



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TENZOMETRICKÁ MĚŘENÍ

TENSOMETRIC MEASURING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

VÍTĚZSLAV TROJAN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. KAMIL PODANÝ, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Vítězslav Trojan

který/která studuje v bakalářském studijním programu

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Tenzometrická měření

v anglickém jazyce:

Tensometric measuring

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o zpracování aktuální literární studie možností zjišťování aktuálních hodnot napětí a deformací během technologických procesů. Rešerše bude zaměřena zejména na tenzometrická měření a bude obsahovat základní rozdělení a principy.

Cíle bakalářské práce:

Aktuální literární studie se zaměřením na tenzometrická měření se zhodnocením jejich vhodnosti či nevhodnosti pro strojírenskou praxi a s ukázkami použití.

Seznam odborné literatury:

1. DRASTÍK, F. a J. ELFMARK. Plastomery a tvařitelnost kovů. Praha: SNTL, 1977. 392 s. DT 539.214.07.
2. ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. Strojírenská metrologie. Skriptum FSI VUT v Brně, 4. přeprac. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2005. 176 s. ISBN 80-214-3070-2.
3. ZEHNULA, Karel. Snímače neelektrických veličin. 2. vyd. Praha: SNTL, 1983. 371 s.
4. JANÍČEK, P. Technický experiment, skriptum VUT FS, Ediční středisko VUT Brno 1988
5. JENČÍK, Josef a Jaromír VOLF. Technická měření. 1. vyd. Praha: ČVUT, 2000. 212 s. ISBN 80-01-02138-6.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Kamil Podaný, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 21.11.2011

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

TROJAN Vítězslav: Tenzometrická měření

Práce se zabývá tenzometrickým měřením. Věnuje se základním principům tenzometrického měření a problémy, které mohou při měření nastat. Jsou rozebrány druhy tenzometrů, způsoby jejich aplikace a odvozeny základní úlohy pro běžné způsoby namáhání. Je zhodnocena vhodnost využití tenzometrických snímačů ve strojírenství.

Klíčová slova: tenzometr, povrchová deformace, elektrický odpor, polovodič

ABSTRACT

TROJAN Vítězslav: Tensometric measuring

This work is engaged in tensometric measuring. This work reports basic principles of tensometric measuring and problems connected with measurements. Different types of tensometers and their applications are described and elemental exercise for common kinds of strain is inferred. Suitability of tensometric sensor usage in mechanical engineering is discussed.

Key words: tensometer, surface deformation, electric resistance, semiconductor

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TROJAN, Vítězslav. *Tenzometrická měření*. Brno, 2012. 30 s, CD. FSI VUT v Brně, Ústav strojírenské technologie, odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V dne 24.5.2012

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Kamilu Podanému, Ph.D za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat rodičům za veškerou finanční a morální podporu během studia.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	9
1 ZÁKLADNÍ PRINCIP MĚŘENÍ	10
2 PARAZITNÍ VLIVY	12
2.1 Teplota	13
3 ROZDĚLENÍ TENZOMETRŮ	15
3.1 Kovové tenzometry	15
3.2 Polovodičové tenzometry	16
4 INSTALACE NA MĚŘENÝ OBJEKT	19
4.1 Lepení	20
4.2 Difuzní metody	21
4.2.1 Naprašování	22
4.2.2 Napařování	22
4.3 Přivařování	22
5 ZAPOJENÍ A PRINCIP MĚŘENÍ	23
5.1 Zapojení pro tah-tlak	25
5.2 Zapojení pro ohyb	27
5.3 Zapojení pro krut	28
6 ZÁVĚR	30

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam obrázků

ÚVOD

Při výrobě jakýchkoliv součástí je třeba sledovat jejich kvalitu. Proto je nutná jejich patřičná kontrola, při které je snímáno mnoho údajů. Mimo jiné k nim patří i měření hodnot napětí a deformace, kterých je v dnešní době hojně využíváno a jsou již v podstatě nepostradatelné pro mnoho oborů lidské činnosti. Ať už se jedná například o konstrukci vázicích systémů a siloměrů nebo o analyzování namáhání letadel či mostů.

Je nutné si uvědomit, že napětí nelze stanovit přímo. Např. při tahové zkoušce je změřena nejdříve síla, která je následně přepočítána na napětí. U reálné součásti je měreno přetvoření, které je pak při znalosti materiálových charakteristik přepočítáno na napětí.

Lze si vybrat z širokého spektra možností měření napětí a deformace (např. pomocí tenzometrů, metoda křehkých laků, termoemisní metoda apod.), z něhož je nutné si určit právě tu variantu, která bude pro požadovaný objekt nejefektivnější.

Nejrozšířenější a nejpoužívanější metodou snímání napětí a deformací je tenzometrické měření, které bude v práci podrobněji popsáno a rozebráno.



Obr. 1 Příklady využití tenzometrů [8, 11, 14, 18, 26]

1 ZÁKLADNÍ PRINCIP MĚŘENÍ [3]

Odporové tenzometry pracují na principu, že deformace elektrického vodiče mění jeho elektrický odpor. Vyvolaná změna odporu je snímána a následně je podle ní vyhodnocena deformace měřeného objektu.

Při natahování či smršťování vodiče v elastické oblasti (ε_{el}) deformační křivky (obr. 2) platí Hookův zákon pružné deformace:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1.1)$$

σ	mechanické napětí [Pa]
E	Youngův modul pružnosti [Pa]
ε	relativní prodloužení [$\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$]

Pro relativní prodloužení vodiče (obr. 3) platí:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1.2)$$

Δl	prodloužení vodiče [mm]
l_0	původní délka vodiče [m]

Pro vodič (obr. 4) o průřezu S , délce l s měrným odporem ρ platí, že jeho odpor R je:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (1.3)$$

Při zatížení vodiče tahem (tlakem) se zvětší (zmenší) jeho délka l a zmenší (zvětší) se plocha průřezu S , tudíž naroste (poklesne) hodnota odporu R .

Změna odporu je pomocí parciální derivace vyjádřena jako:

$$dR = d\rho \cdot \frac{l_0}{S} + dl \cdot \frac{\rho}{S} - \frac{dS}{S^2} \cdot \rho \cdot l \quad (1.4)$$

Pro poměrnou změnu odporu dR/R pak dosazením vztahů (1.1) a (1.4) platí:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S} \quad (1.5)$$

Následně je pomocí Poissonova čísla μ vyjádřeno:

$$\frac{dS}{S} = -2\mu \cdot \frac{dl}{l} \quad (1.6)$$

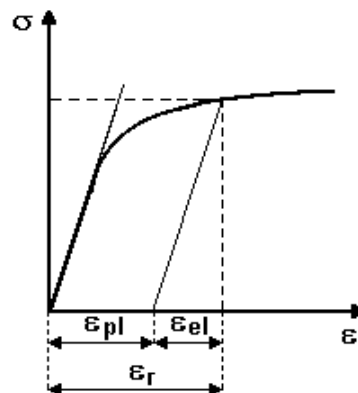
Pro Poissonovo číslo platí:

$$\mu = \frac{\psi}{\varepsilon} \quad (1.7)$$

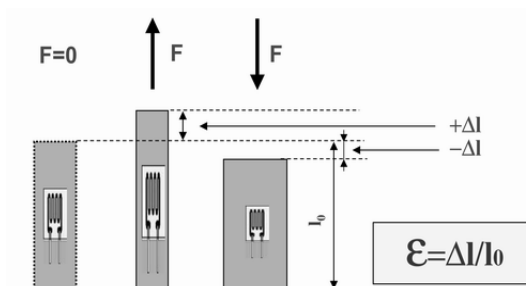
ψ	poměrná deformace v příčném směru [$\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$]
ε	poměrná deformace v podélném směru [$\text{mm} \cdot \text{m}^{-1}$]

Po dosazení (1.6) do (1.5) a úpravě je vyjádřen vztah pro relativní změnu odporu jako:

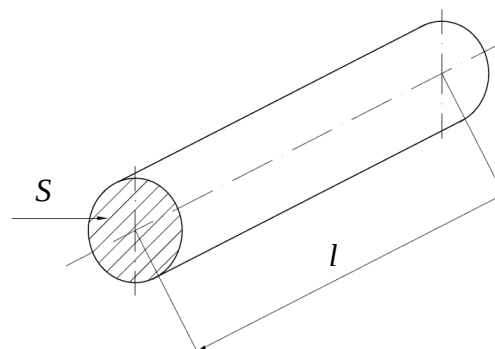
$$\frac{dR}{R} = \varepsilon \cdot \left(\frac{d\rho}{\rho} \cdot \frac{l}{\varepsilon} + 1 + 2 \cdot \mu \right) \quad (1.8)$$



Obr. 2 Deformační křivka [5]



Obr. 3 Deformace při zatížení [23]



Obr. 4 Schéma vodiče

V další úpravě rovnice (1.8) lze výraz v závorce nahradit součinitelem deformační citlivosti k (k-faktorem), protože u pružného přetvoření je to konstanta závislá na změně délky. Výsledný vztah pak je:

$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon \cdot k \quad (1.9)$$

K-faktor je závislý na použitém materiálu, který určuje jeho velikost a jeho hodnota je v řádu jednotek až stovek. Obecně lze říci, že čím vyšší je hodnota k-faktoru, tím lepší je citlivost snímače.

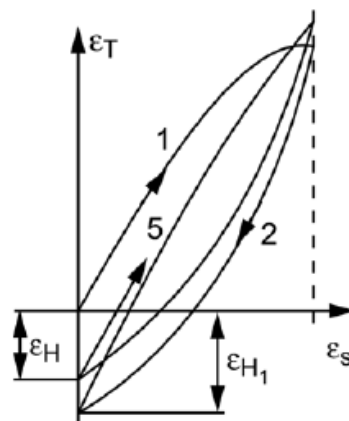
Z rovnice (1.9) vyplývá, že poměrná deformace vodiče je přímo úměrná změně jeho odporu. Závislost mezi neelektrickou a elektrickou veličinou je lineární. Je-li měřena elastická (pružná) deformace odporovým tenzometrem, je poměrná změna odporu velmi malá, tudíž je nutné její zesílení, ke kterému se např. využívá zapojení do mostu (viz kapitola 5).

2 PARAZITNÍ VLIVY [3, 12, 27]

Měření se stoprocentní přesností je prakticky nemožné, protože se vždy objeví nějaké parazitní vlivy, jež negativně ovlivňují přesnost měření a způsobují jeho určitou chybu, kterou je třeba minimalizovat. Měření je ovlivněno zejména teplotou, vlhkostí, hystezí, příčnou citlivostí, nelineární závislostí změny odporu na přetvoření, creepem, vlnovou délkou signálu a únavovým porušením.

Vlhkost může iniciovat chyby při měření, protože vlhkost v okolí tenzometru proniká do podložky a případně i lepidla, čímž dojde ke změně jejich fyzikálních vlastností a v extrémních případech může dojít k odlepování snímače nebo korozi mřížky. Proti vlhkosti je proto třeba využít vhodné ochranné prostředky (např. vosk, lak, čistou vazelínu apod.) a dodržet výrobcem dané pokyny pro správnou aplikaci těchto látek.

Je-li součást zatížena a následně odlehčena, je pozorována závislost mezi deformací součásti ε_s a deformací naměřenou tenzometrem ε_T . Po odlehčení součásti nenastane návrat do počátečního nulového stavu, ale bude ukazovat nepatrnou deformaci ε_{H1} tzv. hysterezi (obr. 5). S rostoucím počtem zátěžových cyklů se hystereze snižuje, až se nakonec ustálí na konstantní hodnotě ε_H , proto, pokud je to možné, je dobré zkoušený objekt před začátkem měření několikrát zatížit. Velikost hystereze nezávisí jen na vlastnostech tenzometru, ale také např. na kvalitě podložky nebo upevnění na měřeném objektu. Její obvyklá hodnota je do 0,5% měřené deformace.



