při měření deformací konstrukcí pomocí tenzometrů se nejběžněji používá zapojení do ½ můstku nebo do ¼ můstku. Konkrétní zapojení se určuje dle druhu měření.

5.2.1 ½ můstek

Zapojení do ½ můstku je dáno dvěma proměnnými odpory a dvěma konstantními odpory. Ze vzorce (11) vychází, že se deformace z tenzometru na pozici 1 a 2 odečítají. Toho se využívá u například u ohybu nosníku. Jeden tenzometr snímá tlak a druhý tah na opačné

straně nosníku. Po odečtení záporného tlaku od kladného tahu bude výsledná deformace dvojnásobná, což znamená přesnější měření. Hlavní výhodou takového zapojení je kompenzace teploty. Jelikož se u tlaku stejně tak při tahu projeví prodloužení od teploty $\alpha \cdot \Delta T$, po odečtení deformace vlivem tlaku od deformace vlivem tahu se prodloužení od teploty odečte.

Dalším z využití $\frac{1}{2}$ můstkového zapojení je využití jednoho z dvou tenzometrů jako tenzometru kompenzačního. Tento tenzometr pracuje ve stejné teplotě jako tenzometr snímající deformaci, ale není na stejné součásti. Místo toho je na nenamáhaném pomocném místě. Toto místo, ať už se jedná o nenamáhanou část měřené součásti či pomocnou desku, musí být tvořeno stejným materiálem, jako měřené místo. Tenzometr pak snímá pouze deformaci způsobenou teplotou. Deformaci způsobenou teplotou je pak možné odečíst od měřícího tenzometru a získat pouze deformaci způsobenou namáháním měřené součásti.

U měření jednoosé deformace je možné nalepit jeden tenzometr kolmo na druhý. Pomocí takto orientovaného je změřena příčná deformace. Primární tenzometr je zapojen na pozici 1 a tenzometr nalepený kolmo na něj je zapojený na pozici 2, deformace způsobené vlivem teploty se odečtou a získaný signál je $(1+\nu)$ větší. Toto zapojení lze používat pouze u izotropních materiálů.

5.2.2 $\frac{1}{4}$ můstek

Zapojení do $\frac{1}{4}$ můstku je dáno jedním proměnným odporem a třemi konstantními odpory. Toto zapojení se používá u jednoosých druhů namáhání a ohybů u kterých není třeba kompenzovat teplotu. Pokud by byl výstupní signál malý, je možné do jednoho ramena Wheatstoneova můstku zapojit dva tenzometry a výstupní signál tak dvakrát zesílit. Zapojení do $\frac{1}{4}$ můstku se používá, pokud je deformace dostatečně veliká. Výhoda tohoto zapojení je nižší finanční a časová náročnost oproti předchozím variantám zapojení.

6 Měření deformací odporovými tenzometry za vyšších teplot

6.1 Dělení teplot

Podle podmínek, ve kterých je měření provedeno můžeme teploty rozdělit na:

- Extrémně nízké (-269 °C do -40 °C)
- Nízké (-40 °C do 0 °C)
- Normální (0 °C do 150 °C)
- Vysoké (150 °C do 350 °C)
- Extrémně vysoké (350 °C a více)

6.2 Odporové tenzometry

Tato práce se zabývá měření za vyšších teplot v rozmezí cca 20 °C až 175 °C. Výrobci dodávají široké spektrum tenzometrů pro různé teploty a z nich je možné vybrat si ten, který podmínkám měření vyhovuje nejlépe. Níže je uvedeno několik tenzometrů společností Kyowa, HBM a Fraunhofer:

Naleptané tenzometry – Tenzometry schopné měřit při teplotách vyšších než 1000°C. Oproti ostatním tenzometrům nejsou uloženy v ochranných vrstvách, ale položeny na jen několik mikrometrů tlustý film Al_2O_3 a naleptány pomocí laseru na povrch. Tím se zvyšuje jejich citlivost a eliminují problémy, které u ostatních tenzometrů vznikají.

Série KHC – Tenzometry určené do teplot až 1000°C. Tenzometry jsou uzavřeny v kovové trubce a pomocí kabelů je signál odveden do ústředny. Trubka se bodovým svařováním navaří na materiál a poté je možné měřit.



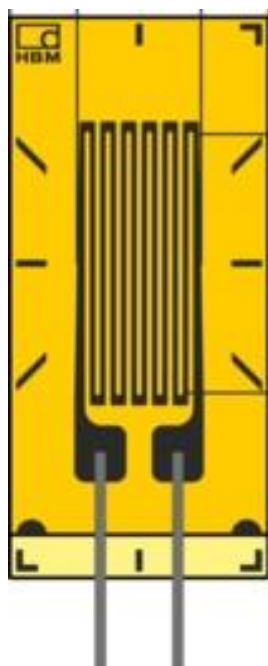
Obr. 19 Tenzometr série KHC

Série KH – Tenzometry určené do teplot až 350°C. Tenzometry jsou spojeny s ocelovou fólií a poté stejně jako série KHC bodově svařeny na povrch součásti.



Obr. 20 Tenzometr série KH

Série LY – Tenzometry určené do teplot až 200°C. Mřížka tenzometru je vyrobena z chemicky stabilního chrom-niklu s odolností proti vysokým teplotám, uložená ve fólii z polyimidů s velkou pevností a odolností proti tečení. S měřeným povrchem se spojí pomocí lepidla. Vzhledem k tomu, že se v experimentální části této práce nepřekročí teplota 200 °C je tento tenzometr vhodný k provedení experimentu.



Obr. 21 Tenzometr série LY

6.3 Problémy spojené s měřením deformací za vyšších teplot

Každé tenzometrické měření je třeba uzpůsobit podmínkám, za kterých je měření prováděno. Nejčastější problémy, které se u měření za vyšších teplot vyskytují, jsou:

6.3.1 Lepidlo [9]

Tenzometr snímá deformace součásti z povrchu, proto musí být na povrch dobře přilepen. Při vyšších teplotách však může docházet ke zhoršení vlastností lepidla a tenzometr se může odlepit. Proto je třeba lepidlo volit podle podmínek, za kterých se bude měřit. Níže je uvedeno několik lepidel společnosti HBM.

