

Přípravek pro měření krátkodobého tečení termoplastu

Vítězslav Škrabal

Bakalářská práce
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Vítězslav ŠKRABAL**

Osobní číslo: **T10115**

Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Technologická zařízení**

Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Přípravek pro měření krátkodobého tečení termoplastu**

Zásady pro vypracování:

- 1) Vypracujte literární studii na dané téma;
- 2) Zpracujte konstrukční řešení;
- 3) Proveďte kontrolní ověření funkce měřícího přípravku;
- 4) Získané výsledky vyhodnoťte a stanovte doporučení pro praktické účely.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího BP.

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Zdeněk Dvořák, CSc.

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

8. února 2013

Termín odevzdání bakalářské práce:

17. května 2013

Ve Zlíně dne 11. února 2013



doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.

děkan



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.

ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považuji se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 17. května 2013



.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odporá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává neotřčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

Číslo listu 17 z celku 27

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá krátkodobým tečením termoplastu vlivem mechanického zatížení. Snímačem dráhy a tenzometry je sledován průběh deformace a povrchového napětí termoplastu při zatěžování vzorku čtyřbodovým ohybem v čase. Výsledky práce lze uplatnit při dimenzování a navrhování konstrukcí z termoplastů jako jsou jímky, bazény, potrubí, sýpky, nádrže apod.

Klíčová slova:

4 bodový ohyb, tenzometrické snímače, deformace

ABSTRACT

This Bachelor's article is focused on short term creep of thermoplastic material due to mechanical load. During the time period the deformation and surface tension is tracked by deviation sensor and strain gauge on the sample loaded by four-point bend. The results of this article could be used for designing of thermoplastic construction as could be sumps, pools, pipelines, granaries, tanks etc.

Keywords:

4 point bend, strain gages sensors, deformation

Moje poděkování za odbornou pomoc, cenné rady a poskytnutí studijních materiálů patří vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Zdeňku DVOŘÁKOVĚ, CSc. a Ing. Ivanu ŠTUCHALOVĚ z Vojenského technického ústavu.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 OHYB NOSNÍKŮ	12
1.1 METODA ŘEZU.....	12
1.2 NAPĚTÍ A DEFORMACE PŘI PROSTÉM OHYBU	13
1.2.1 Vnější účinky	17
1.3 ČTYŘBODOVÝ OHYB.....	17
2 ODPOROVÉ TENZOMETRY	18
2.1 PRINCIP	18
2.2 KOVOVÉ TENZOMETRY	19
2.2.1 Drátkové tenzometry	19
2.2.2 Foliové tenzometry.....	21
2.2.3 Vrstvové	22
2.2.4 Označování kovových tenzometrů	23
2.3 POLOVODIČOVÉ TENZOMETRY	24
2.3.1 Provedení a výroba polovodičových tenzometrů	25
2.3.2 Označování polovodičových tenzometrů (7)	26
2.4 MĚŘÍCÍ OBVODY	27
2.5 VLASTNOSTI ODPOROVÝCH TENZOMETRŮ.....	27
2.5.1 Mezní podmínky při statické deformaci	27
2.5.2 Mezní podmínky při dynamické namáhání	27
2.5.3 Únava tenzometru	28
2.5.4 Mezní frekvence.....	28
2.5.5 Napájecí napětí.....	28
2.5.6 Creep	28
2.5.7 Hystereze.....	29
2.5.8 Vliv provozních podmínek.....	29
3 LEPENÍ TENZOMETRŮ	30
3.1 PŘÍPRAVA PLOCH K LEPENÍ.....	30
3.1.1 Hrubé čištění	30
3.1.2 Zarovnání	30
3.1.3 Odmaštění	30
3.1.4 Zdrsnění.....	30
3.1.5 Dočištění	31
3.2 PŘÍPRAVA TENZOMETRU K LEPENÍ.....	31
3.2.1 Postup lepení	32
3.2.2 Odlepení tenzometru	32
3.3 POUŽÍVANÁ LEPIDLA	32
3.3.1 Dvousložkové rychle tuhnoucí lepidlo X60.....	32
3.3.2 Jednosložkové rychle tuhnoucí lepidlo Z70.....	33
3.3.3 Epoxidová lepidla E250, E310.....	33
3.4 OCHRANA PROTI VNĚJŠÍM VLIVŮM	33
3.4.1 Ochranné materiály	33

4	VÝBĚR VHODNÉHO ODPOROVÉHO TENZOMETRU	36
4.1	DĚLKA MĚŘÍCÍ MŘÍŽKY	36
4.1.1	Homogenní pole napětí	36
4.1.2	Nehomogenní pole napětí	37
4.2	VÍCENÁSOBNÉ TENZOMETRY.....	37
4.2.1	Tenzometrické řetězce	37
4.2.2	Tenzometrické kříže a tenzometrické růžice.....	38
4.2.3	Tenzometrické růžice pro měření zbytkového napětí	39
4.3	TENZOMETRY PRO SPECIÁLNÍ POUŽITÍ.....	40
4.3.1	Přivařovací tenzometry	40
4.3.2	Tenzometry s volnou mřížkou	41
4.3.3	Přivařovací vysokoteplotní tenzometry.....	41
5	SHRNUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI.....	42
II	PRAKTICKÁ ČÁST	43
6	CÍL PRÁCE	44
7	PŘÍPRAVA MĚŘENÍ.....	45
7.1	PŘÍPRAVEK.....	45
7.1.1	Kontrolní výpočty	46
7.2	ZKUŠEBNÍ VZOREK	49
7.3	MĚŘÍCÍ SNÍMAČE A APARATURA.....	50
7.3.1	Tenzometrický snímač	50
7.3.2	Induktivní snímač dráhy.....	50
7.3.3	Měřicí aparatura	51
7.3.4	Klimatická komora.....	51
7.4	MECHANICKÉ ZATÍŽENÍ.....	52
7.5	LEPIDLO	52
7.5.1	Vlastnosti.....	53
8	POSTUP MĚŘENÍ.....	54
9	NAMĚŘENÉ HODNOTY	57
9.1	TAHOVÉ NAPĚTÍ	57
9.2	TLAKOVÉ NAPĚTÍ	58
9.3	PRŮBĚH DEFORMACE.....	58
9.4	MODUL TEČENÍ	59
	ZÁVĚR	60
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	61
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	62
	SEZNAM OBRÁZKŮ	64
	SEZNAM TABULEK.....	66
	SEZNAM PŘÍLOH.....	67

ÚVOD

V současné době je jednou z nejdůležitějších činností konstruktéra navrhnout součást či konstrukci tak, aby snesla požadované zatížení v provozních podmínkách po dobu své životnosti a přitom byla ekonomicky výhodná. K ulehčení práce nám v současné době slouží především výpočetní technika s programy, které nám umožňují simulovat namáhání působící na navrženou konstrukci a popřípadě upozornit na problémová místa. Na již vyrobené součásti se pro zjištění působících napětí s oblibou využívá tenzometrických snímačů. Mezi dnes nejrozšířenější patří tenzometry drátkové (pružná podložka z izolačního materiálu s drátkem nalepeným na povrchu), foliové (kovová folie nalepená na izolační podložce), tenkovrstvé (pásek monokrystalu polovodiče) a tlustovrstvé (vrstva odporového materiálu na keramickém substrátu). Na tenzometrický snímač může působit velké množství rušivých vlivů, mezi které patří např. teplota, hystereze, vlhkost, ztráty způsobené elektromagnetickým polem apod. Proto se tenzometrické snímače musí kompenzovat, aby se předešlo zkreslení snímané veličiny, například kombinací více snímačů nebo ochranou proti rušivé veličině. Výhodou tenzometru je jednoduchá konstrukce, z které plyne malá pořizovací cena a možnost realizace i rozměrově velkých snímačů.

Bakalářská práce je zaměřena na krátkodobé tečení termoplastu vlivem mechanického zatížení a na návrh a výrobu přípravku pro tento experiment. K zaznamenání průběhu namáhání a deformace je využito tenzometrických snímačů a induktivního snímače dráhy.