Obr. 5 Hystereze [23]

Správnou funkci snímače může ovlivnit jeho příčná citlivost, tedy že dochází k deformaci také ve směru kolmém k ose tenzometru. Součinitel příčné citlivosti q je definován jako:

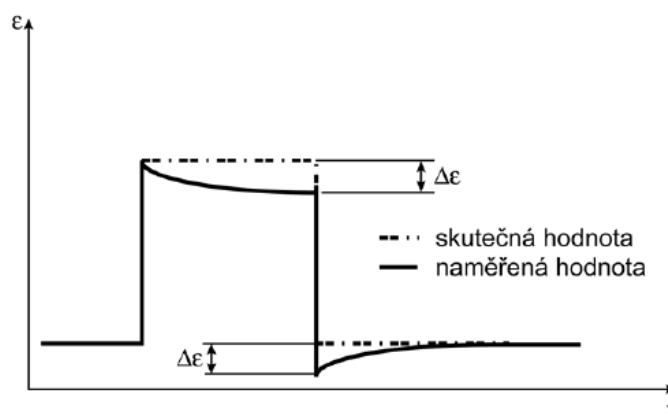
$$q = \frac{k_t}{k_l} \quad (2.3)$$

k_t deformační součinitel v příčném směru
 k_l deformační součinitel ve směru osy

Hodnota součinitele citlivosti musí být do 0,02, proto se konstruují snímače s co nejmenší šířkou. Lze ji také snížit zvětšením průřezu mřížky v příčném směru zejména na koncích jednotlivých smyček, čímž dojde ke koncentraci příčného přetvoření na malém prostoru a není jím ovlivněn celý senzor.

Nepřesnost při měření nastává také díky tomu, že závislost poměrné změny odporu na deformaci není zcela lineární. Maximální odchylka od linearitu je ale velice malá, hodnota relativní chyby bývá menší než 0,1%.

Je-li součást dlouhodoběji staticky zatížena konstantní silou, začne se u ní projevovat tzv. creep (relaxace materiálu), protože vlivem dlouhodobého zatížení dojde ke změně vlastností součástí tenzometru, což způsobí prokluz mezi měřicí mřížkou a měřeným tělesem, takže není snímána skutečná deformace povrchu. Po určitém čase dochází k poklesu

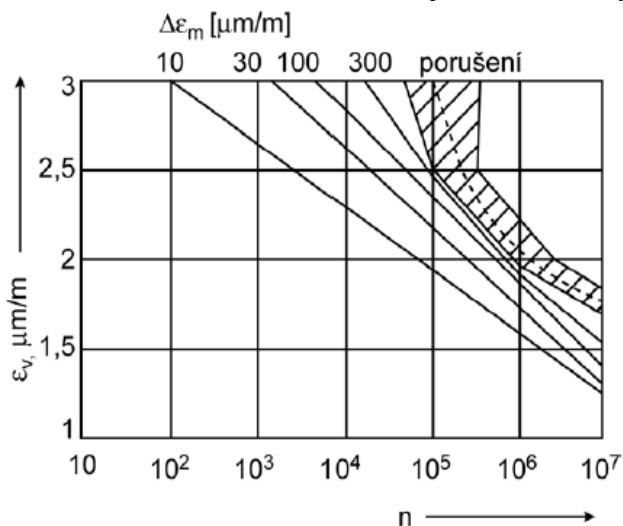


Obr. 6 Vliv creepu na měření [23]

měřené deformace, čímž dojde k odchylce od skutečné hodnoty deformace (obr. 6), Tento efekt působí vždy v opačném smyslu než je deformace součásti a za určitý čas po odlehčení vymizí. Lze ho kompenzovat využitím elastického efektu s přesně opačným průběhem jako má creep, což je ale v praxi těžko realizovatelné, nebo použitím snímačů, které jsou zkonstruovány tak, aby u nich creep nevznikal.

Při měření rychlých dynamických dějů nebo rázů může nastat situace, že přetvoření součásti má tak krátkou vlnovou délku, že tenzometr nedokáže rozeznat jednotlivé vlny a udává pouze jejich zdánlivou střední hodnotu. Aby k tomu nedocházelo, je třeba, aby poměr aktivní délky tenzometru a vlnové délky měřené podélné vlny byl co nejmenší. Toho lze dosáhnout minimalizací aktivní délky tenzometru. Pro měření rázů se proto používají tenzometry, které mají měřicí mřížku maximálně 3-6 mm dlouhou.

Je-li tenzometr cyklicky zatěžován, projeví se u něj, tak jako u všech součástí, únavové porušení. Tento problém se projevuje zejména v měřicí mřížce, protože její tuhost je řádově menší než je tuhost podložky. Únava zapříčiní vznik mikroskopických trhlin na hranicích zrn



Obr. 7 Graf únavy cyklickým zatěžováním [23]

v materiálu mřížky, což způsobí špatnou indikaci amplitudy zatěžující síly důsledkem posuvu nulového bodu. Výrobci uvádějí graf závislosti posuvu nulového bodu $\Delta\varepsilon_v$ vzhledem k amplitudě přetvoření střídavého cyklu $\Delta\varepsilon_m$ na počtu cyklů n (obr. 7). Experimentálně bylo zjištěno, že snímače s delší mřížkou lépe odolávají vlivům únavového porušení.

2.1 Teplota [3, 12, 27]

Změna teploty v průběhu měření zapříčiní teplotní deformaci materiálu mřížky i měřené součásti, také teplotní změnu odporu mřížky, kterou lze vyjádřit vztahem:

$$\Delta R_T = R_0 \cdot \alpha_R \cdot \Delta T \quad (2.2)$$

R_0 počáteční hodnota odporu před změnou teploty [Ω]

α_R teplotní součinitel elektrického odporu [K^{-1}]

ΔT změna teploty [K]

Celkovou teplotní změnu odporu tenzometru lze vyjádřit jako:

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_T = [\alpha_R + k \cdot (\alpha_S - \alpha_M)] \cdot \Delta T \quad (2.3)$$

α_R teplotní součinitel elektrického odporu materiálu mřížky [K^{-1}]

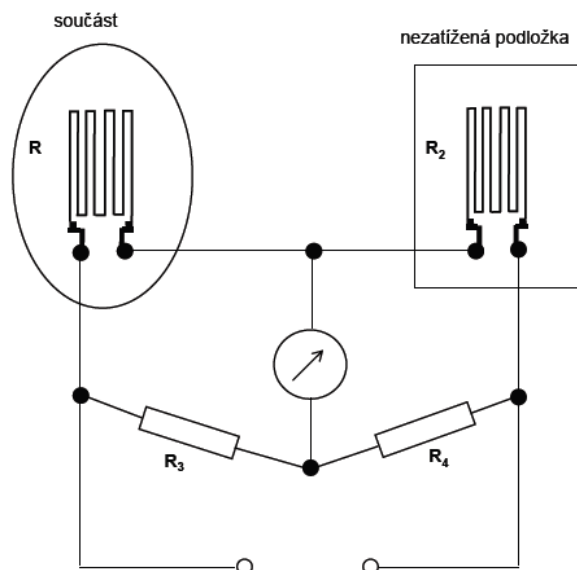
α_S teplotní součinitel délkové roztažnosti materiálu měřené součásti [K^{-1}]

α_M teplotní součinitel délkové roztažnosti materiálu mřížky [K^{-1}]

k součinitel deformační citlivosti tenzometru

Je potom těžké určit, zda je změna odporu snímače způsobena jeho mechanickou deformací nebo pouhou změnou teploty, protože ve většině případů může i malý výkyv teploty vyvolat změnu odporu stejné velikosti, jakou způsobí měřená deformace. Vliv teploty lze eliminovat zapojením kompenzačního tenzometru, autokompensací, zapojením do celého mostu (viz kapitola 5) nebo korekcí naměřených výsledků.

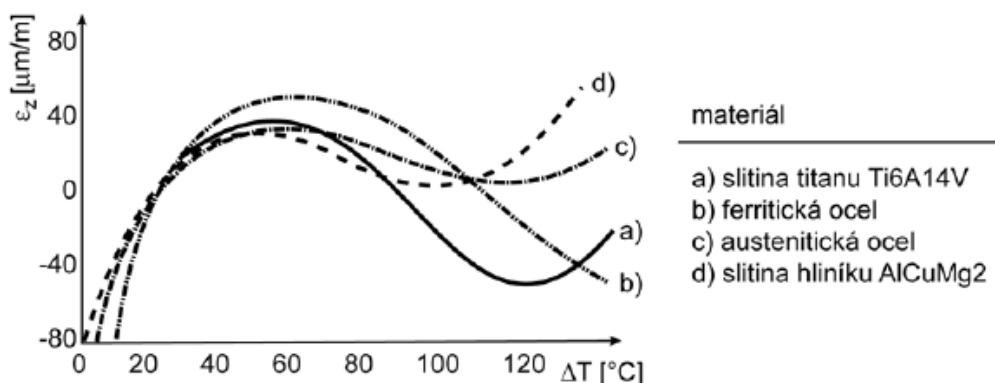
Kompenzační tenzometr lze využít, pouze v případě, že bude dosaženo ustálených teplotních poměrů. Jedná se o tenzometr totožný s měřicím, ale v můstku (viz kapitola 5) je zapojen v druhém rameni (obr. 8). Působí na něj stejné teplotní vlivy jako na měřicí, ale není mechanicky deformován, proto zaznamenává pouze změny odporu vyvolané změnou teploty. Díky tomu lze následně vyhodnotit měření. Dalším limitujícím faktorem pro použití je velikost měřeného objektu, protože u malých součástí není dostatek místa pro jeho instalaci.



Obr. 8 Schéma zapojení kompenzačního tenzometru [1]

Autokompenzační tenzometr mívá vinutí vyrobené z více částí, přičemž každá má jinou délku a je vyrobena z jiného kovu. Jinou možností je, že se k normálnímu vinutí snímače připojí do série další smyčka, která bude mít opačnou teplotní charakteristiku, čímž je v určitém teplotním intervalu dosaženo eliminace vlivu teploty. Autokompenzační tenzometry jsou však složitější a tím i dražší než obyčejné. Jejich použitelnost je limitována povrchem měřené součásti, protože při aplikaci na zakřivených površích dochází k nepřesnostem způsobených nerovnoměrným přenosem tepla na snímač.

Pokud nelze využít kompenzačního ani autokompenzačního tenzometru či zapojení do celého můstku, je nutno korigovat naměřené výsledky, k čemuž je ovšem nutné znát přesný průběh teplotní deformace materiálu (obr. 9) a teploty na snímači zaznamenané po dobu celého měření.



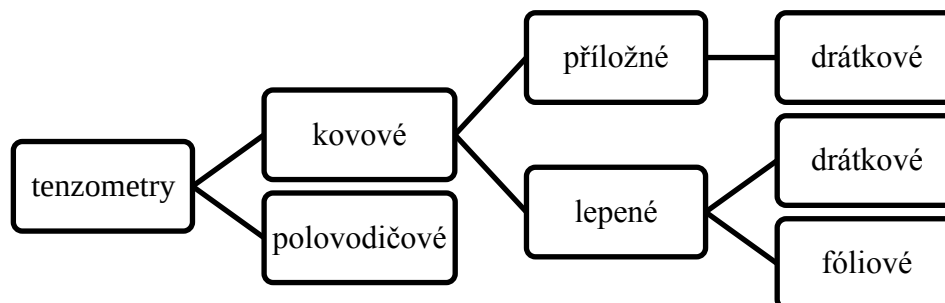
Obr. 9 Teplotní deformace některých materiálů [23]

Změnou teploty se v obvodu tenzometru generuje nežádoucí termoelektrické napětí, které je výsledkem styku dvojice kovových vodičů s rozdílnou teplotou. V obvodu vznikne stejnosměrný proud, jehož nepříznivý vliv na výsledek měření je možné minimalizovat použitím napájení obvodu pomocí střídavého napětí.

Pokud je tenzometr napájen příliš vysokým proudem, hrozí nebezpečí velké proudové zátěže, která může následně vyvolat nezanedbatelné ohřátí snímače i jeho okolí. Z tohoto důvodu musí výrobce udávat maximální možnou proudovou zátěž, kterou je nutné dodržovat.