X60 - lepidlo na bázi methylmetakrylátu je speciálně vyrobeno pro teploty pohybující se od -200°C do 60°C .

Z-70 - lepidlo na bázi kyanokrylátu jehož hlavní výhodou je rychlost užití. Při teplotě 20°C , působení tlaku způsobeném pouze pomocí přiložení prstu a bez katalyzátoru je doba vytvrdnutí pouze minuta. Pracovní teplota je od -55°C do 100°C .

P250 - lepidlo je vhodné pro použití za vysoké teploty až 250°C do obtížných podmínek, při kterých musí tenzometr na součásti velice pevně držet.

X280 - lepidlo je vhodné pro měření za teplot až 200°C u velikých součástí, které není možné tepelně ošetřit. Na rozdíl od ostatních lepidel používaných při vyšších teplotách, lepidlo X280 vytvrdne i při pokojové teplotě. Vzhledem k tomu, že v experimentální části této práce bude součást měřena za vyšších teplot a za podmínek, při kterých není pravděpodobné, že by se tenzometr mohl odlepit, bude použito toto lepidlo.

6.3.2 Nepřesnost tenzometru za vyšších teplot

Měřený materiál se vlivem vysoké teploty roztahuje. Tento jev se nazývá teplotní dilatace a představuje deformaci způsobenou teplotou, ne namáháním měřené součásti. Podrobněji je teplotní dilatace popsána v kapitole 4.3 o teplotní samokompensaci.

6.3.3 Kabely

Kabely, které spojují tenzometr s ústřednou musí mít takové vlastnosti, které umožní měřit i za horších podmínek. Zde je několik druhů kabelů, nabízených společností HBM:

Měděný lakovaný vodič -	Teplotní odolnost -40 °C ... +80 °C, krátkodobě do +120 °C, nejlevnější varianta
Plochý kabel s PVC izolací -	Teplotní odolnost do +90 °C, krátkodobě do +105 °C, s PVC izolací, ale není vhodný pro měření, při kterém je kabely třeba přesouvat a jinak s nimi manipulovat
Teflonem izolovaný vodič -	Teplotní odolnost -200 °C ... +260 °C, vhodný pro měření za nízkých nebo vysokých teplot
Vysoce ohebné lanko s PVC izolací -	Teplotní odolnost do +70 °C, krátkodobě do +105 °C, s PVC izolací, vhodné i pro měření, během kterého je s kabely manipulováno

Vzhledem k tomu, že se v experimentální části této práce bude měřit za vyšších teplot, byl zvolen vodič izolovaný teflonem.

6.3.4 Krytí

Krytí, které se používá při nižších teplotách, jako je například polyuretan nebo tmel, by za vyšší teploty shořely a tenzometr by nebyl chráněn vůči nežádoucím vlivům jako je vlhkost. Proto je třeba volit krytí, které odolává požadovaným teplotám. Jedním z možných způsobů krytí je pomocí silikonové pryskyřice, která má odolnost proti teplotám až 450°C.

6.3.5 Pájka

Tenzometr je na pájecích svorkách spojen s ústřednou pomocí kabelů připájených pájkou. Pokud by okolní teplota překročila teplotu tání pájky, která se běžně pohybuje okolo 200°C, spojení tenzometru s ústřednou by bylo nemožné a měření by nešlo provést.

7 Experimentální část

V experimentální části se tato práce bude zabývat tenzometrickým měřením za teploty přibližně 175°C. Cílem měření je zjistit ovlivnění přesnosti měření vysokou teplotou a zároveň snaha toto ovlivnění minimalizovat.

7.1 Praktická část

V praktické části experimentu byly změřeny dva nosníky, kdy jeden byl zatížen čtyřbodovým ohybem a druhý zůstal nezatížený. Na zatíženém nosníku byly měřeny deformace na tahové (SG A) i tlakové (SG B) straně. Na nezatíženém pak byl připojen jeden tenzometr. Tenzometry byly připojeny do Wheatstoneova $\frac{1}{4}$ můstku v třídrátové variantě. Oba vzorky byly umístěny do laboratorní pece, viz Obr. 28, ve které stupňovitě rostla teplota z původních 20°C až na 175°C. Teplota byla zaznamenávána teplotní čidlem Pt 100 poblíž tenzometru měřícího tlak (SG B) na zatíženém nosníku.

Cíle měření:

- 1) Měření deformací ovlivněných teplotou pomocí Wheatstoneova $\frac{1}{4}$ můstku na zatíženém nosníku, kdy bude využita samokompensace tenzometru
- 2) Měření deformací ovlivněných teplotou pomocí Wheatstoneova $\frac{1}{2}$ můstku na zatíženém nosníku, kdy toto bylo provedeno zprůměrováním signálů z tenzometrů SG A a SG B
- 3) Měření deformací ovlivněných teplotou pomocí Wheatstoneova $\frac{1}{4}$ můstku na nezatíženém nosníku, kdy bude využita samokompensace tenzometru
- 4) Měření deformací ovlivněných teplotou pomocí Wheatstoneova $\frac{1}{2}$ můstku na zatíženém nosníku, kdy od získané hodnoty byla odečtena hodnota signálu z tenzometru SG C na nezatíženém nosníku

7.1.1 Pozice tenzometru

Pozice nainstalovaného tenzometru je dána oblastí, ve které je třeba určit napětí. Zároveň je nutné, aby byla pozice přístupná a tenzometr bylo možné nainstalovat na požadované místo. Pozici je možné zvýraznit například lihovým fixem, který lze po měření jednoduše smýt. Kromě os určujících polohu je třeba zaznačit i orientaci tenzometru. V této práci je hlavním problémem měření při vyšších teplotách, proto byla pozice volena tak, aby se

tenzometr instaloval co nejnázve, na dostatečně velikou plochu a místo, kde bude teplota měřeného objektu co nejvíce homogenní.

7.1.2 Úprava povrchu

Povrch je nutno zbavit povrchových úprav, které by mohly měření ovlivnit. Proto se zbrousí vše, dokud na měřené součásti nezůstane pouze materiál se známými vlastnostmi, které se dále používají při výpočtech.