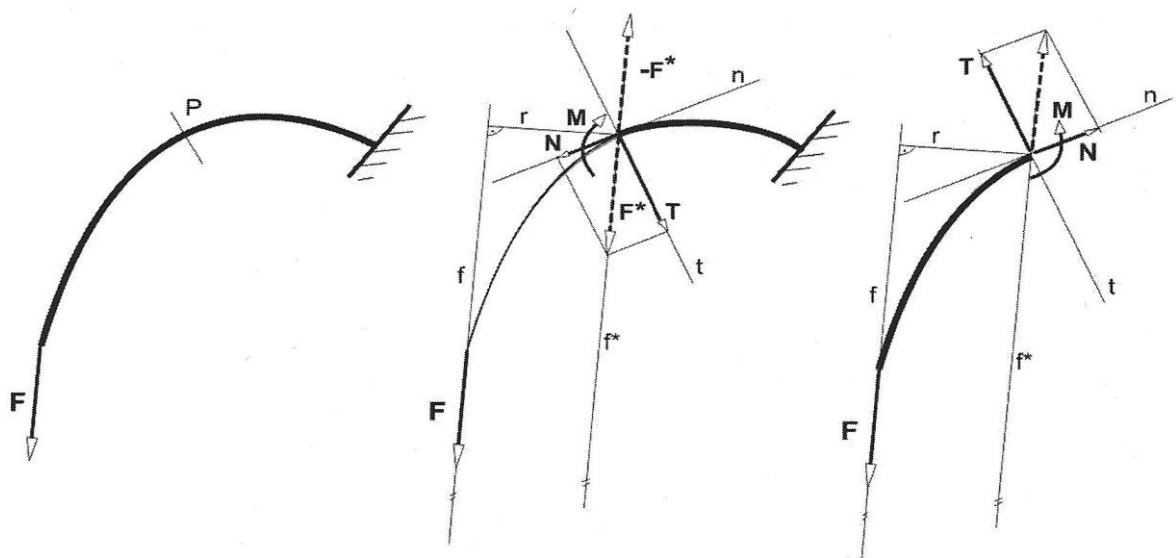
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 OHYB NOSNÍKŮ

Ohyb je druh mechanického namáhání, při němž se původně přímý prut (nosník) zakřivuje (přetváří) do rovinné nebo prostorové křivky. Za nosník pokládáme každý přímý prut, namáhaný převážně na ohyb. Toto namáhání vzniká účinkem vnějšího působení sil a momentů, které vyvolají vnitřní účinky v podobě silové dvojice v rovině řezu kolmém k podélné ose prutu, kterou nazýváme ohybový moment a označujeme M_o (2).

1.1 Metoda řezu

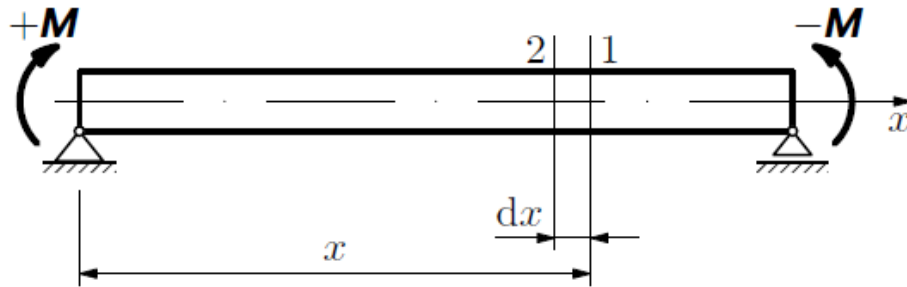
K zjišťování deformací a pevnosti ve všech vyšetřovaných místech nosníku používáme metodu řezu (Obr. 1). Tato metoda vychází z existence vnitřních silových účinků. V místě řezu definujeme lokální souřadný systém (n, t) s počátkem na střednici prutu (1). Oddělenou část nosníku nahradíme odpovídajícími silovými účinky tak, aby byla šetřená část v rovnováze. Pohybu ve svislém směru zabraňuje vnitřní příčná (posouvající) síla T , pohybu v podélném směru zabraňuje vnitřní osová (normálová) síla N a rotaci rozříznuté části nosníku zabraňuje vnitřní moment (ohybový moment) M_o .



Obr. 1. Metoda řezu.

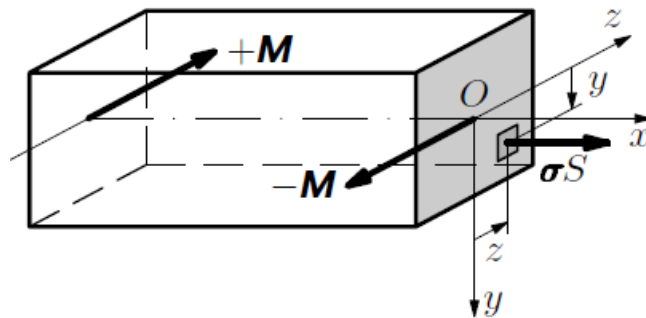
1.2 Napětí a deformace při prostém ohybu

U nosníku namáhaného ohybovým momentem $M_0 = \text{konst.}$ provedeme myšlený řez 1 ve vzdálenosti x od levé podpory (Obr. 2). Při prostém ohybu je posouvající síla T nulová a v příčném řezu působí jen normálové napětí σ (9).



Obr. 2. Nosník namáhaný ohybovým momentem.

Na element plochy dS působí vnitřní síla o velikosti σdS (Obr. 3).



Obr. 3. Oddělená levá část nosníku.

Na nosník nepůsobí žádná vnější síla ve směru osy x , proto z podmínky rovnováhy musí platit

$$\int_S \sigma dS = 0. \quad (1)$$

Rovněž celkový moment elementárních sil σdS k ose y je nulový

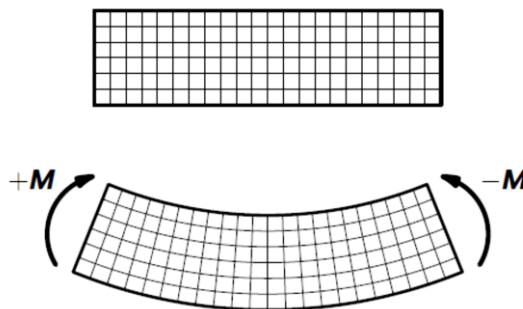
$$\int_S z \sigma dS = 0, \quad (2)$$

kdežto celkový moment vnitřních sil k ose z musí být roven $-M_0$ (moment je volen tak, že má směr záporné poloosy z). Tedy

$$\int_S y \sigma dS = -M_0. \quad (3)$$

K vyšetření ohybu u nosníků konstantního průřezu, jejichž délky jsou proti výšce dostatečně velké a jejichž šířka není proti výšce příliš velká, jsou základem dalšího řešení tyto předpoklady: (2)

- příčné řezy, které byly rovinné před deformací, zůstanou rovinné i po deformaci (Obr. 4);
- podélná vlákna na sebe netlačí a proto se účinkem normálových napětí jen lineárně prodlouží nebo zkrátí;
- je-li rovina rovinného ohybu a také zatěžovací rovina shodná s nákresem, potom deformace vláken nezávisí na jejich poloze po šířce průřezu a tedy normálová napětí, která se po výšce mění, zůstávají po jeho šířce stejná;
- materiál nosníků se řídí Hookovým zákonem.



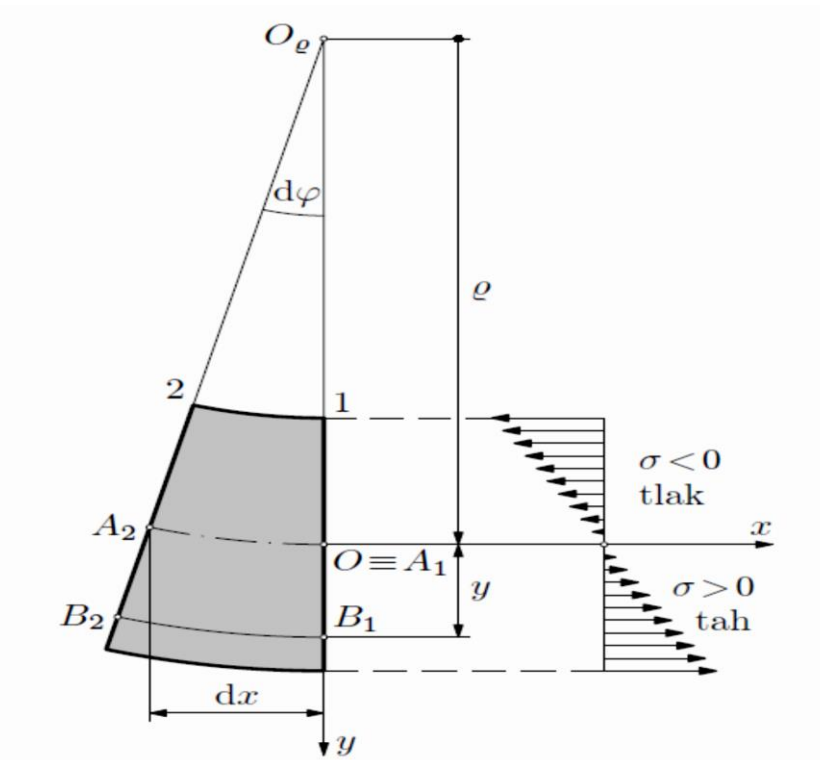
Obr. 4. Deformační hypotéza pro prostý ohyb.

Uvažujme dva souměrné původně rovnoběžné řezy **1** a **2** (Obr. 2), které se po deformaci nosníku vzájemně natočí o úhel $d\varphi$ (Obr. 5). Roviny proložené deformovanými průřezy se protnou v ose, která je kolmá k nákrešně. Na této ose leží středy křivosti deformovaných podélných vláken elementu nosníku (9).

Délka vlákna A_1A_2 se nemění. Plocha, v níž leží tato vlákna, se nazývá neutrální plocha. Poloměr křivosti vlákna A_1A_2 označíme ρ . Pro délku tohoto vlákna při malých deformacích můžeme psát $A_1A_2 = \rho d\varphi = dx$. Vlákno B_1B_2 , které je ve vzdálenosti y od neutrální plochy, má po deformaci délku $B_1B_2 = (\rho + y) d\varphi$ (9).