3 ROZDĚLENÍ TENZOMETRŮ [3]

Dle použitého materiálu měřicí mřížky jsou děleny tenzometry na kovové a polovodičové. Dle konstrukce se dále rozdělují kovové tenzometry na příložné a lepené. Podle způsobu provedení měřicí mřížky jsou kovové tenzometry děleny na drátkové a fóliové (obr 10).



Obr. 10 Rozdělení tenzometrů

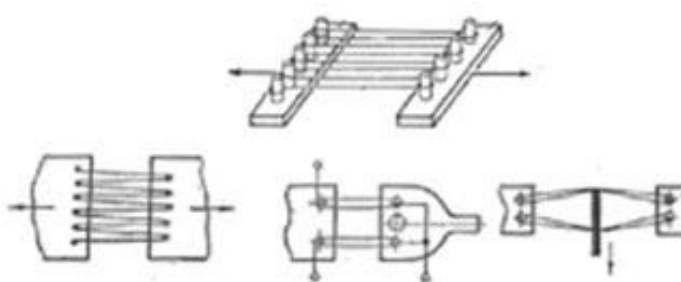
3.1 Kovové tenzometry [9]

Základem kovových tenzometrů je vodivá mřížka vyrobená z kovových materiálů, jejichž příklady a základní vlastnosti jsou uvedeny v tabulce č. 1.

Tabulka č. 1 Vlastnosti materiálů používaných pro odporové tenzometry [27]

Materiál	Složení [%]	Měrná hmotnost při 20°C [g/cm ³]	Mez pevnosti [MPa]	Měrný odpor při 20°C [μΩm]	Součinitel deformační citlivosti [-]
Manganin	84 Cu + 12 Mn + 4 Ni	8,5	100	0,45	0,47
Konstantan	60 Cu + 40 Ni	8,9	600	0,49	2,05
Nichrom	80 Ni + 20 Cr	8,2	100	1,08	2,2
Platina	100 Pt	21,4	350	0,106	6,0
Nikl	100 Ni	8,85	850	0,087	-12,1

Příložné kovové tenzometry (obr. 11) jsou snímače, kde jsou mezi soustavu držáků uchyceny odporové drátky. K měřenému tělesu není přilepen aktivní odporový článek, takže nenastávají problémy, že není přenesena deformace na povrch celého snímače. Výhodou je jejich možné použití za vyšších teplot, malá hystereze a malý posun nulového



Obr. 11 Příložný tenzometr [10]

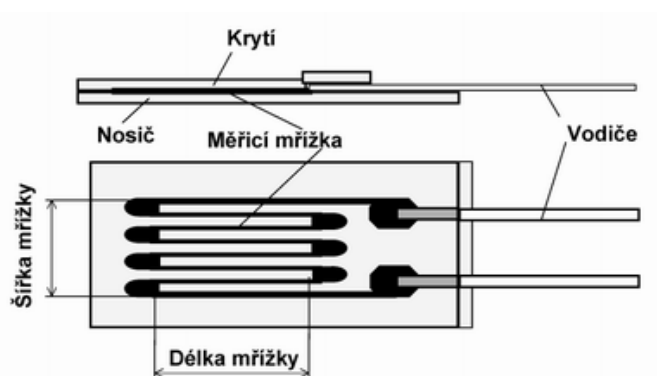
bodu. Nicméně nevýhodou je, že dosažení tepelné rovnováhy je poměrně zdlouhavé a že mají vysoké nároky na mechanické provedení, takže jsou málo využívány. Navíc lepené tenzometry mají nižší pořizovací náklady zejména díky jejich masové výrobě. Příložné tenzometry však nacházejí uplatnění jako snímače pro měření tlaku, tahu, zrychlení apod.

U lepených tenzometrů (obr. 12) je měřicí mřížka přilepena na podložku (vyrobenou z papíru, plastické hmoty nebo z kovu), která je připevněna na měřenou součást. V současnosti bývá navíc mřížka překryta izolační fólií, čímž je dosaženo vyšší odolnosti snímače vůči mechanickému poškození.

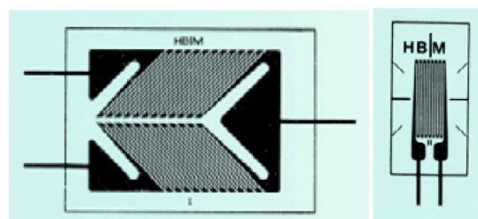
Mřížka drátkových lepených tenzometrů je vyrobena z tenkého odporového drátku kruhového průřezu s průměrem 5 až 25 μm , který je uspořádán do tvaru meandru (mnohonásobné vlásenky). Ke koncům drátku bývají připájeny silnější vývody, které slouží pro zapojení do měřicího systému.

Fóliové lepené tenzometry (obr. 13) mají mřížku s obdélníkovým průřezem, přičemž se tloušťka fólie pohybuje v rozmezí od 1 do 10 μm . Tvar mřížky je vyráběn buď leptáním, nebo fotochemicky, kdy je na kovovou vrstvu nanášena fotocitlivá maska, která je následně exponována a neexponované části jsou odstraněny. Díky technologii výroby lze dosáhnout prakticky jakéhokoliv tvaru mřížky s přesným geometrickým uspořádáním.

Díky konstrukci je u fóliových tenzometrů lepší odvod tepla než u drátkových, takže je možné použití větší proudové zátěže, čímž je dosaženo větších výstupních hodnot. Mají také lepší mechanickou stabilitu, tudíž i vyšší přesnost měření.



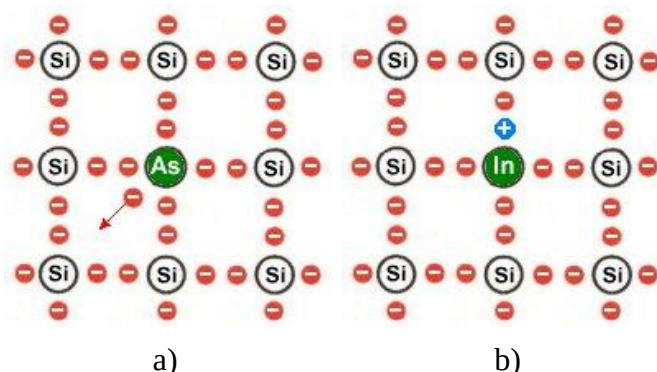
Obr. 12 Provedení lepeného tenzometru [24]



Obr. 13 Základní typy fóliových tenzometrů [26]

3.2 Polovodičové tenzometry [4, 13, 25]

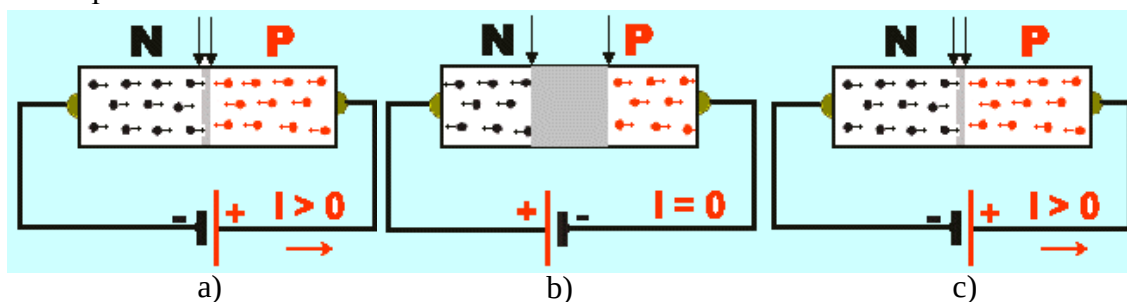
Polovodiče jsou látky, které mají při pokojové teplotě měrný odpor vyšší než je odpor vodiče, ale menší než odpor izolantu. Mají schopnost výrazně měnit vodivost a to vlivem fyzikálních jevů nebo přidáním příměsí do základního materiálu. Podle typu příměsi může být nosičem náboje elektron nebo díra, podle čehož je rozlišována vodivost typu N (negativní) a P (pozitivní). Vodivost typu N (obr. 14a) je způsobena příměsí pětimocného prvku do základního čtyřmocného materiálu, přičemž čtyři valenční elektrony příměsi se podílejí na vazbě se základním materiálem a pátý elektron se na vazbě podílet nemůže. Je vázán malou silou a již při nízkých teplotách se stane volným nosičem elektrického proudu. U typu P (obr. 14b) je příměsí trojmocný materiál, takže při vazbě s čtyřmocným materiálem vzniká kladně nabitá díra, která může být nahrazena elektronem z jiné vazby, takže se přesune na jiné místo a vyvolá tzv. děrovou vodivost.



Obr. 14 Krystalová mřížka polovodiče [13]

U typu P (obr. 14b) je příměsí trojmocný materiál, takže při vazbě s čtyřmocným materiálem vzniká kladně nabitá díra, která může být nahrazena elektronem z jiné vazby, takže se přesune na jiné místo a vyvolá tzv. děrovou vodivost.

Při kombinaci polovodičů s opačnou vodivostí vzniká tzv. PN přechod, který má vlastnost, že dle typu zapojení jím proud protéká nebo nikoli, protože u polovodiče typu N je vodivost způsobena záporně nabitými elektrony a u typu P je vodivost díky kladně nabitým díram. Je-li PN přechod zapojen bez zdroje napětí (obr. 15a), dojde v místě styku ke spárování elektronů a děr, takže se vytvoří nevodivá oblast bez volných nábojů (hradlová vrstva). Při zapojení v závěrném směru (obr. 15b) se volné náboje vzdalují od místa styku směrem ke zdroji, čímž dojde ke zvětšení hradlové vrstvy a odporu, takže PN přechodem neprochází žádný proud. Při zapojení v propustném směru (obr. 15c) jsou elektrony přitahovány ke kladnému pólu zdroje a díry k zápornému pólu, takže se hradlová vrstva zúží, poklesne odpor a PN přechodem prochází proud.



Obr. 15 Zapojení PN přechodu [13]

Polovodičové tenzometry využívají piezoodporového jevu, tedy že vodivost PN přechodu se mění v závislosti se silovým působením. Takže je-li na PN přechod přiveden konstantní proud a následně nastane silové zatížení, dojde ke změně procházejícího proudu kvůli rozdílné vodivosti přechodu. Vztah popisující relativní změnu měrného elektrického odporu $\Delta\rho/\rho$ s napětím σ je:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi_0 \cdot \sigma \quad (3.1)$$

π_0 piezoodporový součinitel [–]

Základním materiálem polovodičových tenzometrů bývá křemík, germanium (základní vlastnosti v tab. 2) nebo indium, přičemž monokrystal materiálu je řezán, broušen nebo leptán do tenkých vláken nebo pásků, které jsou následně lepeny na podložku, podobně jako je tomu u kovových tenzometrů. Polovodičové tenzometry jsou tvrdé a křehké (např. křemík má mez pevnosti 3000 MPa a Youngův modul pružnosti v tahu 450 GPa, takže je možné velké zatížení, ale již při poměrně malém natažení materiálu dojde k lomu) a jejich odpor závisí na druhu a počtu příměsí v základním materiálu.

Tabulka 2 Základní parametry polovodičových tenzometrů [25]

Materiál	Křemík	Křemík	Germanium	Germanium
Typ polovodiče	Typ P	Typ N	Typ P	Typ N
Měrný odpor [$\Omega \cdot \text{cm}$]	0,017-0,02	0,35	1	0,25
Jmenovitý odpor při 20°C [Ω]	100 až 350	100 až 400	50 až 500	50 až 300
Součinitel deformační citlivosti při 20°C	130	-100 až -130	55	-100
Pracovní proud [mA]	20 až 40	10 až 20	10 až 25	5 až 35
Pracovní rozsah poměrných deformací	$\pm 10^{-3}$	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$

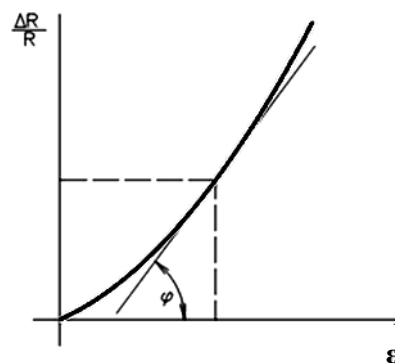
Součinitel deformační citlivosti nelze vyjádřit jako konstantu závislosti poměrné změny odporu na deformaci, protože závislost neprobíhá lineárně. U polovodičových tenzometrů vyjadřuje k-faktor strmost tečny ke křivce popsané rovnicí pro prodloužení (obr. 16). Pokud jsou zkombinovány oba typy těchto tenzometrů, vznikne takzvaný doplňkový polovodičový tenzometr, jehož hodnota k-faktor bývá přibližně +240.