Pro rychlejší postup je možné povrch brousit pomocí různých náradí (například mini pneumatickou vrtačkou tzv. fortunkou) tak dlouho, dokud na měřeném místě nezůstane pouze měřený materiál, potom se povrch dále brousí jemným brusným papírem ve všech směrech. Povrch se brusným papírem brousí, dokud nemá kovový lesk. Pro urychlení tohoto procesu lze využít modelářskou oscilační brusku, která zaručuje, že bude povrch broušen ve všech směrech a rychleji, než kdyby byl povrch broušen rukou. Popsaný postup odpovídá úpravě kovových povrchů.

7.1.3 Orientace tenzometru

Orientace tenzometru je volena dle směru největší deformace. Na vybroušený povrch se načrtne osový kříž, který bude dále sloužit jako přesné umístění tenzometru. Pro načrtnutí se dá použít například vypsaná kuličková tužka. Po nanesení osového kříže je nutné zkontrolovat, zda je na vybroušeném povrchu dostatek místa pro nalepení tenzometru.



Obr. 22 Osový kříž na zbroušeném povrchu

7.1.4 Čištění povrchu

Po nanesení osového kříže je třeba vyčistit vybroušený povrch od všeho, co by mohlo způsobit nesprávné přilepení tenzometru k povrchu, ať už se jedná o mastnoty nebo prach, který na povrchu zůstal po broušení. Nejdříve je třeba zajistit, aby se v blízkosti ošetřované plochy nenacházel zdroj dalších nečistot. Povrch se během ošetřování nesmí dostat do styku s lidskou pokožkou, která by povrch mohla opět znečistit.

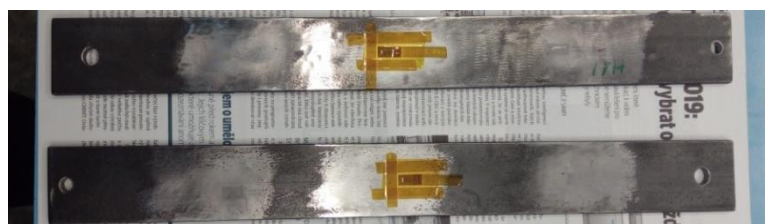
Povrch lze ošetřit různými prostředky dle konkrétních doporučení výrobců tenzometrů. V případě předkládané práce byl použit přípravek RMS1 od firmy HBM. Tento přípravek je směsí isopropanolu a acetonu. Přípravek se nanáší na ošetřovaný povrch a papírovým tampónem je jedním tahem smyt. Tento proces se opakuje s novými papírovými tampóny tak dlouho, dokud není tampón tak čistý, jako před jeho použitím. Povrch papírového tampónu, který bude ve styku s ošetřovaným povrchem, nesmí přijít před jeho použitím do styku s lidskou pokožkou nebo jiným zdrojem nečistot či mastnot.

Na takto připravený povrch je nutné tenzometr lepit v relativně krátké době. Pokud uběhla delší doba, je třeba se ujistit, že na ošetřeném povrchu není prach či nějaká jiná nečistota a očistit jej znovu.

7.1.5 Příprava tenzometru

Na první měření byl použit tenzometr společnosti HBM typu 6/120LY43. Na druhé měření byl použit tenzometr společnosti HBM typu 6/350LY41. Ty je nutno sterilně uchovávat, aby se na ně nepřilepil prach, mastnota nebo jiné nežádoucí prvky ovlivňující možnost pevně přilepit tenzometr na ošetřený povrch. To znamená, že se pro manipulaci s tenzometrem používá pinzeta. Pinzetu je před použitím nutno vyčistit. Používá se k tomu stejný přípravek, kterým se ošetřuje vybroušený povrch, v mém případě RMS1. Celý proces přípravy je nutno dělat na místě, které je čisté a v dostatečné vzdálenosti od případných zdrojů nečistot.

Tenzometr se pomocí pinzety vyjme z balení a na čistý povrch připraví tak, aby strana, která se bude lepit na povrch, byla směrem dolů. Pro manipulaci s tenzometrem se používá lepicí páska. Kousek lepicí pásky se ustříhne a pomocí pinzety se na ni přilepí tenzometr. Lepicí pásku je možné zmenšit, aby měla šířku jako tenzometr. Tenzometr se nalepí na konec lepicí pásky, aby s ním bylo možné na povrchu snadněji manipulovat. Pokud se nepodaří takto tenzometr nalepit na první pokus, lze ho odlepit a nalepit znovu. Lepicí páska se poté přilepí na povrch zkoumané součásti tak, aby byl tenzometr na osovém kříži. Kolem tenzometru je dále možné nalepit lepicí pásky, které se po instalaci tenzometru strhnou i s přebytečným lepidlem, aby zůstalo okolí tenzometru čisté.



Obr. 23 Připravené tenzometry před nainstalováním

7.1.6 Instalace tenzometru

V případě této práce se používá lepidlo společnosti HBM X280, což je lepidlo na bázi epoxidové pryskyřice. Mezi jeho hlavní výhody patří vysoká tepelná odolnost, aniž by bylo třeba ho tepelně vytvrzovat

Lepidlo X280 se dodává ve dvou oddělených složkách, které se před použitím smíchají například přejížděním balení o hranu stolu. Je třeba dávat pozor, aby se lepidlo příliš nezahřálo a neztvrdlo příliš brzy. Lepidlo je třeba uskladňovat při teplotě okolo 7 °C a i přesto je jeho doba použitelnosti omezená cca půl rokem.