Jeho relativní prodloužení je

$$\varepsilon = \frac{B_1B_2 - A_1A_2}{A_1A_2} = \frac{(\rho + y)d\varphi - \rho d\varphi}{\rho d\varphi} = \frac{y}{\rho} \quad (4)$$



Obr. 5. Deformovaný element nosníku při prostém ohybu.

Z Hookova zákona plyne pro napětí ve vlákně B_1B_2

$$\sigma = E\varepsilon = E \frac{y}{\rho}. \quad (5)$$

Napětí se lineárně mění se souřadnicí y elementu měřenou od neutrální plochy. Dosadíme-li (5) do (1), dostaneme podmínku

$$\frac{E}{\rho} \int_S y dy = 0, \quad (6)$$

z níž plyne, že statický moment průřezu k ose z musí být nulový, čili neutrální plocha prochází těžištěm průřezu. Dosadíme-li (4) do rovnice (3), dostaneme

$$M_o = -\frac{E}{\rho} \int_S y^2 dS = -\frac{E}{\rho} J_z, \quad (7)$$

kde

$$J_z = \int_S y^2 dS \quad (8)$$

je veličina, která závisí jen na tvaru a velikosti plochy průřezu a nazývá se kvadratický moment průřezu k ose z s jednotkou m^4 .

Ze vztahu (7) plyne

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{M_o}{EJ_z}, \quad (9)$$

tedy křivost deformovaného nosníku je přímo úměrná ohybovému momentu M_o . Protože u vyšetřovaného prostého ohybu je $M_o = \text{konst.}$, je jeho křivost konstantní a ohybovou čarou je oblouk kružnice. Veličina EJ_z se nazývá tuhost v ohybu.

Pro výpočet napětí dosadíme (9) do (5):

$$\sigma = -\frac{M_o}{J_z} y. \quad (10)$$

Maximální hodnota tohoto napětí je pro $|y| = |y|_{max}$, tedy

$$|\sigma|_{max} = \frac{|M_o|}{J_z} |y|_{max}. \quad (11)$$

Tento výraz se píše ve zjednodušeném tvaru, který je významný pro pevnostní výpočty:

$$|\sigma|_{max} = \frac{|M_o|}{W_o}, \quad (12)$$

kde

$$W_o = \frac{J_z}{|y|_{max}} = \frac{1}{|y|_{max}} \int_S y^2 dS \quad (13)$$

je průřezový modul v ohybu s jednotkou m^3 .

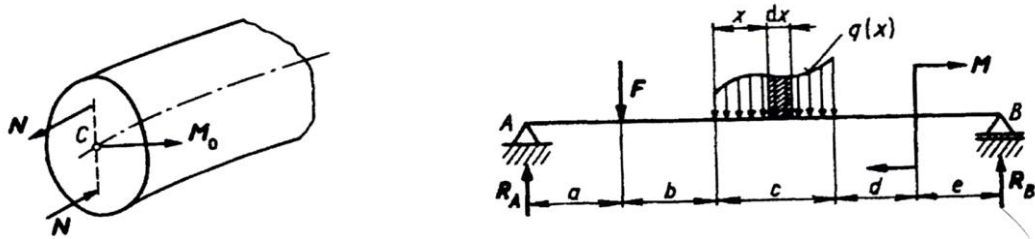
Při návrhu nosníku musí být splněna podmínka

$$|\sigma|_{max} = \frac{|M_o|_{max}}{W_o} \leq \sigma_d. \quad (14)$$

1.2.1 Vnější účinky

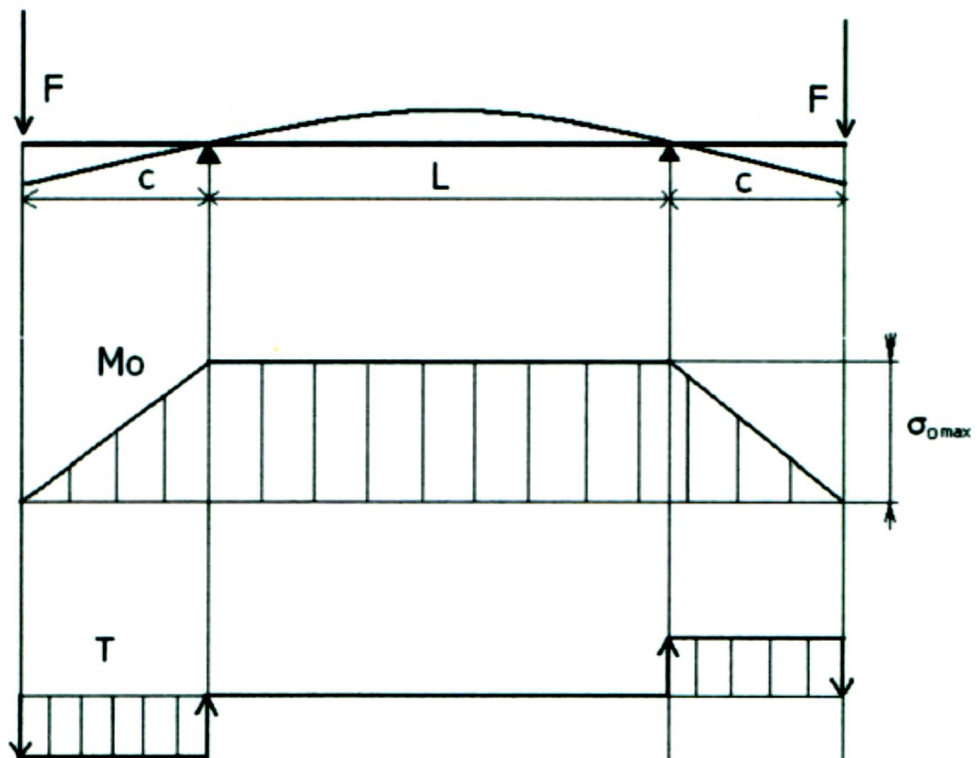
Vnější účinky (Obr. 6) mohou zajišťovat: (2)

- osamělé síly kolmé k ose prutu, jejichž výslednice působí na nosník;
- spojitá zatížení, která působí na nosník v určité délce;
- silové dvojice (momenty), působící v rovině kolmé k podélné ose řezu.



Obr. 6. Typy vnějších zatížení nosníku.

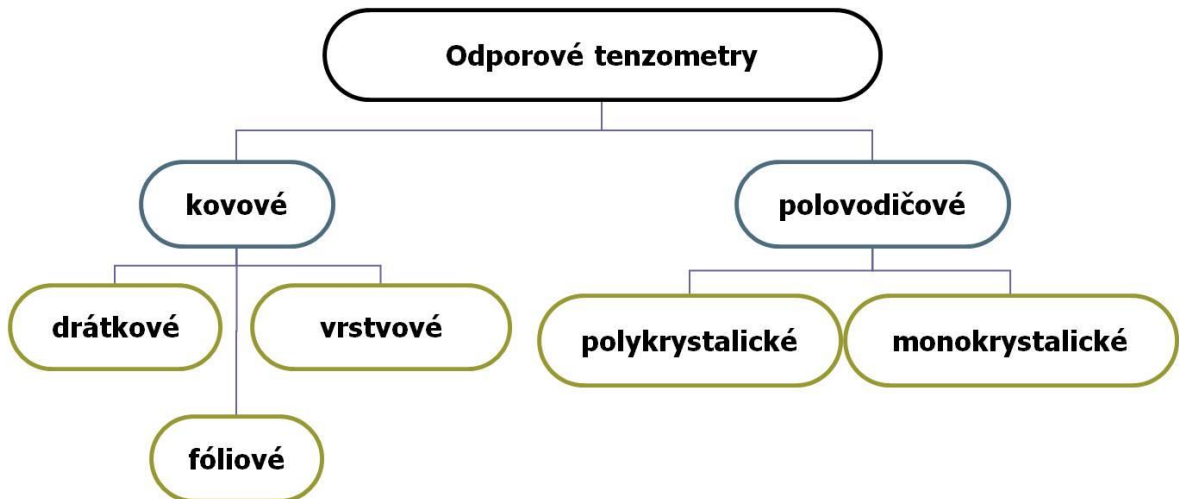
1.3 Čtyřbodový ohyb



Obr. 7. Průběh ohybového momentu a posouvajících sil.

2 ODPOROVÉ TENZOMETRY

Jedná se o zařízení sloužící k měření deformace na povrchu zatěžovaného tělesa, která je převedena na změnu elektrického odporu.



Obr. 8. Rozdělení odporových tenzometrů.

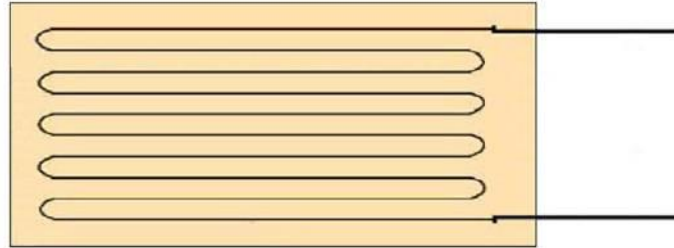
2.1 Princip

Tenzometrický snímač pracuje na principu změny ohmického odporu vodiče při prodlužování a současném zužování příčného profilu. Při zatížení vyšetřovaného tělesa dochází k deformaci krajních vláken. Tato deformace je přenesena na tenzometrický snímač čímž dochází k deformaci odporového drátku (tyčinky) a tím i změně odporu snímače.