Polovodičové tenzometry vykazují značnou teplotní závislost, a proto se teplotní charakteristika vyjadřující změnu deformační citlivosti s teplotou (obr. 17) pro danou sérii tenzometrů experimentálně zjišťuje a hodnota součinitele musí být uvedena v atestu. Vyšší teplotní stability lze dosáhnout především zvýšením počtu příměsí.

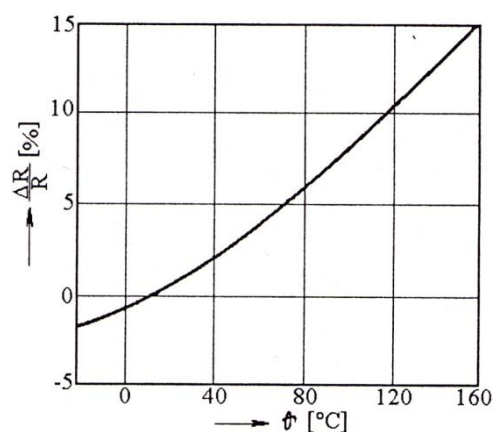
Tvarově se polovodičové tenzometry příliš neliší od kovových (obr. 18). Nejjednodušší je tenzometr pro jednoosou napjatost. Dalšími konstrukčními provedeními jsou dvojitý tenzometr, křížový tenzometr, diskový tenzometr a poloviční a úplný můstek.

Významné výhody jsou:

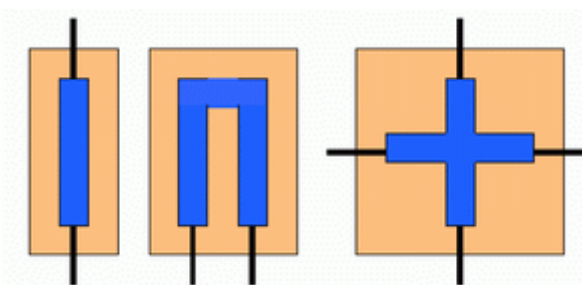
- vysoká hodnota k-faktoru a možnost jeho volby v širokém pásmu kladných nebo záporných hodnot
- možnost volby z širokého rozmezí hodnot měrného elektrického odporu aktivní části polovodiče (10^{-2} až $10^{-3} \Omega \cdot \text{mm}^{-1}$)
- až do 300°C se křemík deformuje bez měřitelné hystereze
- možnost konstrukce malých a lehkých snímačů
- vysoká citlivost a přesnost
- velký výstupní signál v řádu desítek až stovek mV
- dlouhá životnost
- křemíkové materiály mají dobrou odolnost vůči korozi



Obr. 16 Deformační charakteristika [25]



Obr. 17 Teplotní charakteristika [3]



Obr. 18 Základní provedení polovodičových tenzometrů [25]

4 INSTALACE NA MĚŘENÝ OBJEKT [3, 23]

Základem snímačů je měrný člen z kovového materiálu, na kterém jsou připevněny odporové tenzometry, čímž je sledována jeho pružná povrchová deformace vyvolaná zatěžujícími silami.

Měrný člen snímače musí být vhodně tvarovaný a vyrobený z materiálu, který bude zajišťovat jednoznačný vztah mezi poměrnou deformací a měřenou veličinou, a proto jsou na materiál pružných členů kladeny vysoké nároky. Musí mít především dostatečnou pevnost, odolnost vůči porušení, vysokou mez pružnosti, minimální mez kluzu 600 MPa, rozměrovou stálost, minimální hysterezi a dopružování, lineární průběh pružné deformace v rozsahu potřebném pro měření a minimální vnitřní pnutí. Tyto požadavky splňují vhodně legované ocele, které jsou správně tepelně a mechanicky zpracovány.

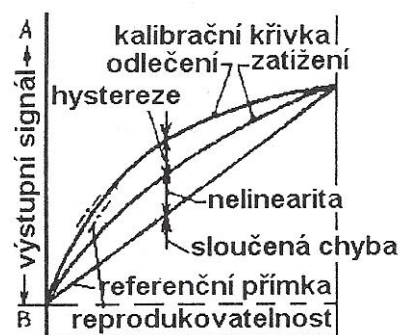
Pro běžné snímače používaných za normálních teplot se používá např. ocel 16 640, která je vhodná na větší měrné členy pro snímače velkých sil a momentů. Ocel musí být dále teplotně zpracována, aby byla její hodnota meze pevnosti v tahu 1 300 až 1800 MPa. Používá se také např. ocel 16 341 nebo 16 540, která má výbornou prokalitelnost.

Při nestandardních podmínkách měření je nutné použití speciálních materiálů. Např. nástrojová ocel 19 552 vykazuje výborné pružné vlastnosti i při zvýšených provozních teplotách (do 450°C) a pro použití v korozních prostředích jsou vhodné korozivzdorné austenitické oceli 17 246, 17 248 nebo 17 249. Dural (slitina hliníku), bronz, titan nebo křemík jsou vhodné pro výrobu členů se zvýšenou citlivostí, avšak oproti oceli mají tyto materiály jiné tahové vlastnosti a součinitele teplotní roztažnosti, takže s nimi musí být využity jiné tenzometry než pro ocele. Pokud nejsou na snímače kladeny vysoké nároky, lze použít na měrný člen i ocele 14 260 nebo 14 331, které jsou zpracovány na mez pevnosti v tahu 1 200 až 1 600 MPa.

Měrné členy musí vykazovat minimální vnitřní pnutí, proto je vhodné při jejich výrobě mechanickým obráběním používat dokonale naostřené rychlořezné nástroje a zařadit do výrobního procesu také alespoň jedno žíhání na odstranění vnitřního pnutí. Po obrobení měrného členu se provádějí další tepelné zpracování. Výrobky se po ohřevu v ochranné atmosféře kalí v oleji, solné lázni nebo na vzduchu, dále jsou zmrazeny na teplotu -70°C a alespoň dvakrát jsou popouštěny, přičemž teplota popouštění je volena podle potřebné hodnoty vrubové houževnatosti a meze kluzu.

Pro správné měření je důležité důkladné připevnění tenzometru na povrch měřené součásti tak, aby bylo docíleno co nejmenší (ideálně žádné) ztráty přenášené deformace, přičemž je nutné tenzometr umístit na vhodné místo a musí být správně natočen dle směru zatížení. Tenzometry jsou voleny především podle základních parametrů (obr. 19) uvedených výrobcem:

- Jmenovité zatížení – hodnota potřebného zatížení (měřené veličiny) k získání jmenovitého výstupního signálu.
- Nelinearita – rozdíly hodnot kalibrační křivky od přímky odpovídající hodnotám signálu na výstupu měřeném za jmenovitého zatížení.
- Hystereze – největší rozdíl dvou hodnot měřeného signálu při stejném zatížení. Jedna hodnota je zjištěna při narůstajícím zatížení od nuly po jmenovité, druhá při klesajícím zatížení od jmenovitého po nulu.



Obr. 19 Graf základních parametrů [3]

- Reprodukovatelnost – největší odchylka mezi hodnotami výstupního signálu naměřenými za totožných zkušebních podmínek při opakovaném zatížení.
- Sloučená chyba – vyjadřuje v procentech jmenovitého zatížení maximální odchylku kalibrační a referenční přímky. Je to součet vlivu nelinearity, hystereze i reprodukovatelnosti.
- Izolační odpor – hodnota odporu mezi tělesem snímače a jeho elektrickým obvodem

Mezi nejrozšířenější metody připevnění patří lepení a v současnosti také vytváření vodivých vrstev tenzometru přímo na měřené součásti. Méně používané je přivaření snímače na měřenou součást.

4.1 Lepení [3, 23]

Připevnění podložky tenzometru na měřenou součást je provedena pomocí lepidla, jehož volba ovlivňuje celkovou kvalitu aplikace a špatným výběrem lze značně negativně zasáhnout do procesu měření. Obvykle je nejlepší použití lepidla doporučeného výrobcem tenzometru, protože při použití jiného lepidla může dojít k nežádoucí reakci s materiálem podložky, ve spoji se mohou vytvořit vzduchové bubliny nebo se poškodí upevňovaný tenzometr. Faktory ovlivňující volbu lepidla jsou jejich tečení za studena (creep), použitelný teplotní rozsah a doba tuhnutí.

Lepidla lze dělit podle způsobu vytvrzení na vytvrditelná za tepla na vytvrditelná za pokojové teploty. Lepidla vytvrditelná za tepla mají lepší mechanické vlastnosti a teplotní rozsah použití se pohybuje v rozmezí od -250°C do 300°C . Pro méně náročné aplikace lze použít lepidla vytvrditelná za pokojové teploty, která se dělí na dvousložková (jedna složka je prášková pryskyřice, druhá složka je tekuté tužidlo) a na jednosložková (např. akrylátová). Akrylátová lepidla vynikají zejména díky krátké době vytvrzování, ale mají teplotní rozsah použití jen od -10°C do 40°C . Je-li dosaženo teplot blízkých se mezním hodnotám, je podstatně zhoršena přesnost měření.

Před vlastním lepením je také důležité přikontrolovat životnost lepidla, jež je obvykle v rozmezí od 6 do 12 měsíců a kterou lze prodloužit uskladněním v chladicích boxech za teploty předepsané výrobcem

Pro dobré spojení je nutné si nachystat vhodnou, dostatečně očištěnou zdrsňenou plochu. Úprava povrchu musí proběhnout krátce před nalepením, aby nedošlo k nežádoucí oxidaci. Je třeba dodržovat následující kroky:

- Hrubé čištění – pískováním nebo vhodným mechanickým způsobem (např. pilníkem, brusným kotoučem, smirkovým papírem apod.) jsou odstraněny laky, tmely, nátěry, rez a okuje (obr. 20)
- Odstranění nerovností – broušením nebo pilováním jsou odstraněny vrypy, jamky a další povrchové nerovnosti
- Odmaštění – dle druhu znečištění jsou volena vhodná rozpouštědla. Na mastnotu jsou vhodná silná rozpouštědla jako např. aceton, methylethylketon apod. Na vosky či podobné materiály je vhodný např. toluen. Veškerá rozpouštědla musí být chemicky čistá. Ze zásobní lahve je odlito potřebné množství do vhodné čisté kádinky a netkanou látkou nebo



Obr. 20 Čištění smirkovým papírem [23]

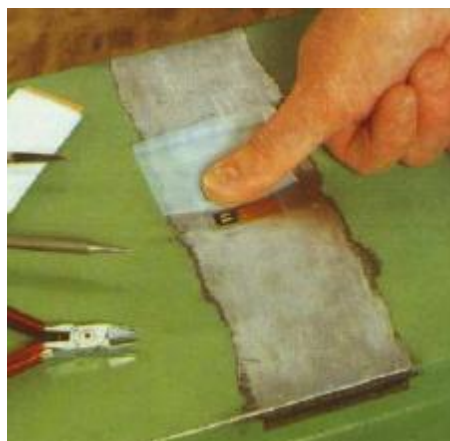
tampónem z buničiny či lékařské vaty je naneseno na povrch. Zbylé rozpouštědlo se nesmí nalévat zpět do zásobní lahve. Jednou použitá čistící látka nebo tampón musí být vyhozen.