Obr. 24 Lepidlo X280

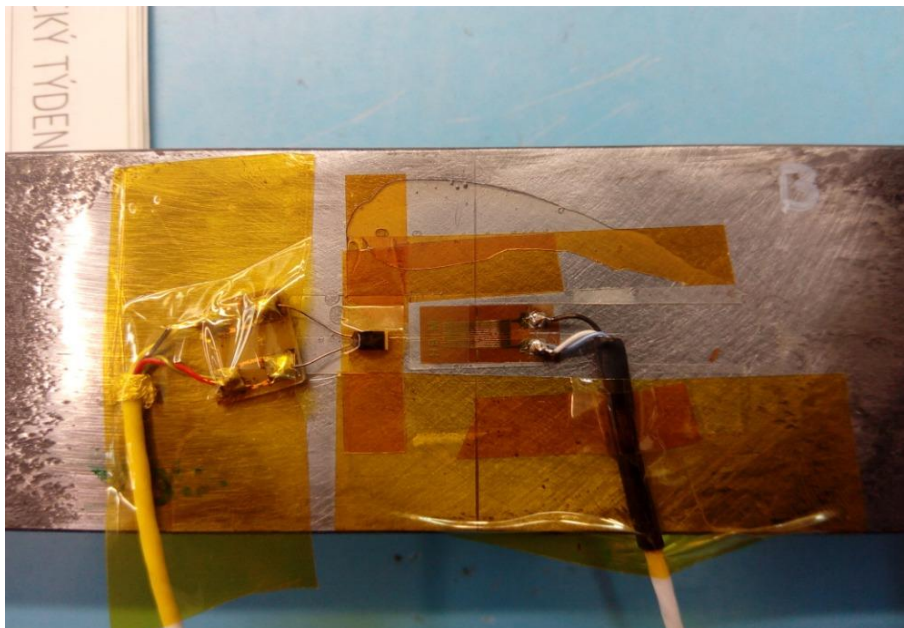
Smíchané lepidlo se pomocí roztíracího přípravku nanese pod tenzometr a potom se tenzometr přiklopí. Pomocí fluoropolymerové pásky se tenzometr od místa přilepení pásky k druhému kraji přitlačí, aby se lepidlo rovnoměrně rozprostřelo. Poté je podle návodu zvolena síla, která bude vyvíjena na tenzometr, aby lepidlo správně vytvrdlo. V daném případě byla síla rovna 360 N, proto byly zvoleny dvě 18 kg závaží.



Obr. 25 Přilepené tenzometry

7.1.7 Připojení k tenzometrické ústředně

Lepicí páska, která drží tenzometr se strhne a tenzometr zůstane přilepený na povrchu. Z pájecích bodů je třeba odstranit lepidlo, případně zoxidovanou vrstvu, aby se pájka snáze nanasla na pájecí body. Kabely s konektory byly připájeny na tenzometr a byly připojeny k tenzometrické ústředně HBM Spider 8 pomocí třídrátkového zapojení kompenzující odpor vedení. Dále bylo k hornímu tenzometru na zatíženém nosníku snímajícího tah přilepeno lepicí páskou teplotní čidlo Pt100, které snímalo teplotu vzorku.



Obr. 26 Tenzometr a teplotní čidlo

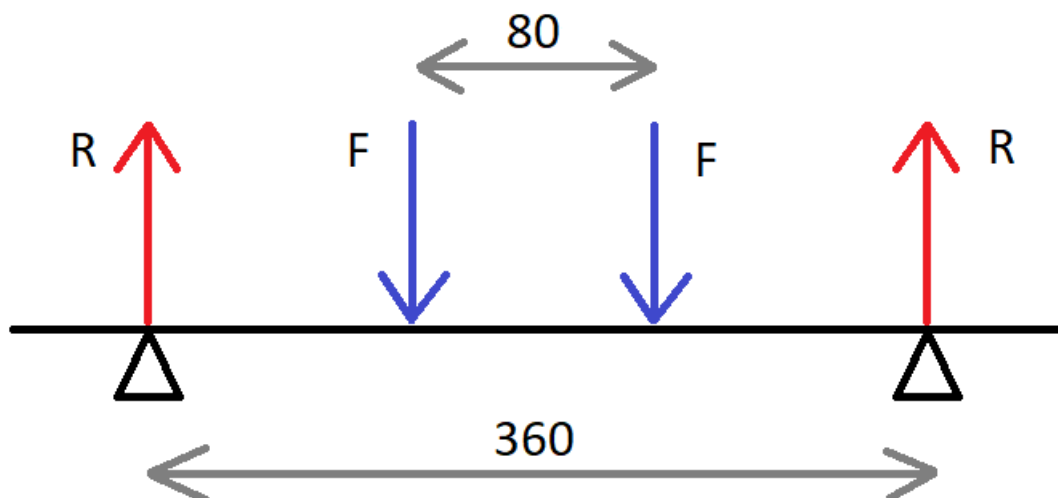


Obr. 28 Připojení k tenzometrické ústředně



Obr. 27 Nosníky připravené k měření umístěné v laboratorní peci

7.2 Teoretický výpočet



Obr. 29 Zatížený nosník

Nosník byl zatížen nástavcem na závaží s váhou 1 kg. Podpory nástavce byly vzdáleny 80 mm. Na nástavec byly umístěny dvě závaží o hmotnosti 18 kg. Celková váha byla 37 kg. Ta se rozdělila mezi dvě podpory nástavce:

$$F = \frac{37 \cdot 10}{2} = 185 \text{ N}$$

Reakce se bude rovnat F. Maximální moment bude mezi místy působení sil, kde bude konstantní a bude roven působení reakce nebo síly na ramenu mezi podporou a silou:

$$M = \frac{360-80}{2} \cdot 185 = 25\,900 \text{ Nm}$$

Napětí v nosníku se počítá pomocí modulu průřezu nosníku, který má obdélníkový průřez s výškou 5,4 mm a šířkou 40 mm:

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{25\,900}{\frac{1}{6} \cdot 40 \cdot 5,4^3} = 133 \text{ MPa}$$

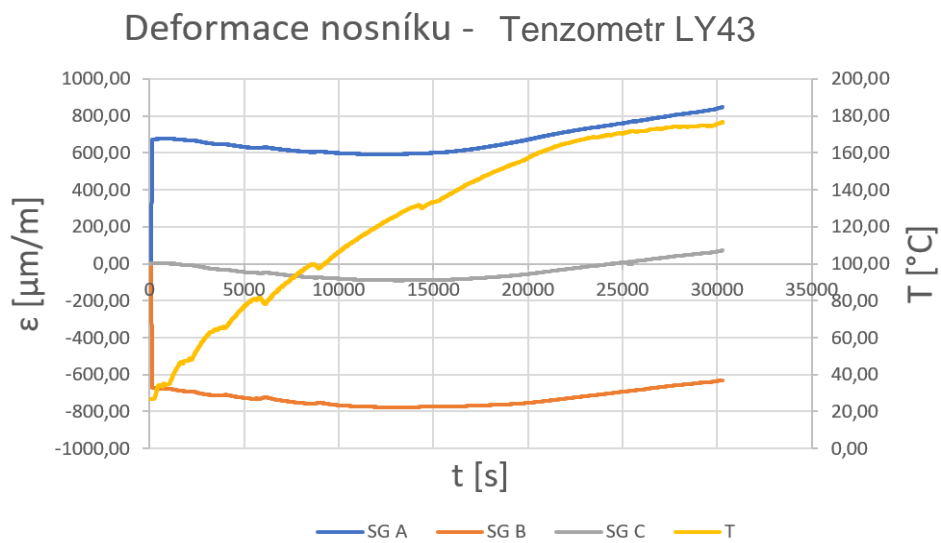
Výsledná deformace vyplývá z Hookova zákona. Velikost modulu pružnosti v tahu pro nosník z oceli je 210 000 MPa:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{133}{210000} = 633 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$$