V současné době se tenzometry vyrábějí ve dvou základních provedeních, a to kovovém a polovodičovém (křemíkovém). U kovových tenzometrů je změna ohmického odporu způsobena změnou průřezu drátku měřicí mřížky a její délky, u polovodičových tenzometrů ve tvaru tyčinky, je způsobena především změnou jejího měrného odporu – což je primární projev piezorezistentního jevu. Předností polovodičových tenzometrů je vysoká citlivost, která je přibližně 60 krát větší než u kovových tenzometrů.

2.2 Kovové tenzometry

2.2.1 Drátkové tenzometry



Obr. 9. Drátkový tenzometr.

- *Lepené*
 - s podložkou

Je to nejstarší typ tenzometru. Měrná mřížka je vytvořena z drátku a připevněna na podložku lepidlem. V experimentální pružnosti slouží ke zjišťování jedno i víceosé napjatosti, zbytkového napětí, k vyšetřování koncentrátorů a gradientů napětí v oblastech pružných i plastických deformací. Speciální typy umožňují měření při extrémních teplotách -270 až $+950$ C, měření při dlouhodobém vysokém dynamickém namáhání (1000 cyklů při ± 4000 $\mu\text{m/m}$) (4). Volbou materiálu drátku je možno vytvářet samokompenzovatelné tenzometry pro různé druhy materiálů s minimální délkou aktivní mřížky 1 mm.

U drátkových tenzometrů je zaručován malý rozptyl odporu, malý rozptyl **K**-faktoru i teplotních součinitelů, což je důležité pro vyloučení rušivých vlivů při současném měření více tenzometry. Jejich cena je přijatelná a pro bohatý sortiment tenzometrů existuje odpovídající sortiment lepidel. Jejich nevýhodou je omezená dosažitelná hodnota odporu (je omezena rozměry mřížky a průměry drátku), malý **K**-faktor (Tab. 1) a tečení, které se projevuje obzvláště při zvýšených teplotách.

- bez podložky

(I tyto tenzometry bývají označovány jako „tenzometry s volnou mřížkou“)

Použití: vysokoteplotní tenzometry připevňované keramickým tmelem.

Tab. 1. Materiál a koeficient deformace kovových tenzometrů.

Materiál	Složení	Koeficient deformace K
Konstantan	57 Cu, 43 Ni	2,05
Karma	73 Ni, 20 Cr, resp Fe+Al	2,1
Nichrome V	80 Ni, 20 Cr	2,2
Platina – wolfram	92 Pt, 8W	4
Cermet	CrSi, CrSi ₂	2

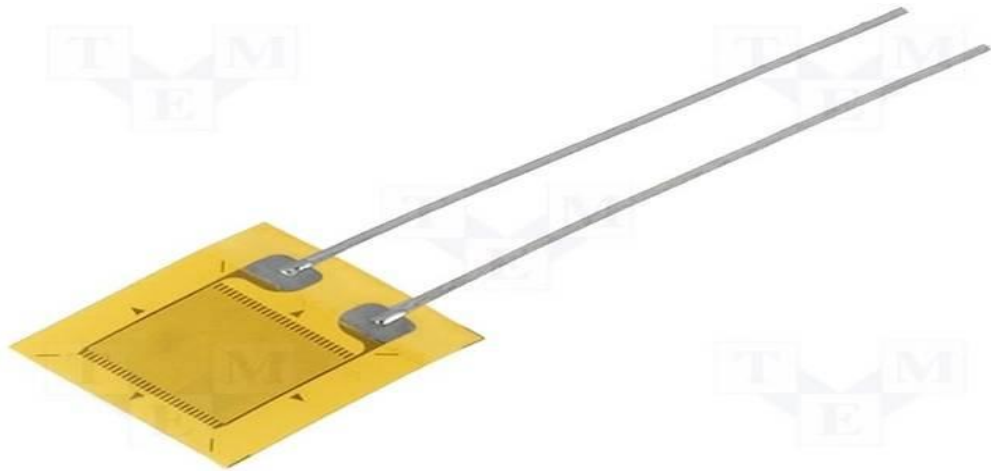
Koeficient deformace **K** vyjadřuje závislost změny odporu na změně rozměru měřící části tenzometru.

- ***S volnou mřížkou (nelepené)***

U těchto snímačů jsou odporové drátky uchyceny mezi soustavou držáků – izolačních kuliček (safír) - tak, aby při působení měřené veličiny docházelo ke změně jeho délky a tudíž ke změně jeho odporu. Aktivní odporový článek tedy není přilepen a odpadá tak problémy s přenosem deformace na celý povrch odporového článku. Další výhodou tohoto uspořádání je možnost použití při vyšších teplotách (až 310 °C). Mají též malou hysterezi a malý posun nulového bodu. Nedostatkem je poměrně nízký rezonanční frekvence (jednotky kHz a menší) a poměrně dlouhá doba potřebná k dosažení tepelné rovnováhy. Jejich výroba je velmi náročná na mechanické provedení.

Používají se jako příložené odporové tenzometry, snímače pro měření tlaků (drátek navinutý za tepla na povrchu tlustostěnné trubky pro měření velkých tlaků), tlakových sil, zrychlení apod.

2.2.2 Foliové tenzometry



Obr. 10. Foliový tenzometr.

V současné době to jsou nejužívanější kovové tenzometry (Obr. 10).

Měřicí mřížka je vytvořena z folie (minimální tloušťka pouze 5 μm) a je připevněna na podložku lepidlem. Tvar měřicí mřížky je vytvořen většinou leptáním. Podložka bývá nejčastěji z polyamidu nebo to jsou skelnými vlákny vyztužené fenolové filmy (tloušťka asi 20 μm). Výrobní technologie je ve světě tak dokonalá, že umožňuje vytvoření ekvivalentu ke každému druhu drátkových tenzometrů (mimo druhy s volnou měřicí mřížkou). Ekvivalent zde však musíme správně chápat jako „odpovídající druh“, ne jako „náhradu“, protože lepší podmínky pro převod deformace ze základního materiálu na folii a pro přenos tepla z folie na základní materiál a naopak dávají foliovým tenzometrům předpoklady pro dosažení lepších metrologických vlastností než u drátkových.

U foliových tenzometrů může být navíc snadno vytvořena libovolná konfigurace měřicí mřížky (minimální délka 0,4 mm) a může být použito vyššího napájecího napětí (důležité u miniaturních tenzometrů a snímačů mechanických veličin).

Dalším krokem při výrobě snímačů je vyleptání všech měřicích mřížek včetně jejich propojení a kompenzačních odporů z jedné folie. Jako jeden celek je potom tento pásek nalepen na měřený objekt.

Při konstrukci velmi malých snímačů však nalepení foliových tenzometrů (majících podložku z plastické hmoty) na tenkostěnný kovový pružný prvek snímače má za následek nepříznivé hodnoty některých charakteristik, jako jsou tečení (creep) a hystereze (4). Tyto nedostatky však nemají tenzometry vrstvé.

2.2.3 Vrstvové

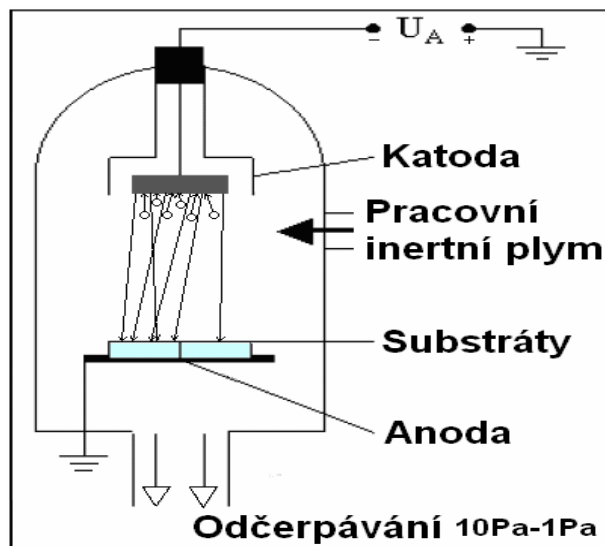
Příprava vrstevných tenzometrů:

Na pružinový materiál se nejdříve nanese dielektrická keramická vrstva a pak kovová vrstva. Pak následuje nanesení fotocitlivé masky, expozice požadovaným obrazcem snímače a odstranění neexponovaných částí kovové vrstvy.

Touto metodou se dosáhne vysokého odporu, libovolné konfigurace měřicí mřížky a dobrý přenos deformace pružinového materiálu na vlastní mřížku, dlouhodobou stabilitu a reprodukovatelnost měření.