- Zdrsnění – pro lepší přilnavost lepidla je povrch lehce zdrsněn opískováním nebo smirkovým papírem. Brusný materiál musí být zbaven veškerých mastnot.
- Dočištění – tampónem nebo netkanou látkou napuštěnou čističem a odmašťovačem jsou odstraněny nečistoty vzniklé při zdrsnění. Nečistoty jsou odstraňovány v jednom směru, aby se nahromadily na jednom místě. Po každém tahu se mění čistící látka tak dlouho, doku není povrch důkladně vyčištěn. Díky mastnotě rukou je třeba použít čistou pinzetu. Po dočištění již není možno se připraveného povrchu dotýkat rukou.

Před lepením se musí lepidlo, které bylo umístěno v chladicím zařízení, ponechat několik hodin v místnosti, aby mělo teplotu shodnou s okolím. Dvousložková lepidla jsou smíchávána bezprostředně před jejich aplikací.

Před vlastním lepením je třeba tenzometry důkladně vysušit např. infralampou nebo v sušící peci. Při aplikaci na silně zakřivené plochy je třeba tenzometr předem tvarovat při teplotě cca 150°C. Lepená plocha tenzometru se také opatrně čistí tampónem. Vývody se přelepují speciální páskou obvykle dodávanou výrobcem. Poté je tenzometr umístěn na určené místo, vyrovná se a na opačném konci než jsou vývody je přilepen páskou k povrchu tak, aby se dal odklopit.

Po odklopení tenzometru je aplikována dostatečná vrstva lepidla. Tenzometr je překryt fólií z acetátu nebo teflonu a je přitlačen zpět na povrch tělesa. Přiměřeným tlakem je vytlačeno přebytečné lepidlo (obr. 21), přičemž se musí dát pozor, aby se tenzometr neposunul. Při stálém tlaku vyvolaném palcem nebo závažím je lepidlo vytvrzováno po dobu předepsanou výrobcem. Je-li vytvrzování prováděno za vyšší teploty, je nutné si předem připravit vhodný mechanismus k zatížení a pec s regulovatelným ohřevem.



Obr. 21 Vytlačení přebytečného lepidla [23]

Po vytvrzení lepidla je odstraněna přiložená fólie, k tenzometru jsou připájeny vodiče, které jsou zapojeny na měřicí aparaturu a je provedena kontrola odporu měřicí mřížky. Přitlačením tenzometru kouskem pryže při sledování výstupních hodnot se zkontroluje homogenita přilepení, přičemž pokud jsou naměřeny velké odchylky, bylo lepení nekvalitní kvůli vzniku vzduchových bublin nebo vniknutí pevných nečistot do spoje.

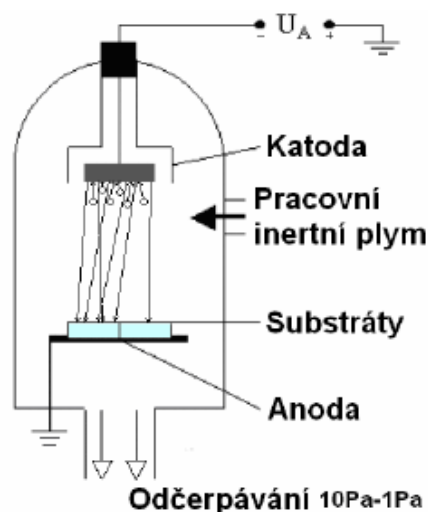
4.2 Difuzní metody [2]

Základním principem vrstevové technologie je vytváření tenkých vodivých vrstev přímo na povrchu součástí využitím techniky naprašování nebo vakuového napařování, které jsou následně překryty fotocitlivou vrstvou, exponovány určeným tvarem obrazce snímáče a v konečné fázi dojde k odstranění neexponovaných částí vodivé vrstvy. Touto metodou lze vytvořit mřížku jakéhokoli tvaru, je zaručen dobrý přenos deformace na tenzometr a také dobrá dlouhodobá stabilita a opakovatelnost měření. Další výhodou je, že příslušná elektronika je umístěna na destičce společně s mřížkou, čímž odpadá nutnost připájení dalších drátků, jejichž spoje bývají choulostivé na vibrace a rázy. Typické materiály pro vytváření tenké vrstvy jsou např. zlato, hliník, chromnikl, tantal apod.

4.2.1 Naprašování [20]

Katodové naprašování probíhá za sníženého tlaku v pracovní komoře, která bývá vyplněna pracovním inertním plynem (např. argon, xenon), přičemž nanášený materiál je umístěn na katodě a materiály, na nichž má být vytvořena vrstva, jsou umístěny na anodě (obr. 22).

Po vytvoření doutnavého výboje je v pracovním prostoru nerovnoměrně rozmístěn elektrický potenciál a v oblasti katody nastane tzv. katodový spád, takže kladně nabitě ionty pracovního plynu vzniklé při výboji jsou unášeny směrem ke katodě. V oblasti katodového spádu jsou urychleny na takovou rychlost, že při dopadu na povrch katody vyraží částice naprašovaného materiálu do okolí, tedy i na substrát na anodě, kde je vytvořena požadovaná vodivá vrstva.

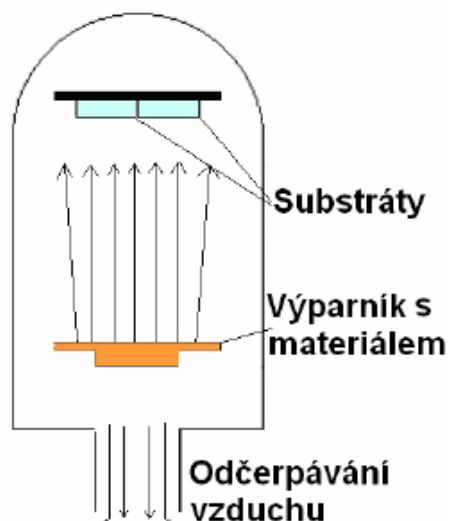


Obr. 22 Katodové naprašování [19]

4.2.2 Napařování [20]

Napařování je považováno za nejjednodušší technologii výroby tenkých vrstev. Využívá principu, že při zahřívání materiálu dochází k uvolňování jeho částic, přičemž ohřev probíhá v uzavřeném prostoru a může být realizován např. odporovým ohřevem nebo iontovým svazkem apod. Jelikož je prostor uzavřený, dojde po čase ke stanovení rovnovážného tlaku nazývaném tenze nasycených par. Nastane-li porušení rovnováhy systému kvůli výskytu objektu s nižší teplotou, začnou na studenějším objektu nasycené páry kondenzovat, čímž je umožněn přenos materiálu s vyšší teplotou (z výparníku) na chladnější materiál (podložku ze substrátu), kde vzniká požadovaná tenká vrstva (obr. 23).

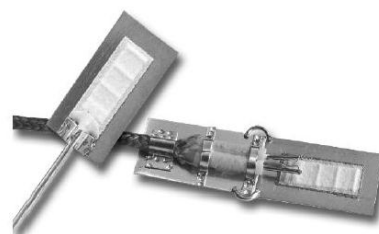
Kvůli zvětšení střední volné dráhy molekul přenášeného materiálu probíhá proces napařování ve vakuu (10^{-4} až 10^{-6} Pa). Nanesená vrstva může obsahovat strukturní nehomogenity a defekty, které negativně změny elektrické parametry, a proto je vhodné nechat vrstvy preventivně vystárnout za zvýšené teploty.



Obr. 23 Napařování [19]

4.3 Přivařování [23]

Tenzometry pro přivařování musejí mít podložku z kovového materiálu a také měřený objekt musí být z oceli nebo temperované litiny, ke kterému jsou připevněny bodovým svařováním. Výhodou této metody aplikace je zejména její rychlost a nenáročnost a je využívána zejména pro tlustostěnné konstrukční prvky, protože přivařovací tenzometry jsou značně tuhé. Nachází také uplatnění při použití za vysokých teplot (až 1200°C), kde by již např. přilepení nebylo možné, ale je nutné použít i speciální vysokoteplotní tenzometry (obr. 24), které jsou pro vysoké teploty přizpůsobeny.

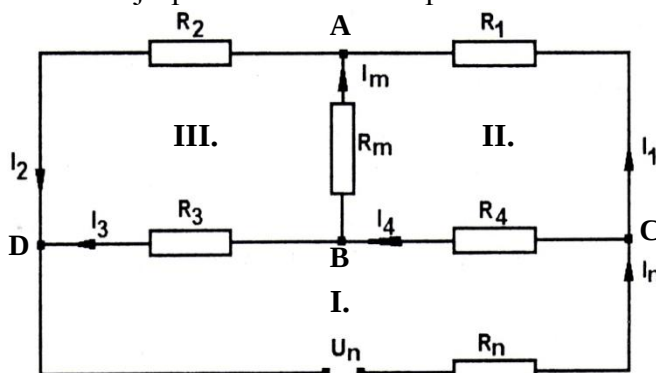


Obr. 24 Přivařovací vysokoteplotní tenzometr [6]

5 ZAPOJENÍ A PRINCIP MĚŘENÍ [3, 12]

Při měření elastické deformace nebo přetvoření je poměrná změna odporu $\Delta R/R$ velice malá. Pro její zesílení se proto používá zapojení tenzometrů do můstku. Nejčastěji využívané bývá zapojení do tzv. Wheatstonova můstku (obráz. 25).

Změní-li se velikost odporu některého z tenzometrů R_1 až R_4 , dojde ke změně velikosti proudu na měřiči I_m , který lze využitím Ohmova a Kirchhoffova zákona určit jako funkci odporů R_1 až R_4 , odporu měřiče R_m a napájecího napětí U_n .



Obr. 25 Schéma Wheatstonova můstku [3]

Ohmův zákon říká, že proud I procházejícím vodičem je přímo úměrný napětí U na koncích vodiče a nepřímo úměrný jeho odporu R :

$$I = \frac{U}{R} \quad (5.1)$$

První Kirchhoffův zákon říká, že součet proudů v kterémkoliv uzlu obvodu je roven nule, přičemž proudy do uzlu vtékající mají kladnou hodnotu a vytékající jsou záporné. Pro uzly v můstku lze napsat rovnice:

$$\text{A: } I_1 - I_2 - I_m = 0 \quad (5.2)$$

$$\text{B: } I_4 - I_3 - I_m = 0 \quad (5.3)$$

$$\text{C: } I_n - I_1 - I_4 = 0 \quad (5.4)$$

$$\text{D: } I_2 + I_3 - I_n = 0 \quad (5.5)$$

Z této soustavy rovnic lze ovšem použít jen tři vzájemně nezávislé rovnice.