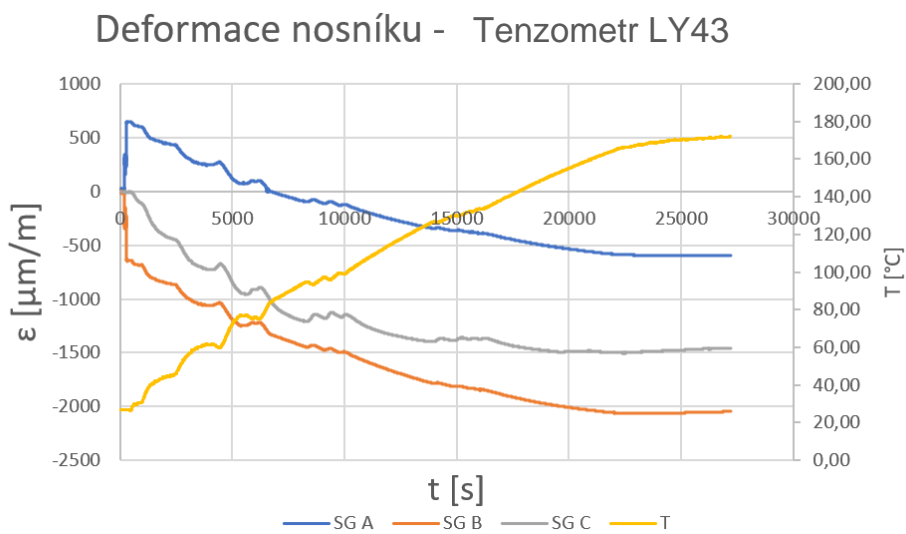
Tato deformace by se teoreticky měla rovnat deformaci na zatíženém nosníku při teplotě 20 °C.

7.3 Výsledky měření

Na první měření byly omylem použity tenzometry určené pro instalaci na hliníkové slitiny 6/120LY43 s teplotní roztažností $\alpha = 23 \cdot 10^{-6} K^{-1}$. To znamená, že teplotní součinitel tenzometru a materiálu měřeného nosníku byly rozdílné a teplotní samokompensace tenzometru při zapojení do $\frac{1}{4}$ můstku nebyla korektní. Při zapojení do $\frac{1}{2}$ můstku však nevhodná volba tenzometru význam nemá, jelikož se složky deformace způsobené teplotou odečtou. Pro porovnání bylo toto měření přidáno k druhému měření už se tenzometry určenými pro feritické oceli 6/350LY41 s teplotní roztažností $\alpha = 10,8 \cdot 10^{-6} K^{-1}$.



Obr. 31 Výsledek měření tenzometry LY41



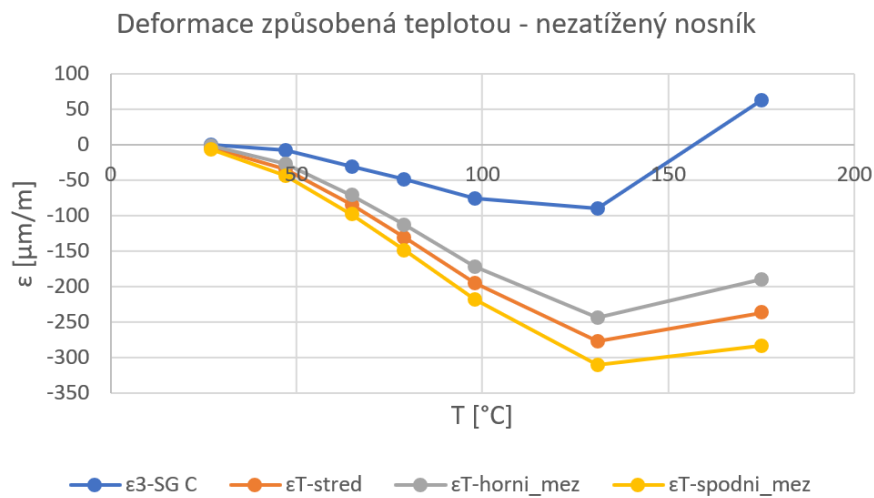
Obr. 30 Výsledek měření tenzometry LY43

1) Měření deformací vlivem teploty pomocí Wheatstoneova ¼ můstku na nezatíženém nosníku

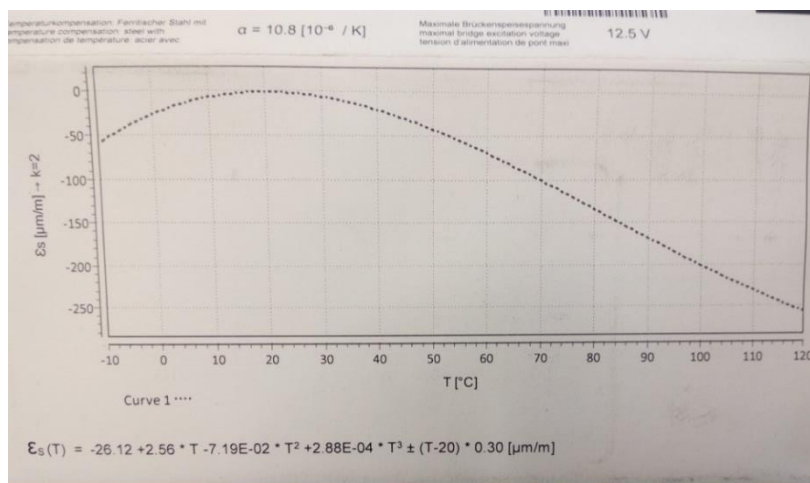
V této části je zkoumána teplotní samokompensace tenzometru na nezatíženém nosníku. Oba typy použitých tenzometrů se mimo jiné lišily pro jaké materiály je možné využít teplotní samokompensaci. V kapitole 4.3 je samokompensace rozepsána podrobněji. Od výsledné naměřené deformace $\alpha\Delta T$ se odečte deformace způsobená teplotou podle křivky uvedené výrobcem tenzometru. Výsledkem by tedy měla být nulová deformace.