Tato technika se užívá téměř výlučně pro konstrukci snímačů tlaku. Tenzometry jsou vytvořeny přímo na zadní straně měřicí membrány. Příslušná elektronika je na destičce plošných spojů, která je pružná a je přímo přichycena na snímací prvky. Tím odpadá připojení drátků pájením, které je vždy velmi choulostivé na vibrace a tlakové rázy. Ve snímačích se používá zákaznický integrovaný obvod, který lze zevně softwarově nastavit pro různé hodnoty proudových nebo napěťových výstupů.

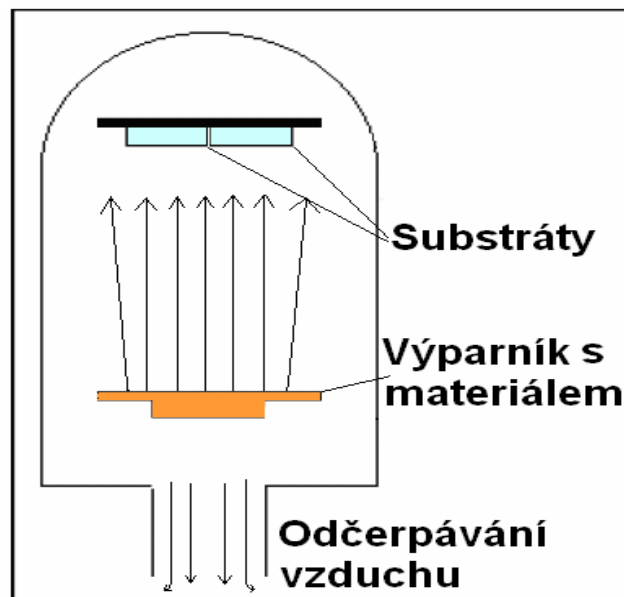
- **Katodové rozprašování (naprašování)**



Obr. 11. Katodové naprašování.

V principu jde o to, že materiál, který chceme nanášet, použijeme jako katody systému s doutnavým výbojem v inertním plynu (např. argonu nebo xenonu) při tlaku desetin až setiny torru a napětí několika kV. Podložky, na nichž chceme vytvořit vrstvu jsou položeny na anodě.

- *Vypařování (napařování) ve vakuu (vakuové napařování)*



Obr. 12. Vakuové napařování.

Je to v současné době nejrozšířenější metoda přípravy tenkých vrstev. Jak je známo, zahříváním se uvolňují z každé pevné nebo kapalné látky atomy nebo molekuly a v uzavřeném systému se při dané teplotě ustaví určitý rovnovážný tlak takto vzniklých par, který nazýváme tenzí nasycených par. Není-li systém v rovnováze a je-li v určité části teplota nižší, pak v této části páry kondenzují a vytvoří se tak podmínky pro přenos látky z vypařovacího prvku na chladnější podložku. Nemá-li docházet k příliš velkému rozptylu proudu vypařovaných částic, je nutno užívat tlaků 10^{-5} torru. Z požadavku na extrémní hodnoty čistoty vrstvy pak plyne nutnost tlaků menších než 10^{-8} torru.

2.2.4 Označování kovových tenzometrů

Jedná se o označování a členění tenzometrů firmy HBM.

LY11-3/120 A

Počet mřížek a jejich vzájemná poloha.

L – 1 mřížka, lineární

D – 2 mřížky, paralelní uspořádání

X – 2 mřížky, uspořádání do **T** nebo **X** o 90° přesazeny

R – 3 mřížky, růžice

V – 4 mřížky, plný most

M – plný most, membránová růžice

K – tenzometrické řetězce pro zjišťování napěťových gradientů

LY11-3/120 A

Série.

C – nosič a krytí: polyamid, mřížka: Cr-Ni slitina

Y – nosič a krytí: polyamid, mřížka: Konstantan

G – nosič a krytí: skelným vláknem vyztužená fenolová pryskyřice
mřížka: Konstantan

K – nosič a krytí: skelným vláknem vyztužená fenolová pryskyřice
mřížka: Konstantan, 3 druhy přizpůsobení na creep

V – nosič: polyamid, mřížka: Konstantan, zapouzdřené
v umělé hmotě, 3m kabel

LY11-3/120 A

Uspořádání, typ a poloha připojení.

LY11-3/120 A

Teplotní kompenzace.

1 – Feritická ocel

3 – Hliník

5 – Austenitická ocel

6 – Křemík

7 – Titan / šedá litina

8 – Umělá hmota

9 – Molybden

LY11-3/120 A

Délka mřížky v mm.

LY11-3/120 A

Odpor mřížky v Ohmech.

LY11-3/120 A

Options.

A – aplikační pomůcky

V – 4-vodičové zapojení

Z – 2-vodičové zapojení

2.3 Polovodičové tenzometry

Předností polovodičových tenzometrů je vysoká citlivost, až 60x větší než u kovových tenzometrů (6). To umožňuje konstruovat snímače velmi malých rozměrů s vysokou tuhostí jejich měrných členů. Tím lze dosáhnout i širokého frekvenčního rozsahu měření

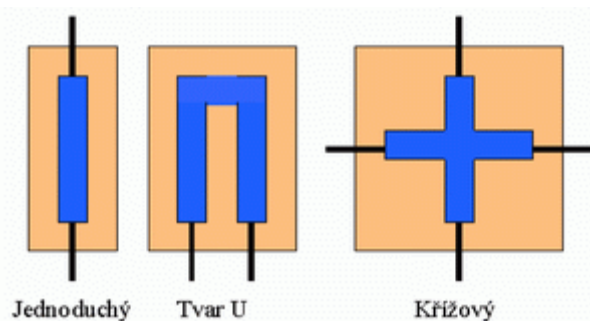
od statických hodnot až do několika kilohertzů. Sloučená chyba kolem 0.5% je pro praxi většinou vyhovující. Hystereze je minimální a mezní počet cyklů (únavová životnost) při opakovaném namáhání souměrnou střídavou deformací je větší než 10^7 . Nevýhodou je však velká odchylka od lineární charakteristiky a značná teplotní závislost.

2.3.1 Provedení a výroba polovodičových tenzometrů

Polovodičové tenzometry jsou vytvořené difúzí nečistot do tenké vrstvy čistého křemíku. Deformací takto vytvořených rezistorů se mění výrazně pohyblivost nosičů nábojů a tím i vodivost. Tento jev se nazývá piezodoporový efekt. Polovodičové tenzometry jsou malé a citlivé, ale silně teplotně závislé.

Polovodičové tenzometry se vyrábí z křemíkového materiálu z důvodu zanedbatelné mechanické a krystalografické hystereze a použitelnosti pro širší rozsah teplot. Vyrábí se buď řezáním, broušením či leptáním monokrystalu nebo planárně difúzní technologií na křemíkový substrát.

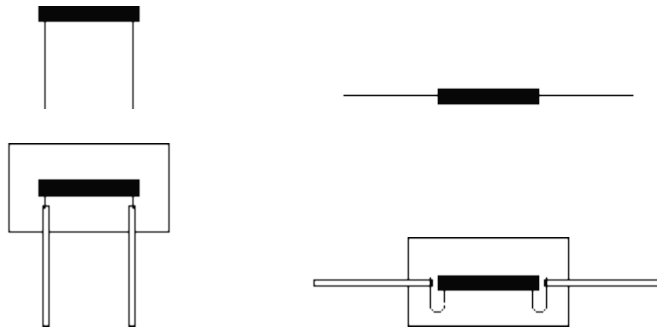
Polovodičové tenzometry jsou vyráběny nejprve mechanickým oddělováním (řezáním) z patřičně dotovaného monokrystalu křemíku, dále mechanickým opracováním směřujícím k žádanému tvaru (Obr. 13) a rozměrům a nakonec chemickým opracováním. Aktivní délka polovodičových pásků mezi zlatými vývody je 2 až 10 mm, šířka 0,2 až 0,4 mm a tloušťka 0,01 až 0,03 mm. Ohmický odpor je nejčastěji 120Ω nebo 350Ω . Nároky na tmel spojující polovodičové tenzometry s měřeným objektem jsou vyšší než u kovových tenzometrů.



Obr. 13. Tři nejběžnější tvarová provedení polovodičových tenzometrů.

Tenzometrický rezistor se obvykle skládá z vlastního snímače a podložky (Obr. 14), která zajišťuje přenos deformace z povrchu měřeného objektu na vlastní čidlo. Současně tvoří podložka elektrickou izolaci. Polovodičové tenzometry se lepí přímo na měřený objekt

nebo na fenolformaldehydovou podložku. Podložka se na povrch měřeného objektu lepí speciálními lepidly (epoxidové pryskyřice, celuloid atd.).