Druhý Kirchhoffův zákon říká, že součet všech svorkových napětí v uzavřené smyčce je roven nule. Pro smyčky v můstku lze napsat rovnice:

$$\text{I.: } U_n - I_4 \cdot R_4 - I_3 \cdot R_3 = 0 \quad (5.6)$$

$$\text{II.: } I_1 \cdot R_1 - I_4 \cdot R_4 - I_m \cdot R_m = 0 \quad (5.7)$$

$$\text{III.: } I_2 \cdot R_2 + I_m \cdot R_m - I_3 \cdot R_3 = 0 \quad (5.8)$$

Řešením soustavy šesti rovnic s determinantem D pro šest neznámých ($I_1, I_2, I_3, I_4, I_m, R_m$) vzhledem k proudu I_m je:

$$I_m = \frac{U_n}{D} \cdot (R_1 \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4) \quad (5.9)$$

Aby mohla být zaznamenána změna výstupního proudu, musí být na začátku měření most vyvážen. Vyvážení je dosaženo, když:

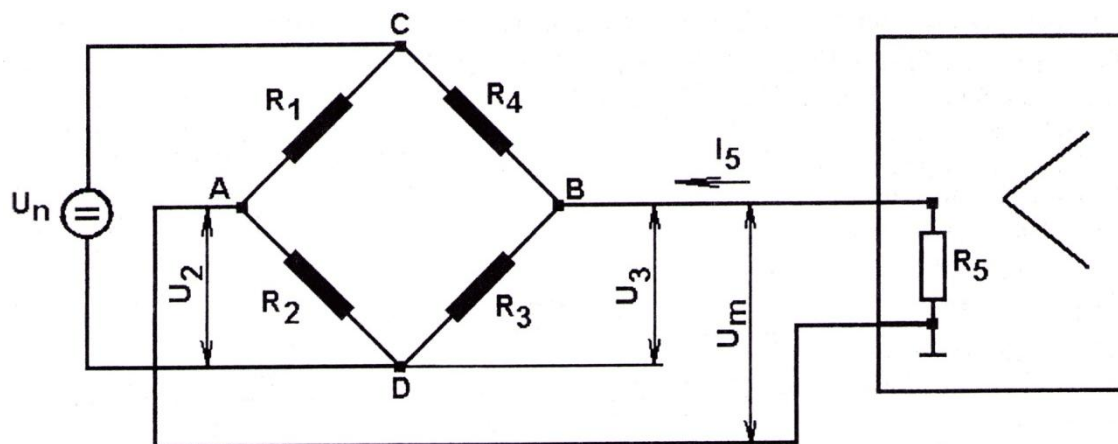
$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4 \quad (5.10)$$

Po vyvážení je proud na výstupu I_m roven nule. Dojde-li ale ke změně např. odporu R_1 o ΔR_1 , na výstupu začne protékat proud velikosti $I_m + \Delta I_m$:

$$I_m + \Delta I_m = \frac{U_n}{D'} \cdot [(R_1 + \Delta R_1) \cdot R_3 - R_2 \cdot R_4] \quad (5.11)$$

Kde D' je determinantem rovnic (5.2) až (5.8) s tím rozdílem, že R_1 je nahrazeno $R_1 + \Delta R_1$. Jelikož je ale $R_1 + \Delta R_1$ jen zanedbatelně větší než R_1 , lze počítat s $D' = D$. Je-li dodržena podmínka (5.10), lze rovnici (5.11) upravit takto:

$$\Delta I_m = \frac{U_n}{D} \cdot R_3 \cdot \Delta R_1 \quad (5.12)$$



Obr. 26 Celý Wheatstonův můstek [3]

Z obr. 26 je vidět, že bude-li most vyvážen, bude měřené napětí mezi uzly A a B nulové. Změní-li se ale velikost některého odporu zapojeného v můstku, dojde k úměrně veliké změně napětí na výstupu.

Je-li uvažováno, že odpor měřicí soustavy na výstupu je nekonečně velký, bude proud I_5 roven nule. Výstupní napětí U_m je pak vyjádřeno jako rozdíl napětí dvou napěťových děličů, přičemž napětí děliče je vyjádřeno pomocí vztahu k napájecímu napětí:

$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_n \quad (5.13)$$

$$U_3 = \frac{R_3}{R_3 + R_4} \cdot U_n \quad (5.14)$$

$$U_m = U_3 - U_2 \quad (5.15)$$

Dosazením (5.13) a (5.14) do (5.15) a úpravou je pak výstupní napětí:

$$U_m = \frac{R_1 \cdot R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2) \cdot (R_3 + R_4)} \cdot U_n \quad (5.16)$$

Tento vztah je využíván jako základní rovnice pro výpočty při zapojení do mostu a platí pro veškeré měřicí zařízení, protože jejich vnitřní odpor je tak velký, že základního předpokladu je s dostačující přesností dosaženo.

Změna výstupního napětí je způsobena změnou jednotlivých odporů o ΔR . Za předpokladu, že byl most před měřením vyvážen, lze rovnici (5.16) upravit do tvaru:

$$\frac{\Delta U_m}{U_n} = \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (5.17)$$

Dosazením vztahu (1.8) do (5.17) je poté vztah pro podíl změny výstupního a napájecího napětí:

$$\frac{\Delta U_m}{U_n} = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (5.18)$$

Pro poměrnou deformaci ve směru kolmém k silovému působení platí vztah:

$$\varepsilon_n = -\mu \cdot \varepsilon \quad (5.19)$$

Pro vztahy změny odporů a výstupního signálu lze konstatovat:

- Nastanou-li změny odporu v sousedních (protilehlých) větvích můstku, je výsledný signál úměrný rozdílu (součtu) těchto odporových změn.

- Odporové změny mohou být souhlasné (všechny kladné nebo záporné) nebo nesouhlasné (jedna kladná, druhá záporná).
- Je-li změna odporů ve dvou sousedních větvích můstku souhlasná (nesouhlasná), je výsledný signál úměrný rozdílu (součtu) těchto odporových změn.
- Je-li změna odporů ve dvou sousedních větvích můstku stejně velká a souhlasná (nesouhlasná), je výsledný signál nulový, takže můstek zůstává vyvážen (výsledný signál je dvojnásobný)
- Je-li změna odporů ve dvou protilehlých větvích můstku souhlasná (nesouhlasná), je výsledný signál úměrný součtu (rozdílu) těchto odporových změn
- Je-li změna odporů ve dvou protilehlých větvích můstku stejně velká a souhlasná (nesouhlasná), je výsledný signál dvojnásobný (nulový, takže můstek zůstává vyvážen)

Tenzometry je možné zapojit do čtvrtinového, polovičního nebo celého mostu. U čtvrtinového můstku je použit pouze jeden tenzometr a na zbylých větvích mostu jsou zapojeny odpovídající rezistory. Tímto zapojením však není dosaženo kompenzace vlivu teploty, proto bývá využíváno zřídka. U polovičního můstku jsou použity dva tenzometry a dva odpory zapojené v sousedních větvích. Tím je dosaženo teplotní kompenzace, proto je toto zapojení mnohem vhodnější pro praxi. Nejvýhodnější je zapojení čtyř tenzometrů do celého mostu. Vliv teploty je kompenzován a navíc je dosaženo vyšší citlivosti než je tomu u půlmostového zapojení. Lze se také setkat se zapojením kompenzačních (nezatížených) tenzometrů v sousedních větvích. Vliv teploty je kompenzován, ale obecně se dá říci, že čím více bude zapojeno aktivních snímačů, tím větší bude celková citlivost měření.

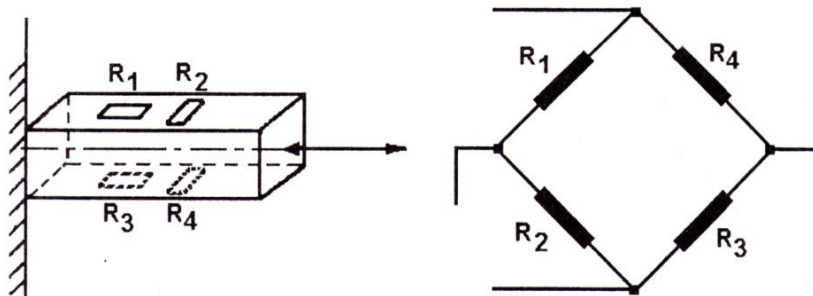
Můstek může být napájen střídavě nebo stejnosměrně. Oba druhy napájení mají své výhody a nevýhody, které je nutné zohlednit a zvolit správný typ.

- Při stejnosměrném napájení je možné rozšířit frekvenční pásmo signálu až na desítky kHz. Při růstu signálu se ale zvyšují i parazitní vlivy jako je např. odpor kabeláže a dalších částí obvodu. Dalším nežádoucím vlivem je vznik parazitního termoelektrického napětí v místech kontaktu dvou různých materiálů.
- Při střídavém napájení je zjišťována změna amplitudy napájecího napětí způsobená změnou odporů v ramenech můstku. Pro její vyhodnocení je nutné zapojení synchronního demodulátoru, který převádí amplitudu a fázi napájecího napětí na výstupní stejnosměrné napětí. Poněvadž demodulátor pracuje s pevnou nosnou frekvencí, jsou účinně potlačeny cizí parazitní frekvence na vstupním signálu.

5.1 Zapojení pro tah-tlak [3, 12, 15, 17]

Pro měření napětí při namáhání tahem (tlakem) se nejčastěji využívá zapojení čtyř shodných aktivních tenzometrů do celého mostu dle obr. 27.

Tahové zatížení způsobí deformaci, díky které se zvýší hodnota odporu tenzometrů o ΔR_h . Jelikož na tenzometry 2 a 4 působí síla v příčném směru, vyvolá dle vztahu (5.19) změnu odporu $-\mu \cdot \Delta R_h$.



Obr. 27 Namáhání tah-tlak, 4 aktivní snímače v celém mostu [3]

Protože jsou snímače umístěny na stejném tělese, lze předpokládat, že teplotní vliv bude na

všechny tenzometry stejný, tudíž každý změnu odpor o ΔR_t . Může se vyskytnout i případné parazitní namáhání ohybovou silou, které vyvolá změnu odporu o ΔR_o . Pro jednotlivé odpory lze napsat rovnice po zatížení:

$$\begin{aligned} R_1 &= R + \Delta R_h + \Delta R_o + \Delta R_t \\ R_2 &= R - \mu \cdot \Delta R_h + \mu \Delta R_o + \Delta R_t \\ R_3 &= R + \Delta R_h - \Delta R_o + \Delta R_t \\ R_4 &= R - \mu \cdot \Delta R_h - \mu \Delta R_o + \Delta R_t \end{aligned} \quad (5.20)$$

Protože změna odporů vlivem teploty je ve všech ramenech můstku shodná a ohyb vyvolá v protilehlých ramenech nesouhlasnou stejně velkou změnu odporů, neprojeví se na celkové změně měřeného napětí, z čehož vyplývá, že teplotní vliv a ohyb jsou kompenzovány a nemusí s nimi být dále počítáno.

Dosazením rovnic (5.20) do vztahu (5.17) je pak výsledný vztah pro měřené napětí:

$$\frac{U_m}{U_n} = \frac{1 + \mu}{2} \cdot \frac{\Delta R_h}{R} \quad (5.21)$$

Vztah (5.21) lze zapsat pomocí (1.8) také jako:

$$\frac{U_m}{U_n} = \frac{1 + \mu}{2} \cdot k \cdot \varepsilon \quad (5.22)$$

V porovnání se zapojením pouze jednoho měřicího tenzometru v plném můstku je u ocelového tělesa dosaženo citlivosti přibližně 2,6 krát vyšší.

Tohoto zapojení je využíváno nejčastěji při výrobě tahových a tlakových snímačů, přičemž konstrukce měrného členu snímače je závislá zejména na velikosti zatěžující síly, požadovaných rozměrech, tvaru a přesnosti snímače. Pro měrný člen je nejlepší, když je vyroben z jednoho kusu materiálu, tak aby v něm bylo rovnoměrně rozloženo silové působení, které musí působit přesně ve směru jeho osy, aby nedocházelo k nedokonalému snímání a parazitnímu zatěžování.

Nejčastěji se používá měrný člen kruhového průřezu, kde jsou uprostřed jeho výšky nalepeny měřící tenzometry dle zapojení uvedeného na začátku kapitoly. Pro kruhový měrný člen s průměrem D platí Hookův zákon $\sigma = E \cdot \varepsilon$ a lze napsat vztahy:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (5.23)$$

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (5.24)$$

Dosazením (5.23) a (5.24) do (5.22) je získán konečný vztah

$$\frac{U_m}{U_n} = \frac{2 \cdot k \cdot F \cdot (1 + \mu)}{\pi \cdot E \cdot D^2} \quad (5.25)$$

Příkladem snímače je např. snímač LCFD firmy Omega (obr. 28). Lze ho využít pro měření tlaku i tahu. Je vyroben z kvalitní korozivzdorné oceli třídy 17. Připojení zátěže je provedeno pomocí šroubu s vnějším závitem.



Obr. 28 Snímač tlakové/tahové síly LCFD [17]

Snímače tahové a tlakové síly jsou v průmyslu využívány např. pro konstrukci závěsných vah, vážících systémů sil a tanků, konstrukci automobilových a železničních vah nebo konstrukci průmyslových siloměrů.

Příkladem využití snímače je např. automobilová váha firmy Mettler Toledo model 7566 (obr. 29), která je určena zejména pro vážení velkých vozidel při těžbě rudy, dřeva apod.