T [°C]	$\epsilon_{3_SG\ C}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	ϵ_{T_stred} [$\mu\text{m}/\text{m}$]	$\epsilon_{T_horni_mez}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	$\epsilon_{T_spodni_mez}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]
27	0	-4	-2	-6
47	-7	-35	-27	-43
65	-31	-84	-71	-98
79	-49	-131	-113	-148
98	-75	-195	-171	-218
131	-89	-277	-244	-310
175	63	-237	-190	-283

Tab. 2 Deformace v určitých hodnotách teploty – tenzometr LY41



Obr. 32 Křivka deformace vlivem teploty určenou výrobcem - tenzometr LY41



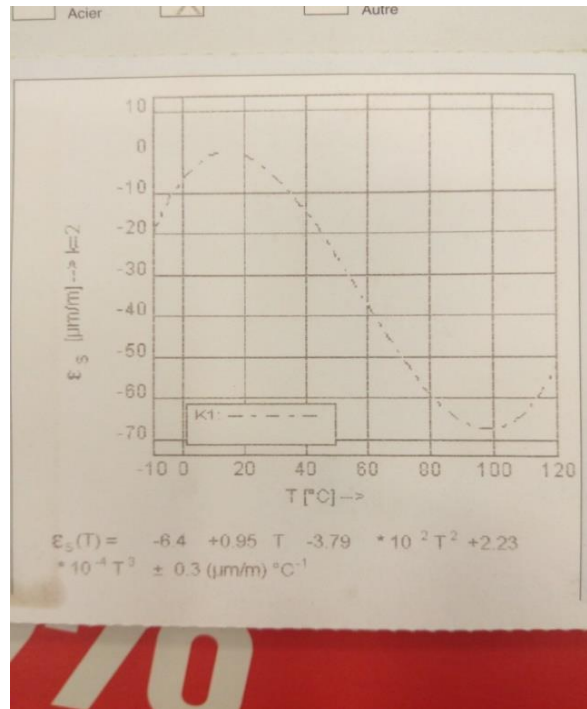
Obr. 33 Křivka deformace tenzometru způsobená teplotou - tenzometr LY41

Z Obr. 33 je vidět, že naměřená deformace se s deformací způsobenou teplotou podle výrobce neshoduje. Samokompensace by byla nepřesná a neměla by význam. Tato chyba je zřejmě způsobena nesprávným odhadem materiálu nosníku a tedy i jeho teplotním součinitelem roztažnosti, který je zřejmě vyšší než hodnota $10,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ předpokládaná pro daný tenzometr.

Při měření tenzometry LY43 samokompensace nebyla možná. V Tab. 3 je vidět, že odečtení deformace vlivem teploty podle rovnice udávané výrobcem je zbytečné, jelikož jsou teplotní součinitele tenzometru a měřeného materiálu jiné.

$\epsilon_{SG} \text{ C} [\mu\text{m/m}]$	$T [^{\circ}\text{C}]$	$\epsilon_{T_SG} \text{ C} [\mu\text{m/m}]$	$\epsilon_{SG} - \epsilon_T [\mu\text{m/m}]$
-7	27	-4	-3
-366	42	-17	-349
-720	61	-39	-681
-907	77	-56	-851
-1130	97	-67	-1063
-1373	135	-20	-1353
-1458	172	170	-1628

Tab. 3 Deformace v určitých hodnotách teploty - tenzometr LY43



Obr. 34 Křivka deformace tenzometru způsobená teplotou – tenzometr LY43

2) Měření deformací vlivem teploty pomocí Wheatstoneova ½ můstku na zatíženém nosníku

Při zapojení do Wheatstoneova ½ můstku je možné kompenzovat teplotu. Odečtením $(\epsilon_1 + \alpha \Delta T) - (\epsilon_2 + \alpha \Delta T) = \epsilon_1 - \epsilon_2$, kde ϵ_1 je tenzometr snímající tah (SG A) a ϵ_2 je tenzometr snímající tlak (SG B), se od sebe prodloužení vlivem teploty odečte a zůstane pouze dvojnásobná hodnota deformace tenzometru, která se potom vydělí dvěma. Celková deformace s rostoucí teplotou roste, rozdíl $\epsilon_1 - \epsilon_2$ by však měl být v ideálním případě konstantní. V tabulce jsou uvedeny hodnoty deformace v závislosti na teplotě nosníku. Vzorec $\frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2}$ udává hodnotu deformace způsobenou pouze zatížením v místě tenzometru.

$\epsilon_{1_SG A}$ [$\mu\text{m/m}$]	$\epsilon_{2_SG B}$ [$\mu\text{m/m}$]	T [°C]	$\epsilon_1 - \epsilon_2$ [$\mu\text{m/m}$]	$(\epsilon_1 - \epsilon_2)/2$ [$\mu\text{m/m}$]	chyba δ [%]
674	-673	27	1347	673,5	0,0
669	-690	47	1359	679,5	0,9
646	-710	65	1356	678	0,7
629	-725	79	1354	677	0,5
607	-753	98	1360	680	1,0
597	-774	131	1371	685,5	1,8
836	-637	175	1473	736,5	9,4