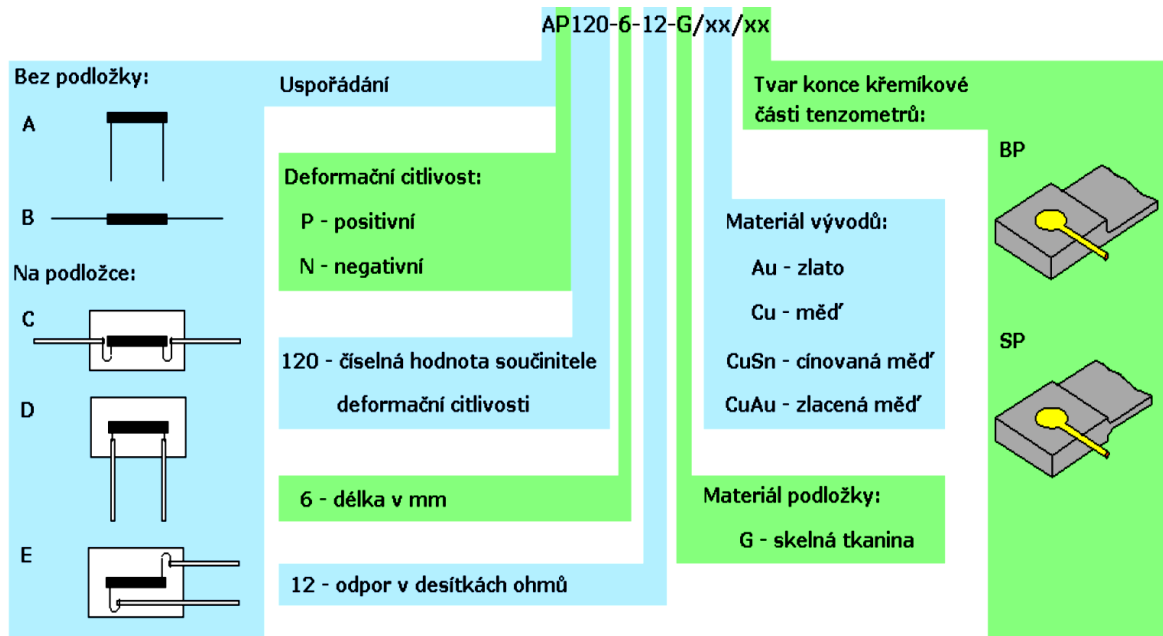


Obr. 14. Typy polovodičových tenzometrů bez (nahore) a s podložkou (dole).

Druhy polovodičových tenzometrů: (3)

- monokrystalické - lze dále rozdělit na klasické lepené a na difundované do Si substrátu;
- polykrystalické – napařované, naprašované.

2.3.2 Označování polovodičových tenzometrů (7)



Obr. 15. Význam označení polovodičových tenzometrů.

2.4 Měřicí obvody

Aby se dala měřit deformace s nalepenými tenzometry, musí být připojeny k elektronickému obvodu, jenž je schopen odpovídající změny odporu snímat. Převodníky pro tenzometry mají obvykle vstupy pro čtyři tenzometry elektricky spojeny do Wheatstoneova můstku. V současné době se také používá zapojení do tzv. polovičního Wheatstoneova můstku, který využívá dvou rezistorů umístěných uvnitř zesilovače a společně s měřicími tenzometry tvoří plný můstek. Wheatstoneův můstek je také velmi vhodný pro teplotní kompenzaci (5). V každém obvodu jsou zapojeny dva tenzometry, jeden aktivní a jeden jako kompenzační. Kompenzační slouží k eliminaci vlivu teploty a je přilepen v blízkosti měřicího tenzometru na destičku z materiálu, jako je měřená součást. Destička je k součásti přilepena tak, aby nedocházelo k přenosu napětí na destičku. Před měřením je zapotřebí můstek vyvážit, tj. napětí na $U_m = 0$. Jakmile dojde ke změně odporu aktivního tenzometru v důsledku deformace rovnováha můstku se poruší a na svorkách U_m se objeví rozdíl napětí. Výstupní napětí Wheatstoneova můstku se vyjadřuje v mV na Volt (mV/V) napájecího napětí.

2.5 Vlastnosti odporových tenzometrů

2.5.1 Mezní podmínky při statické deformaci

Použití běžných tenzometrů je omezeno na interval $\varepsilon = \pm 3000 \mu\text{m/m}$ (4). V některých případech je však nutné měřit i za touto hranicí. Maximální měřitelné přetvoření závisí na konstrukci tenzometru a na jeho materiálu. Existují speciální tenzometry, které umožňují měřit přetvoření až do 20 cm/m.

Měřicí mřížka tenzometru v plastické oblasti ztrácí svoje původní vlastnosti. Není proto možné v této oblasti provádět opakovaná měření a nebo jen ve velmi úzkém rozsahu. Není také praktické provádět měření na gumách a podobných materiálech. Při měření velkých přetvoření dochází k nárůstu nelinearity a ta jednak na straně tenzometru, tak i na straně Wheatstonova můstku.

2.5.2 Mezní podmínky při dynamické namáhání

Tenzometry lze bez problémů používat pro dynamická měření. Protože mají minimální hmotnost, nedochází k ovlivnění měřeného místa. Při dynamických měření je třeba brát ohled na dva limitující faktory:

- únavové a lomové vlastnosti tenzometru;
- horní frekvenci, kde lze spolehlivě měřit.

2.5.3 Únava tenzometru

V případě zatěžování tenzometru konstantní amplitudou může dojít občas k nerovnoměrnosti v indikaci amplitudy zatěžující síly a nebo tvarovému zkreslení. Tento problém vzniká v měřicí mřížce a přípevnovacích kontaktech. Z řady provedených experimentů vyplynulo, že tenzometry s dlouhou měřicí mřížkou mají poněkud lepší únavové vlastnosti než tenzometry s krátkou mřížkou.

2.5.4 Mezní frekvence

V případě zatěžování, které vyvolává v materiálu vznik podélných vln, jako jsou třeba rázy, může dojít ke stavu, kdy přetvoření, které vzniká pod tenzometrem má tak malou vlnovou délku, že tenzometr svojí integrační schopností dokáže zprůměrovat vzniklé špičky a udává nám pouze střední hodnotu přetvoření. Pro správné měření musí být poměr aktivní délky tenzometru a vlnové délky procházejícího podélné vlny co nejmenší. Jen v tom případě změříme skutečnou špičkovou hodnotu. Pro měření rázů a rychlých dynamických dějů se doporučuje používat tenzometry s maximální délkou mřížky 3-6mm.

2.5.5 Napájecí napětí

Když tenzometrem o odporu 120Ω protéká např. napětí 5V, je proudové zatížení přibližně 20 mA (4). Potom i poměrně malá změna napětí může způsobit při extrémně nízkých příčných průřezech velkou proudovou zátěž. Ta následně může způsobit ohřátí tenzometru, přehřátí měřicí mřížky a krycí vrstvy, ohnutí podložky, způsobit hysterezi, creep a nestabilitu nulového bodu. Z tohoto důvodu udává výrobce maximální možnou napěťovou zátěž tenzometru.

2.5.6 Creep

Efekt creepu se projevuje při instalaci tenzometru na měřené místo, kdy v případě konstantního statického zatížení po čase dochází k poklesu měřené veličiny. Creep způsobují materiálové vlastnosti jednotlivých vrstev, pomocí kterých je přetvoření přenášeno k měřicí mřížce. Efekt creepu se více projevuje u tenzometrů s kratší aktivní měřicí délkou.

2.5.7 Hystereze

Hystereze u tenzometrů je rozdíl v hodnotě naměřené změně odporu při vzrůstu a následném poklesu přetvoření na stejné úrovni přetvoření. Jako i jiné parametry, tak i hystereze nezávisí jen na tenzometru, ale i řadě jiných parametrů, které nám definují měřené místo (přípevnění, podložka, atd.) Experimenty ukazují, že hystereze se s počtem zatěžovacích cyklů snižuje, až se ustálí na konstantní hodnotě.

2.5.8 Vliv provozních podmínek

Provozní podmínky zahrnují nejen vlivy na tenzometr, ale i vlivy na měřící místo. Přesnost měření ovlivňuje mnoho faktorů, jako např. kvalita přípevnění, zahrnující jak pečlivou přípravu měřícího místa, tak i jeho následné efektivní zabezpečení apod.

Ovlivňující faktory:

- Vlhkost;
- Hydrostatický tlak;
- Radioaktivní záření;
- Magnetické pole.

3 LEPENÍ TENZOMETRŮ

3.1 Příprava ploch k lepení

Podmínkou dobrého spojení je zdrsňená, přilnavá plocha. Nekomové povrchy se připravují v zásadě shodně s povrchy kovovými. Lepené plochy musí být zbavené mastnot a podle možnosti i zdrsňené.

3.1.1 Hrubé čištění

Rez, okuje, nátěry a podobná hrubá znečištění je nezbytné odstranit v dostatečném rozsahu okolo místa lepení.

3.1.2 Zarovnání

Jamky, poškrábání, hrbolatost a další nerovnosti je nutné opílovat, zbrousit nebo odstranit jiným vhodným způsobem.

3.1.3 Odmaštění

Volba vhodných odmašťovacích prostředků a rozpouštědel závisí na způsobu znečištění i na odolnosti čištěného předmětu vůči použitému čisticímu prostředku. Vhodná jsou silná rozpouštědla mastnot, methylethylketon, aceton. Vosky a podobné látky se rozpouštějí v toluenu.