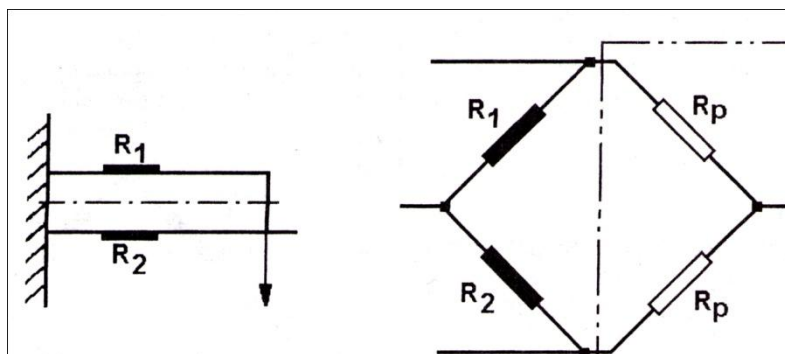


Obr. 29 Váha 7566 firmy Mettler Toledo [15]

5.2 Zapojení pro ohyb [3, 12, 22]

Při zatížení ohybem je nejčastěji využíváno zapojení dvou tenzometrů do polovičního mostu nebo čtyř tenzometrů zapojených do celého mostu.

U polovičního mostu (obr. 30) jsou zapojeny dva aktivní tenzometry R_1 a R_2 . Aby byl můstek vyvážen, je doplněn na větvích proti tenzometrům rezistory se stejně velkými odpory R_p . Při zatížení ohybovou silou je tenzometr R_1 natahován, takže naroste hodnota jeho odporu o ΔR_o . Tenzometr R_2 je smršťován, čímž poklesne jeho odpor o ΔR_o . Pro jednotlivé odpory lze napsat rovnice:



Obr. 30 Namáhání ohyb, dva snímače v polovičním můstku [3]

$$R_1 = R + \Delta R_o + \Delta R_h + \Delta R_t$$

$$R_2 = R - \Delta R_o + \Delta R_h + \Delta R_t$$

$$R_p = R_3 = R_4 = R$$

(5.26)

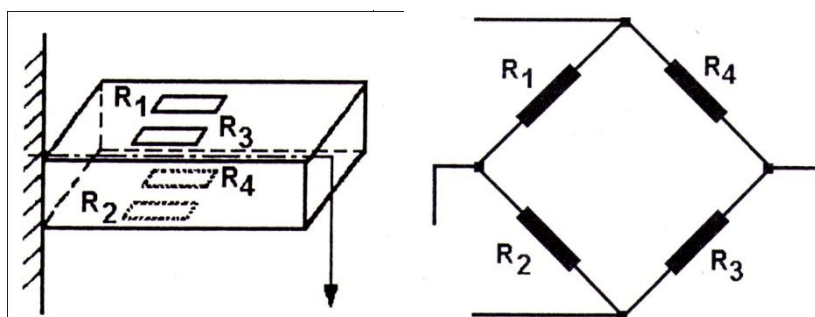
Podobně jako teplota, tak i případná parazitní tahová síla vyvolá změnu odporu stejně velkou a totožného znaménka, tudíž jsou tyto vlivy kompenzovány a nemusí se s nimi dále počítat. Dosazením rovnic (5.26) do vztahu (5.17) je pak výsledný vztah pro měřené napětí:

$$\frac{U_m}{U_n} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta R_o}{R} \quad (5.27)$$

Vztah (5.27) lze zapsat pomocí (1.8) také jako:

$$\frac{U_m}{U_n} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot \varepsilon \quad (5.28)$$

U zapojení do celého mostu (obr. 31) jsou všechny tenzometry měřící a zároveň i kompenzační. Ohybová síla způsobí u tenzometrů R_1 a R_3 zvětšení jejich odporu o ΔR_o , u R_2 a R_4 se odpor o ΔR_o sníží. Pro jednotlivé odpory lze napsat rovnice:



Obr. 31 Namáhání ohyb, čtyři snímače v celém mostu [3]

$$R_1 = R_3 = R + \Delta R_o + \Delta R_h + \Delta R_t$$

$$R_2 = R_4 = R - \Delta R_o + \Delta R_h + \Delta R_t$$

(5.29)

Podobně jako u polovičního mostu je kompenzován vliv teploty a tahové síly. Dosazením rovnic (5.29) do vztahu (5.17) je pak výsledný vztah pro měřené napětí:

$$\frac{U_m}{U_n} = \frac{\Delta R_o}{R} \quad (5.30)$$

Vztah (5.30) lze zapsat pomocí (1.8) také jako:

$$\frac{U_m}{U_n} = k \cdot \varepsilon \quad (5.31)$$

Zapojením do celého mostu je ve srovnání s polovičním mostem dosaženo dvojnásobné citlivosti. Toto zapojení je nejčastěji využíváno pro snímače síly a ohybového momentu.

Měrný člen snímače ohybové síly bývá nejčastěji obdélníkového průřezu s šířkou b a výškou h . Na něm jsou proti sobě umístěny dvě dvojice tenzometrů zapojené dle obr. 28, přičemž středy mřížek tenzometrů jsou ve vzdálenosti l od zatěžující ohybové síly F .

Pro měrný člen platí Hookův zákon $\sigma = E \cdot \varepsilon$ kde:

$$\sigma = \frac{M_o}{W_o} = \frac{F \cdot l}{W_o} \quad (5.32)$$

$$W_o = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (5.33)$$

Dosazením (5.32) a (5.33) do (5.31) je získán konečný vztah:

$$\frac{U_m}{U_n} = \frac{6 \cdot k \cdot F \cdot l}{E \cdot b \cdot h^2} \quad (5.34)$$

Příkladem snímače je např. snímač M120 firmy Uticell (obr. 32), jehož ohybové těleso je vyrobeno z mědi pro kvalitnější snímání a větší odolnosti vůči otřesům.

Ohybové snímače jsou v průmyslu využívány např. pro konstrukci obchodních a čítacích vah, dávkovacích linek apod.



Obr. 32 Snímač ohybové síly M120 [22]

5.3 Zapojení pro krut [3, 12, 16, 21]

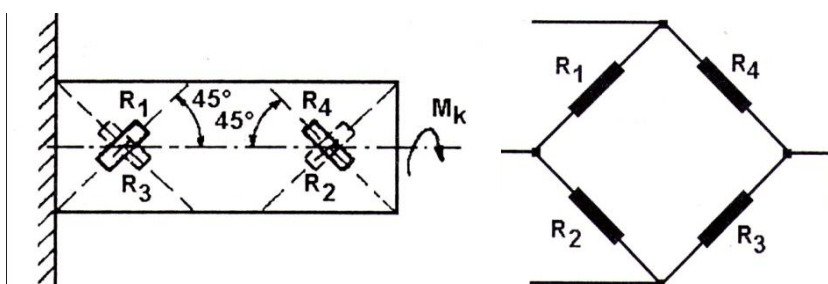
Při měření kroutícího momentu je použita čtveřice tenzometrů zapojených do celého mostu (obr. 33). Aby byl eliminován vliv případné ohybové síly, je nutné, aby byly tenzometry na tělese čidla umístěny přesně pod úhlem 45° vzhledem k neutrální ose.

Pro jednotlivé odpory lze napsat rovnice:

$$\begin{aligned} R_1 &= R + \Delta R_k + \Delta R_o + \Delta R_t \\ R_2 &= R - \Delta R_k - \Delta R_o + \Delta R_t \\ R_3 &= R + \Delta R_k - \Delta R_o + \Delta R_t \\ R_4 &= R - \Delta R_k + \Delta R_o + \Delta R_t \end{aligned} \quad (5.35)$$

Vliv teploty a případné ohybové síly je kompenzován a dosazením rovnic (5.35) do vztahu (5.17) je pak výsledný vztah pro měřené napětí:

$$\frac{U_m}{U_n} = \frac{\Delta R_k}{R} \quad (5.36)$$



Obr. 33 Namáhání krut, čtyři snímače v celém mostu [3]

Vztah (5.36) lze zapsat pomocí (1.8) také jako:

$$\frac{U_m}{U_n} = k \cdot \varepsilon \quad (5.37)$$

Tohoto zapojení se využívá v praxi při konstrukci snímačů krouticího momentu, kterých existuje nepřeberné množství. V praxi jsou však často nahrazovány přímo částmi vřeten, které přenášejí krouticí moment. V nejjednodušším případě je moment přenášen plným hřídelem s kruhovým průřezem, na kterém jsou umístěny tenzometry stejně jako na obr. 30.

Pro krouticí moment platí:

$$M_k = \tau \cdot W_k, \text{ kde} \quad (5.38)$$

τ je smykové napětí a W_k modul průřezu v krutu. Pro kruhový průřez s průměrem d platí:

$$W_k = \frac{\pi \cdot d^3}{16} \quad (5.39)$$

Smykové namáhání je dle pružnosti a pevnosti definováno jako:

$$\tau = G \cdot 2 \cdot \varepsilon \quad (5.40)$$

Modul pružnosti materiálu ve smyku G je popsán vztahem:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} \quad (5.41)$$

Největší smykové napětí na povrchu snímače je v úhlu 45° vzhledem k jeho ose. V tomto směru jsou umístěny tenzometry, které snímají poměrnou deformaci, pro kterou platí dle předchozích rovnic:

$$\varepsilon = \frac{16 \cdot (1 + \mu) \cdot M_k}{\pi \cdot d^3 \cdot E} \quad (5.42)$$

Pro výstupní napětí platí po dosazení do (5.37) vztah:

$$\frac{U_m}{U_n} = \frac{k \cdot 16 \cdot (1 + \mu) \cdot M_k}{\pi \cdot d^3 \cdot E} \quad (5.43)$$

Příkladem snímače je např. snímač TSLQ od firmy Natis, který je schopen měřit krouticí moment v obou směrech. Pro připojení k měřenému členu slouží čtyřhranný výstupek nebo díra.

Snímače krouticího momentu jsou využívány např. pro konstrukci momentových klíčů nebo šroubováků, měření výkonu rotačních přístrojů apod.

Příkladem vyžití snímačů je např. sada momentového klíče a zástrčných klíčů firmy Hazet 6292-1 CT/28 (obr. 35), která je určena pro rozsah 40-200 Nm a dosahuje přesnosti $\pm 2\%$ z údaje stupnice. Hodnota potřebného utahovacího momentu se nastavuje otáčením rukojeti do té doby, než je dosaženo cílové hodnoty na stupnici. Při utahování je docílení nastaveného momentu signalizováno zvukovým cvaknutím, hmatově-pocitovým vjemem a také vyskočením signálního červeného tlačítka. Otáčení je možné vlevo i vpravo, přičemž změna směru se provádí přepínací páčkou v hlavici klíče.



Obr. 34 Snímač krouticího momentu TSLQ [16]



Obr. 35 Momentový klíč 6292-1 CT/28 [21]

6 ZÁVĚR

Práce shrnuje dosavadní poznatky o tenzometrickém měření a zhodnotit vhodnost této metody snímání povrchové deformace pro strojírenství.

Je vysvětlen základní princip odporových tenzometrů pomocí známých fyzikálních vztahů. Dále jsou rozebrány vlivy, které mají negativní dopady na přesnost měření, a způsoby, jak je efektivně kompenzovat. Více prostoru je věnováno teplotě, protože její změny nejvíce ovlivňují celkovou chybu. Nejlepší metodou kompenzace teplotního vlivu je zapojení do mostu, čímž je dosaženo i zvýšení hodnoty měřeného signálu a v porovnání s ostatními způsoby je nejjednodušší.

Tenzometry jsou děleny na kovové a polovodičové, přičemž každý z druhů má jiné vlastnosti a nachází uplatnění v různých aplikacích. Proto nelze obecně jednoznačně říci, že jeden je lepší než druhý. Kovové vykazují oproti polovodičovým lineární průběh změny odporu s deformací, takže jsou přesnější a při měření je dosaženo menší chyby. Polovodičové jsou však mnohem citlivější, takže umožňují měřit několikanásobně menší zatížení. U polovodičů lze také sestavit mnohem menší a lehčí snímače a je u nich větší variabilita při volbě jmenovitého odporu a k-faktoru.