Tab. 4 Deformace v určitých hodnotách teploty - tenzometr LY41

$\epsilon_{1_SG\ A}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	$\epsilon_{2_SG\ B}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	T [$^{\circ}\text{C}$]	$\epsilon_1 - \epsilon_2$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	$(\epsilon_1 - \epsilon_2)/2$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	chyba δ [%]
647	-640	27	1287	643,5	0,0
476	-819	42	1295	647,5	0,6
257	-1051	61	1308	654	1,6
71	-1248	77	1319	659,5	2,5
-109	-1472	97	1363	681,5	5,9
-397	-1855	135	1458	729	13,3
-597	-2047	172	1450	725	12,7

Tab. 5 Deformace v určitých hodnotách teploty - tenzometr LY43

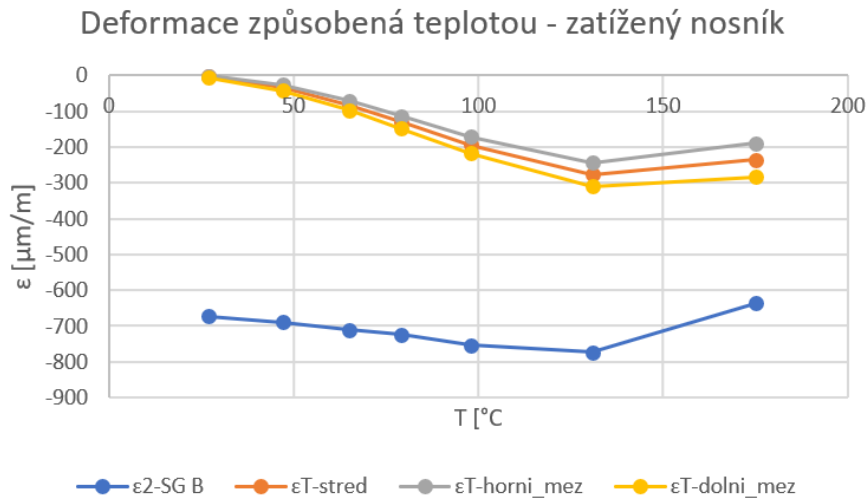
Z výsledku je patrné, že při zapojení do půlmůstku nezáleží na použitých tenzometrech. Se vzrůstající teplotou, roste i nepřesnost měření. Chyba může být způsobena například nerovnoměrným prohřátím nosníku. Při měření je nutno s touto chybou počítat.

3) Měření deformací vlivem teploty pomocí Wheatstoneova $\frac{1}{4}$ můstku na zatíženém nosníku

V této části je stejně jako ve druhé zkoumána teplotní samokompensace tenzometru. V tomto případě se jedná o tenzometr na zatíženém nosníku. V počáteční fázi byla změřena referenční hodnota deformace, která by měla zůstat konstantní, při správném použití teplotní samokompensace, po celou dobu měření. Ta s rostoucí teplotou rostla podle vztahu $\alpha\Delta T$. Od této hodnoty se odečetla hodnota deformace způsobená teplotou podle rovnice udávané výrobcem. Výsledek by se měl tedy blížit referenční hodnotě.

T [$^{\circ}\text{C}$]	$\epsilon_{3_SG\ C}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	ϵ_{T_stred} [$\mu\text{m}/\text{m}$]	$\epsilon_{T_horni_mez}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	$\epsilon_{T_spodni_mez}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]
27	-673	-4	-2	-6
47	-690	-35	-27	-43
65	-710	-84	-71	-98
79	-725	-131	-113	-148
98	-753	-195	-171	-218
131	-774	-277	-244	-310
175	-637	-237	-190	-283

Tab. 6 Deformace v určitých hodnotách teploty - tenzometr LY41



Stejně jako u nezatíženého nosníku rovnici danou výrobcem není možné použít u našeho měření, jelikož by měření bylo velice nepřesné. Důvodem může být stejně jako v předchozím případě nesprávné určení teplotního součinitele roztažnosti nosníku.

Při použití tenzometrů LY43 teplotní samokompensace není účinná, jelikož jsou teplotní součinitelé tenzometru LY43 a materiálu nosníku jiné. V Tab. 7 je vidět velikost chyby.

$\epsilon_{3_SG\ C}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	T [°C]	$\epsilon_{T_SG\ C}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	$\epsilon_{3-\epsilon T}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]
-7	27	-4	-3
-366	42	-17	-349
-720	61	-39	-681
-907	77	-56	-851
-1130	97	-67	-1063
-1373	135	-20	-1353
-1458	172	170	-1628

Tab. 7 Deformace v určitých hodnotách teploty - tenzometr LY43

4) Měření deformací vlivem teploty pomocí Wheatstoneova ½ můstku na zatíženém nosníku

Stejně jako v předchozím případě bude v této části experimentu měřena deformace na zatíženém nosníku. V tomto případě bude využit tenzometr SG C, který během měření zůstal nezatížený a měřil pouze deformaci způsobenou teplotou. Tato deformace se odečte od naměřené hodnoty tenzometrem SG B snímajícím deformaci na zatíženém nosníku a získá se deformace způsobená pouze zatížením.

ϵ_2 _SG B [$\mu\text{m}/\text{m}$]	ϵ_3 _SG C [$\mu\text{m}/\text{m}$]	T [$^{\circ}\text{C}$]	$\epsilon_2 - \epsilon_3$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	chyba δ [%]
-673	0	27	-673	0,0
-690	-7	47	-683	1,5
-710	-31	65	-679	0,9
-725	-49	79	-676	0,4
-753	-75	98	-678	0,7
-774	-89	131	-685	1,8
-637	63	175	-700	4,0

Tab. 9 Deformace v určitých hodnotách teploty - tenzometry LY41

ϵ_2 _SG B [$\mu\text{m}/\text{m}$]	ϵ_3 _SG C [$\mu\text{m}/\text{m}$]	T [$^{\circ}\text{C}$]	$\epsilon_2 - \epsilon_3$ [$\mu\text{m}/\text{m}$]	chyba δ [%]
-640	-7	27	-633	0,0
-819	-366	42	-453	28,4
-1051	-720	61	-331	47,7
-1248	-907	77	-341	46,1
-1472	-1130	97	-342	46,0
-1855	-1373	135	-482	23,9
-2047	-1458	172	-589	7,0

Tab. 8 Deformace v určitých hodnotách teploty - tenzometry LY43

U tenzometrů LY41 byla teplotní kompenzace přesná. U tenzometrů LY43 by teplotní kompenzace měla být přesná, jelikož zde stejně jako u půlmůstkového zapojení nezáleží na součiniteli roztažnosti. Chyba se však v některých bodech blížila až k 50%. Důvodem mohl být rozdíl teplot obou nosníků.