Čištěná plocha se otře netkanou látkou, napuštěnou rozpouštědlem. Napřed se vyčistí větší plocha kolem místa lepení a postupně se čistí stále menší plocha, aby se nečistoty z okraje nedostávaly na místo lepení. Větší plochy se vyčistí nejdříve vodou a čisticím práškem, pak se opláchnou. Na vyčištěné ploše musí zůstat neporušený vodní film, který se vysuší netkanou látkou. Vhodný způsob čištění je ultrazvuková lázeň nebo čištění horkou párou.

Rozpouštědla musí být chemicky čistá a nesmějí po nich zůstat žádná rezidua; technická čistota rozpouštědel není dostačující! Nepoužívá se rozpouštědlo přímo ze zásobní láhve, vždy se část oddělí do vhodné čisté nádoby. Zbylé rozpouštědlo nikdy nenaléváme zpět do zásobní láhve. Jednou použitá čisticí látka nebo tampon se už nepoužívá znovu, ale vyhodí se. Zásadně je znovu nenamáčíme do rozpouštědla.

3.1.4 Zdrsňení

Lehce zdrsňený povrch dodává lepidlu nejlepší přilnavost. Toho se dosáhne naleptáním nebo pískováním ostrým brusným materiálem, např. pískovacím korundem (o zrnitosti asi

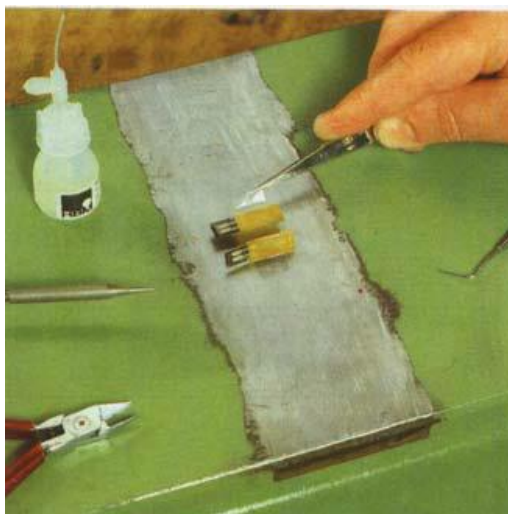
80 -100). Tlakový vzduch a pískovací materiál musí bezpodmínečně být zbavené mastnot. Kde není možné použít leptání ani pískování, zdrsni se povrch smirkovým papírem (o zrnitosti např. 180 nebo 300). Mechanická, popř. chemická úprava povrchu musí proběhnout krátce před lepením, aby se znovu nevytvořily oxidační vrstvy.

3.1.5 Dočištění

Prach a nečistoty vzniklé při zdrsňování se musí pečlivě odstranit. K tomu se použije rozpouštědlo a netkaná látka. Látka se uchopí čistou pinzetou a jeden tampon se použije pouze pro jeden tah. V čištění se pokračuje tak dlouho, dokud jsou na látce viditelné stopy nečistot. Případná vlákna z látky se odstraní hedvábným papírem. Rozhodně se neodstraňují vlastním dechem. Lepené místo – místo měření se nechá dobře vyschnout a už není dovoleno se jej dotýkat prsty.

3.2 Příprava tenzometru k lepení

Lepená strana tenzometru se opatrně očistí kouskem netkané látky, napuštěné freonem. V případě potřeby se přichytí kontaktní plochy tenzometru lepicí páskou, tou se přitom zakryjí také integrované pájecí body. K přilepení tenzometru i pájecích bodů tak stačí jediná operace. V případě silně zakřivených ploch je zapotřebí tenzometry z fenolových pryskyřic předem zformovat např. horkým vzduchem, nebo podle modelu, vyhřátého na 150°C (4). Polyamidové tenzometry tuto přípravu nepotřebují. Tenzometr se umístí a vyrovná na požadovaném místě (Obr. 16) a přichytí se lepicí páskou na jedné straně, aby se tenzometr dal odklápět.



Obr. 16. Příprava tenzometru při lepení.

3.2.1 Postup lepení

Tenzometr se odklopí, na lepenou plochu se nanese dostatečné množství lepidla (vrstva je tloušťky asi 0,5 mm), tenzometr se přiklopí zpět, překryje se proužkem celofánu nebo teflonové fólie a otáčivým pohybem palce se vytlačí přebytek lepidla, přičemž se dbá, aby se tenzometr nestrhnul ani neposunul. Zbývající vrstva lepidla by měla být co nejtenčí, asi 0,05 mm až 0,08 mm. (Vrstva lepidla na tenzometru zabraňuje vniknutí vzduchových bublin.) Při pokojové teplotě se tenzometr podrží přitisknutý palcem určitou dobu, podle typu použitého lepidla a pak se nechá volně vytvrdit. Při teplotách kolem 0°C je nutné držet tenzometr přitisknutý silou asi 10 N až 20 N po dobu 20 až 30 minut (4). Jakmile lze celofán nebo folii beze zbytku sejmout, může se začít s připevňováním vodičů k tenzometru. Pokud jsou přívody tenzometru pro přebytek lepidla nepřístupné, lze lepidlo roztavit pájkou a současně přívody vytáhnout pinzetou. Pokud se očekávají velká zatížení nebo činnost při nízkých teplotách, nesmí na tenzometru zůstat silné vrstvy lepidla. V takovém případě mají tenzometry tendenci odskočit.

3.2.2 Odlepení tenzometru

Pokud není možné přilepený tenzometr uvolnit mechanicky, lze jej uvolnit acetonem, methylethylketonem nebo podobnou látkou. Tenzometry z fenolových pryskyřic a polyamidové pouze bobtnají a jejich uvolnění trvá dlouho, protože rozpouštědlo může k lepidlu pronikat jen pomalu. Předměty malých rozměrů se do rozpouštědla ponoří, u větších dílů se položí na místo lepení chomáč vaty napuštěný rozpouštědlem a překryje se polyethylenovou fólií, aby se omezilo odpařování rozpouštědla.

3.3 Používaná lepidla

3.3.1 Dvousložkové rychle tuhnutí lepidlo X60

Rychle tuhnutí lepidlo X60 je určeno k nalepování tenzometrů na měřené těleso. Je vhodné pro tenzometry se spodní nosnou částí vyrobenou z polyamidu a fenolové pryskyřice. Mezi jeho přednosti patří jednoduché použití a krátká doba přípravy k lepení. X60 se váže na všechny běžné kovy a řadu nekovových materiálů jako např. beton, porcelán, sklo, plasty. X60 se skládá z práškové pryskyřice **A** a tekuté složky **B**.

3.3.2 Jednosložkové rychle tuhnutí lepidlo Z70

Z70 je jednosložková rychle-lepicí hmota bez rozpouštědla ze skupiny kyanoakrylátů. Od lepidel Z65 se liší kratší kondenzační dobou a značně zlepšenou manipulační jistotou, čímž se dosáhne dalšího zjednodušení tenzometrické lepicí techniky. Z70 se hodí k nalepení odporových tenzometrů s podložkou z pryskyřice akrylové, pryskyřice fenolické a polyamidu. Z70 se pojí se všemi v praxi obvyklými kovy a s mnoha plastickými hmotami. Nehodí se k lepení porézních hmot, jako např. betonu, dřeva, pěnové plochy apod.

3.3.3 Epoxidová lepidla E250, E310

Umožňují tenzometrická měření v rozmezí od -269°C do 300°C , krátkodobě až do 400°C . Většinou vytvrzují za vyšší teploty. Jestliže při teplotách skladování nereaguje pryskyřičná složka se složkou vytvrzující, dodávají se obě složky smíšené. Podložní vrstva se vytváří na povrchu objektu. Optimální tloušťka vrstvy je 0.02 mm - 0.03 mm (8).

3.4 Ochrana proti vnějším vlivům

Aplikované odporové tenzometry vyžadují určitou ochranu zejména proti mechanickým a chemickým vlivům. Za drsnějších okolních podmínek je třeba měřené místo a zejména tenzometr chránit před různými výpary, mlhou, párou, vodou, oleji, teplem a mechanickým ovlivněním. Pro první případ postačí jednoduchá těsnicí vrstva, ale v ostatních případech musí být nanášeno několik různých vrstev z různých ochranných materiálů, aby se vytvořila opravdu dobrá bariéra proti těmto nepříznivým vlivům. Avšak je dobré vědět, že absolutní ochranu vzorku po dlouhou dobu je možné zaručit pouze hermetickou ochranou.

3.4.1 Ochranné materiály

- *Polyuretanový lak PU 120*

Je lak, který vysušuje vzduch v okolí aplikované mřížky. Je vhodný pro ochranu před slunečním zářením, dotykem – perspirací a prachem ze vzduchu s normální průměrnou vlhkostí. Je také vhodný jako spodní vrstva pod jinými krycími prostředky. Je odolný proti olejům a má dobrou otěruvzdornost.

- *Nitrilový lak NG 150*

Je lak, který vysušuje vzduch v okolí aplikované mřížky. Vlastnostmi a aplikací je podobný laku PU 100. Je odolný proti benzínu a olejům.

- ***Silikonový lak SL 450***

Je lak, který vysušuje vzduch v okolí aplikované mřížky. Preferuje se při ochraně keramických cementů (u měření za vysokých teplot) proti absorpci vlhkosti a nečistot.