Při měření je velmi důležité připevnění tenzometru na povrchu zkoumaného objektu, protože nedokonalým připevněním dochází k velkým nepřesnostem způsobených špatným přenosem deformace povrchu na snímač. Díky své univerzálnosti a jednoduchosti je nepoužívanější připevňovací metodou lepení. Na trhu se vyskytuje mnoho druhů lepidel a vzhledem k okolnostem měření je třeba vybrat správný typ. Nejlépe ten, který doporučuje výrobce tenzometru. V současné době je na vzestupu vytváření vodivých vrstev snímače přímo na povrchu měřené součásti, čímž odpadá problém s přenosem deformace. Jsou tak vytvořeny miniaturní snímače s dobrými vlastnostmi. Tato technologie je velmi efektivní a s dalším vývojem v oblasti automatizace lze předpokládat rozšíření jejího použití.

Protože jsou měřené deformace malé, také výstupní signály dosahují nízkých hodnot. Pro jejich zesílení se využívá mostového zapojení. Zapojením do můstku a upevněním tenzometrů na měrném členu jsou konstruovány snímače pro různé druhy namáhání. Tenzometrické snímače jsou průmyslově využívány pro měření sil a momentů nebo jako součást jiných měřících či kontrolních systémů. Velmi rozšířené je použití tenzometrických snímačů při konstrukci vázicích systémů.

Tenzometry jsou vhodné nejen pro strojírenské aplikace ale např. i pro stavební a potravinářský průmysl. S dalším technologickým vývojem se ještě zvýší jejich použitelnost a není pochyb, že jejich spotřeba bude stále narůstat.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [7]

1. BILOŠOVÁ, Alena. *Měření přetvoření těles v bodě* [online]. [cit. 2012-05-21]. Dostupné z WWW: <http://www.337.vsb.cz/materialy/experimentalni_mechanika/PRETVOR_BOD.pdf>
2. BUJALOBOKOVÁ, Magdaléna a Pavel TRNKA. *Progresivní tlustovrstvé technologie v elektronických aplikacích*. ELEKTRO [online]. 2008, [cit. 2012-05-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36505.pdf>>
3. ČECH, Jaroslav, Jiří PERNIKÁŘ a Kamil PODANÝ. *Strojírenská metrologie*. Skriptum FSI VUT v Brně, 4. přeprac. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2005, 176 s. ISBN 80-214-3070-2.
4. ČERNOHORSKÝ, Jiří. *Křemíkové tenzometry v měřicí technice mechanických veličin*. MM Průmyslové spektrum [online]. Praha: SEND Předplatné s.r.o, 2007, č. 1 [cit. 2012-05-21]. ISSN 1212-2572. Dostupné z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/kremikove-tenzometry-v-merici-technice-mechanickych-velicin.html>>
5. DROZD, Zdeněk. *Křivky plastické deformace - technická praxe* [online]. 2005, [cit. 2012-05-21]. Dostupné z WWW: <http://kdf.mff.cuni.cz/veletrh/sbornik/rozsirene/Drozd/krivky_tech_n_praxe.html>
6. ESA Messtechnik GmbH. *Vysokoteplotní tenzometry* [online]. 2012 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.esamesstechnik.cz/tenzometry/vysokoteplotni.html>>
7. Generator.citace.com. *Citace.com* [online]. 2012 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z WWW: <<http://generator.citace.com/>>
8. GET s.r.o. *Obchodní váha CAS ER Junior 6LP* [online]. 2009 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.getsro.cz/obchodni-vaha-cas-er-junior-6lp-p-181.html>>
9. HRUBANT, Ladislav a Jan HRUBANT. *Odporové tenzometry z pohledu využití v automatizovaných soustavách. Automa: časopis pro automatizační techniku* [online]. Praha: FCC Public, 2004 [cit. 2012-04-17]. ISSN 1210-9592. Dostupné z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/download/au070427.pdf>>
10. HUSÁK, Miroslav. *Piezoodporový jev, tenzometry, senzory mechanické deformace* [online]. 2008 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.micro.feld.cvut.cz/home/X34SES/prednasky/07%20Piezoodporovy%20jev%20-%20mechanicke%20deformace.pdf>>
11. Inset s.r.o. *Diagnostika mostních konstrukcí* [online]. 2012 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.inset.com/diagnostika-stavebnich-konstrukci.php>>

12. JANÍČEK, Přemysl. *Technický experiment*. Skriptum FS, Ediční středisko VUT, 1988, 384 s.
13. KUSALA, Jaroslav. *Elektrina: Polovodiče - fyzikální základy* [online]. 2003, [cit. 2012-05-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.cez.cz/edee/content/microsites/elektrina/fyz9.htm>>
14. LUKAS TENZO. *TENZOMETRICKÝ SILOMĚR typ S-38* [online]. 2011, [cit. 2012-05-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.lukas-tenzo.cz/?i=220/tenzometricky-silomer-s-38>>
15. Mettler Toledo. *7566 Truck Scales* [online]. 2012 [cit. 2012-05-23]. Dostupné z WWW: <http://cs.mt.com/cz/cs/home/products/Transport_and_Logistics_Solutions/vehicle_scales_tls/offroad_weighbridges_tls/7566_Truck_Scales_Double_Width.html>
16. Natis s.r.o. *Snímač momentu model TLSQ* [online]. 2009 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.natis.cz/snimace-momentu/snimac-momentu-model-tlsq.htm>>
17. Omegaeng. *LCFD: Miniaturní vážní čidla* [online]. 2011 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.omegaeng.cz/ppt/pptsc.asp?ref=LCFD>>
18. Satec. *Vážení a dávkování* [online]. 2012 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.satec.cz/vazeni-a-davkovani>>
19. STRAKA, M. *Měření tíhy s využitím LTCC technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 52 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Kosina
20. SZENDIUCH, Ivan. *Tenkové vrstvy* [online]. 2009 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2009-BMTS-5-tenke-vrstvy.pdf>>
21. Univer. *Sada momentového klíče a zástrčných klíčů HAZET 6292-1 CT/28* [online]. 2012 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.univer.cz/sada-momentoveho-klice-a-zastrcnych-klicu-hazet-6292-1-ct-28-id1975>>
22. Uticell s.r.o. *Snímač sil M120* [online]. 2012 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.utilcell.com/?page=produkt-detail&product=91>>
23. VLK, Miloš, Lubomír HOUFEK, Pavel HLAVOŇ, Petr KREJČÍ, Vladimír KOTEK a Jiří KLEMENT. *Experimentální mechanika* [online]. Brno, 2003 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z WWW: <http://www.umt-old.fme.vutbr.cz/_studium/_opory/Experimentalni_mechanika.pdf>
24. VOJÁČEK, Antonín. *Fóliové tenzometry - princip, provedení, použití, historie*. [online]. 2005 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z WWW: <<http://automatizace.hw.cz/clanek/2005111201>>

25. VOJÁČEK, Antonín. *Polovodičové tenzometry - princip, provedení, použití, historie*. [online]. 2006 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z WWW: <<http://automatizace.hw.cz/mereni-a-regulace/ART288-polovodicove-tenzometry--princip-provedeni-pouziti-historie.html>>
26. WASGESTIAN, Petr. *Tenzometry HBM* [online]. [cit. 2012-05-21]. Dostupné z WWW: <<http://www.hbm.cz/Aplikace/tenzometry.pdf>>
27. ZEHNULA, Karel. *Snímače neelektrických veličin*. Druhé vydání. Praha: SNTL, 1983, 371 s.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

značka	název	jednotky
b	šířka průřezu	[mm]
D	průměr	[mm]
E	Youngův modul pružnosti	[Pa]
F	síla	[N]
G	modul pružnosti materiálu v krutu	[Pa]
h	výška průřezu	[mm]
I	elektrický proud	[A]
I_m	výstupní proud	[A]
I_n	napájecí proud	[A]
k	součinitel deformační citlivosti tenzometru	[–]
k_l	deformační součinitel ve směru osy	[–]
k_t	deformační součinitel v příčném směru	[–]
l	délka	[mm]
l_0	původní délka vodiče	[mm]
M_k	krouticí moment	[N·mm]
M_o	ohybový moment	[N·mm]
n	počet cyklů	[–]
q	součinitel příčné citlivosti	[–]
R	elektrický odpor	[Ω]
R_0	počáteční hodnota odporu před změnou teploty	[Ω]
R_p	odpor doplňkového rezistoru	[Ω]
S	plocha průřezu	[mm ²]
U	elektrické napětí	[V]
U_m	výstupní napětí	[V]
U_n	napájecí napětí	[V]
W_k	modul průřezu v krutu	[mm ³]
W_o	modul průřezu v ohybu	[mm ³]
α_M	teplotní součinitel délkové roztažnosti materiálu mřížky	[K ⁻¹]
α_R	teplotní součinitel elektrického odporu	[K ⁻¹]
α_S	teplotní součinitel délkové roztažnosti materiálu měřené součásti	[K ⁻¹]
Δl	prodloužení vodiče	[mm]
ΔR_h	změna odporu způsobená tahovou silou	[Ω]
ΔR_k	změna odporu způsobená krutem	[Ω]
ΔR_o	změna odporu způsobená ohybovou silou	[Ω]
ΔR_t	změna odporu způsobená teplotou	[Ω]
ΔT	změna teploty	[K]
$\Delta \varepsilon_m$	amplituda přetvoření	[mm·m ⁻¹]
$\Delta \varepsilon_v$	posuv nulového bodu	[mm·m ⁻¹]
ε	relativní prodloužení	[mm·m ⁻¹]
ε_H	hystereze	[mm·m ⁻¹]
ε_S	deformace součásti	[mm·m ⁻¹]
ε_T	deformace naměřená tenzometrem	[mm·m ⁻¹]
μ	poissonovo číslo	[–]
π_0	piezoodporový součinitel	[–]
ρ	měrný elektrický odpor	[Ω·mm]
σ	normálové napětí	[Pa]
τ	smýkové napětí	[Pa]
ψ	poměrná deformace v příčném směru	[mm·m ⁻¹]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Příklady využití tenzometrů	9
Obr. 2 Deformační křivka	10
Obr. 3 Deformace při zatížení	10
Obr. 4 Schéma vodiče	10
Obr. 5 Hystereze.....	12
Obr. 6 Vliv creepu na měření	12
Obr. 7 Graf únavy cyklickým zatěžováním	13
Obr. 9 Teplotní deformace některých materiálů	14
Obr. 8 Schéma zapojení kompenzačního tenzometru	14
Obr. 10 Rozdělení tenzometrů	15
Obr. 11 Příložný tenzometr	15
Obr. 12 Provedení lepeného tenzometru	16
Obr. 13 Základní typy fóliových tenzometrů	16
Obr. 14 Krystalová mřížka polovodiče	16
Obr. 15 Zapojení PN přechodu	17
Obr. 16 Deformační charakteristika	18
Obr. 17 Teplotní charakteristika.....	18
Obr. 18 Základní provedení polovodičových tenzometrů.....	18
Obr. 19 Graf základních parametrů.....	19
Obr. 20 Čištění smirkovým papírem.....	20
Obr. 21 Vytlačení přebytečného lepidla.....	21
Obr. 22 Katodové naprašování.....	22
Obr. 23 Napařování	22
Obr. 24 Přivařovací vysokoteplotní tenzometr	22
Obr. 25 Schéma Wheatstonova můstku	23
Obr. 26 Celý Wheatstonův můstek	24
Obr. 27 Namáhání tah-tlak, 4 aktivní snímače v celém mostu	25
Obr. 28 Snímač tlakové/tahové síly LCFD	26
Obr. 29 Váha 7566 firmy Mettler Toledo	27
Obr. 30 Namáhání ohyb, dva snímače v polovičním můstku	27
Obr. 31 Namáhání ohyb, čtyři snímače v celém mostu	27
Obr. 32 Snímač ohybové síly M120.....	28
Obr. 33 Namáhání krut, čtyři snímače v celém mostu	28
Obr. 34 Snímač kroutícího momentu TSLQ	29
Obr. 35 Momentový klíč 6292-1 CT/28.....	29