8 Závěr

Měření tenzometry za vyšších teplot je oblast měření, při které vzniká několik problémů. Existují však mnohé způsoby, jak tyto problémy kompenzovat. Pro pochopení problematiky měření za vyšších teplot je nutné nejdříve znát základní principy a funkce tenzometru. Po provedení rešerše bylo možné brát v potaz problémy související s měřením deformací za vyšších teplot, jako jsou deformace způsobené teplotou a ne zatížením nebo nedostatečná odolnost některých lepidel, krytí a kabelů. Některé z problému lze vyřešit zakoupením speciálních produktů, které výrobci dodávají. Z tohoto důvodu byly na stránkách výrobců nalezeny některé výrobky (tenzometry, lepidla, kabely) a z nich vybrány ty, které byly do měření za vyšších teplot vhodné. Deformaci způsobenou teplotou je možné kompenzovat výběrem správných tenzometrů vzhledem k materiálu měřené součásti. Díky správnému výběru tenzometru je možná samokompensace tenzometru, umožňující podle křivky deformace způsobené teplotou danou výrobcem, kompenzovat samotné deformace vlivem tepla na tenzometru. Jiný ze způsobů kompenzace deformace způsobené teplotou je správná volba zapojení do Wheatstoneova můstku. U některých zapojení nezáleží ani na výběru správného tenzometru s ohledem na teplotní roztažnost.

V praktické části byly podle rešerše vybrány výrobky, které vyhovují potřebám při měření za vyšších teplot. Pomocí nich byly změřeny dva nosníky. Jeden z nich byl zatížený silou a druhý zůstal nezatížený. Na zatížený nosník byly přilepeny dva tenzometry, které se připojili do Wheatstoneova čtvrtmůstku a měřila se deformace při postupném ohřívání laboratorní pece, kde byl nosník uložen. Výpočetně bylo provedeno vyhodnocení odpovídajícího signálu při půlmůstkovém zapojení a díky půlmůstkovému zapojení byla deformace vlivem teploty téměř vykompenzována. Na nezatížený nosník byl přilepen jeden tenzometr, který se připojil do wheatstoneova čtvrtmůstku a společně se zatíženým nosníkem byly vloženy do ohřívající se laboratorní pece. Tenzometrem na tomto nosníku a tenzometrem snímajícím tlak na zatíženém nosníku byla měřena deformace, která měla být samokompensací tenzometru vyrušena. Toto měření však bylo nepřesné. Pravděpodobným důvodem byla rozdílná teplotní roztažnost materiálů zkoumaných součástí a tabelovanou teplotní roztažností, pro které byly použité tenzometry určeny.

9 Citace

- [1] HOFFMANN, Karl. Applying the Wheatstone Bridge Circuit. Experimental Stress Analysis [online]. 2013 [cit. 2014-04-27]. Dostupné z: www.hbm.com.pl/pdf/w1569.pdf
- [2] Fernández, M. S.-B. (2019). Metrological considerations in the measurement of contact stress parameters using photoelasticity. Optics and Lasers in Engineering, 117, 29–39. doi:10.1016/j.optlaseng.2019.01.009
- [3] Odporové tenzometry - princip, provedení, použití, historie | Automatizace.HW.cz. Automatizace.HW.cz | Elektronika v automatizaci [online]. [cit. 03.03.2019]. Dostupné z: WWW
<https://automatizace.hw.cz/foliove-odporove-tenzometry-princip-provedeni-pouziti-historie.html>
- [4] Engineers 4 world: Strain Gauge - Part 2. Engineers 4 world [online].
Dostupné z: WWW
<http://engineers4world.blogspot.com/2009/10/strain-gauge-part-2.html>
- [5] Obrázek(9780879): Mikrometr, posuvné Měřítko, mikrotužky a Kompas. | Autor: Ademdemir. Doporučený Autor: Vling | Téma: Krása v detailech [online]. Copyright © [cit. 16.03.2019]. Dostupné z: WWW
http://www.stockphotos.cz/image.php?img_id=9780879&img_type=1
- [6] Bruck, H.A., McNeill, S.R., Sutton, M.A. et al. Experimental Mechanics (1989) 29: 261. <https://doi.org/10.1007/BF02321405>
- [7] Digital Image Correlation | Veryst Engineering. Mechanical Engineering and Materials Consulting | Veryst Engineering [online]. Copyright © [cit. 16.03.2019]. Dostupné z: WWW
<https://www.veryst.com/what-we-offer/mechanical-testing-modeling-validation/Testing-Library/digital-image-correlation>

- [8] Polovodičové tenzometry - princip, provedení, použití, historie | Automatizace.HW.cz. Automatizace.HW.cz | Elektronika v automatizaci [online]. Copyright © 1997 [cit. 17.03.2019]. Dostupné z: WWW
<https://automatizace.hw.cz/clanek/2006111601>
- [9] X60 Cold Curing Glue for Strain Gauge Installations | HBM. Test & Measurement | Load Cell | Transducer | Strain Gage | HBM [online]. Copyright © HBM [cit. 14.05.2019]. Dostupné z:
<https://www.hbm.com/en/2961/x60-2-component-fast-curing-adhesive/>
- [10] reading. Wiley-VCH eBooks [online]. Copyright © 2017 Wilhelm Ernst [cit. 11.06.2019]. Dostupné z:<https://wiley-vch.ebookshelf.de/products/reading-epub/productid/10179532/title/Technology%2Band%2BPractical%2BUse%2Bof%2BStrain%2BGages.html?lang=d>

10 Seznam použitých zkratek

Cu	měď
Ni.....	nikl
Cr.....	chrom
Fe	železo
Al.....	hliník
Pt.....	platina
W.....	wolfram
R	elektrický odpor
ε	deformace
ν	poissonovo číslo
Q	rezistivita
P	výkon
V	napájecí napětí
R	odpor
α	teplotní součinitel
T	teplota
q	příčná citlivost
HBM	Hottinger Baldwin Messtechnik
PVC.....	polyvinylchlorid