- ***Permanentní plastický tmel AK 22***

Výhody:

Jednoduché použití po rozhnětení. Výborná adheze a rovněž velmi dobrá ochrana před vlhkostí a vodou. Může být použit i pod vodou. Doba použití ve 20°C vodě je zhruba 1 rok, v 75°C vodě pak průměrně do 3 týdnů. Pod tlakovou vodou okolo 400 barů vydrží několik dní ale přesný limit není znám. Má velmi dobrou teplotní stabilitu. Doba funkčnosti může být prodloužena také aluminiovou folií, která se připevní na horní část tmelu. Teplotní stabilita na vzduchu je v rozmezí od -50°C do +170°C.

Nevýhody:

Vykazuje špatnou odolnost proti olejům a rozpouštědlům. Rovněž špatně odolává odstředivým silám.

- ***Permanentní plastický tmel s hliníkovou folií ABM 75***

Svým rozsahem použití a vlastnostem v podstatě odpovídá tmelu AK 22, s následujícími odlišnostmi:

Materiál je dodáván ve vrstvených prouzcích s 50µm tlustou folií jako difusní bariérou. Teplotní rozsah použitelnosti je od -200°C do 75°C, nad tímto limitem se materiál stává tekutým.

- ***Průhledná silikonová guma bez rozpouštědel SG 250***

Tento krycí prostředek je vhodný proti vlhkosti a nepříznivému počasí, dále proti vodě s pokojovou teplotou. Má omezenou odpudivost proti olejům. Tento silikon poskytuje velmi dobrou mechanickou ochranu. Teplotní stálost je od -70°C do 180°C, krátkodobě do 250°C. V tomto rozmezí bude materiál elastický.

- ***Nebělená vazelína***

Výhody:

Nízká cena a jednoduché použití. Velmi dobrá ochrana proti vlhkosti a vodě. Rovněž může být užívána pod vodou.

Nevýhody:

Nemožno použít v tekoucí vodě, v dešti nebo pod stříkající vodou.

- *Mikrokrystalické vosky*

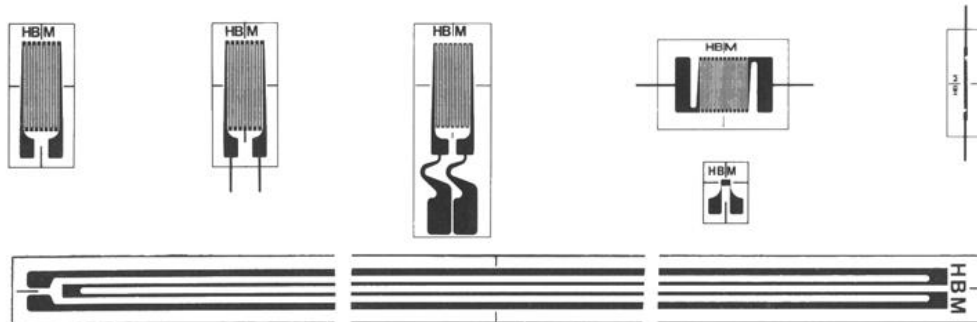
Dobrá ochrana proti vlhkosti a obecným atmosférickým podmínkám. Vyžaduje aplikaci v roztaveném stavu na rozehřátý povrch materiálu aby se dosáhlo kvalitního přilnutí. Má pouze malou mechanickou ochranu. Teplotní rozsah je od -70°C do $+100^{\circ}\text{C}$.

- *Aluminiová folie*

Samolepicí vrstvené pásy s hliníkovou folií tvoří dobrou ochranu proti páře. Je vhodné jej použít jako doplňkového krytí vzorku s jiným povlakem. Zvyšuje tak ještě teplotní stabilitu měřeného místa. Často se také používají ke krytí koncových obnažených částí kabeláže.

4 VÝBĚR VHODNÉHO ODPOROVÉHO TENZOMETRU

Odporové tenzometry se vyrábějí v různých typech a velikostech (Obr. 17). Vedle jejich různé délky a tvaru měřicí mřížky, existují různé druhy uložení měřicí mřížky a různé druhy pájecích kontaktů. Rozdíly jsou také v poloze a počtu měřicích mřížek. Existují tenzometry pro běžné použití, ale i pro speciální aplikace. Velký počet tvarů a délek je výsledkem požadavků na velké množství rozdílných aplikací a použití.



Obr. 17. Vzorek typů a velikostí odporových tenzometrů.

4.1 Délka měřicí mřížky

Tenzometry se běžně vyrábějí s délkou měřicí základny od 0,6 mm do 150 mm. Hlavním kritériem pro volbu délky je homogenita nebo případná nehomogenita pole napětí v místě aplikace tenzometru.

Citlivost tenzometru je nezávislá na jeho délce. Citlivost kovových tenzometrů závisí na relativním prodloužení, tj. na přetvoření a ne na absolutním prodloužení. Z toho vyplývá, že velikost tenzometru nemá vliv na jeho citlivost. Nicméně, tenzometry s extrémně malou délkou měřicí základny se používají jen tam, kde je to nezbytně nutné, např. pro vyšetřování pole napětí u vrubů. Je to lepší, než ořezávat podložku tenzometru. V případě ořezu podložky dochází k porušení přenosové cesty napětí z měřeného místa k měřicí mřížce. Tenzometry jsou konstruovány tak, aby vliv přechodů mezi vrstvami nezasahoval až na aktivní část měřicí mřížky, což by se v případě ořezávání podložky mohlo stát.

4.1.1 Homogenní pole napětí

Hlavním kritériem pro volbu délky měřicí základny je volné místo na měřeném objektu. Pokud je měřený objekt velký, doporučuje se používat tenzometry s délkou měřicí základny od 3 do 6 mm. Tato volba je vhodná jak co do přesnosti měřené veličiny, tak i co do jednoduchosti aplikace.

4.1.2 Nehomogenní pole napětí

Tenzometry pracují na základě integračního principu, který znamená, že naměříme střední hodnotu přetvoření pod měřicí základnou. V případě nehomogenního pole napětí je proto třeba rozhodnout zda chceme měřit střední hodnotu napětí v daném místě, nebo lokální špičky napětí. Platí, že čím máme větší máme delší základnu, tím naměříme menší hodnotu a tím větší chyby se dopouštíme.

Případem, kdy chceme měřit spíše střední hodnotu napětí je měření na zrnitých materiálech (např. beton), kde se vyskytují místa se značně odlišnými hodnotami deformace. V těchto případech je nutno změřit spolehlivou střední hodnotu. Proto se doporučuje délka měřicí základny nejméně pětinásobná k největšímu zrnu v měřeném materiálu.

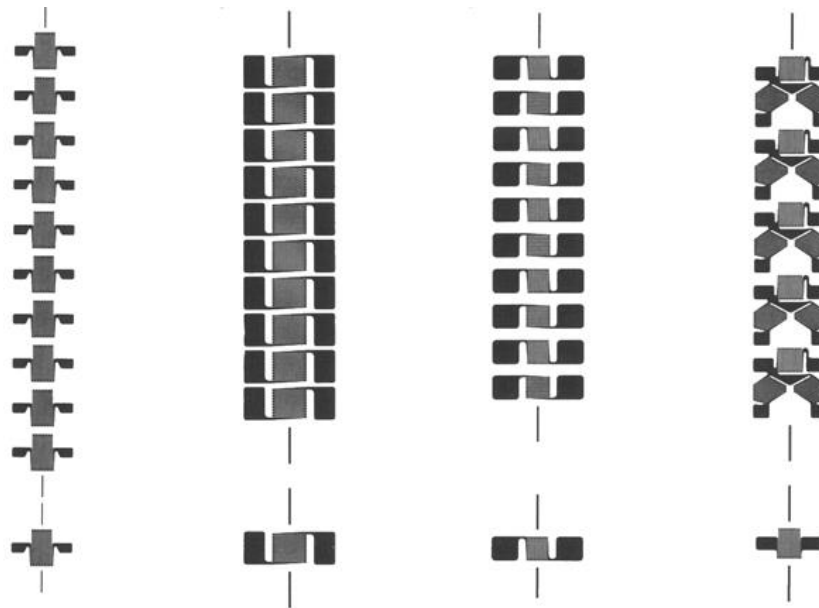
Opačnou aplikací je měření špiček napětí, např. maximální hodnoty v kořeni vrubu. Tady je nutné použít tenzometr s velmi malou měřicí základnou, protože tenzometr s dlouhou měřicí základnou by mohl dát nežádoucí střední hodnotu. Ideálním by byl tenzometr s nulovou měřicí základnou. Technicky je možné vyrobit tenzometr s délkou měřicí základny 0,2 mm. Při kratší měřicí základně by docházelo k problémům s přenosem napětí k měřicí mřížce.

4.2 Vícenásobné tenzometry

Vícenásobné tenzometry se skládají z více jednotlivých měřících mřížek na jedné společné podložce. Typickým příkladem vícenásobných tenzometrů jsou tenzometrické kříže, tenzometrické růžice nebo tenzometrické řetězce. Jejich jednotlivé měřicí základny jsou na společné podložce umístěné v přesně orientovaných směrech a s přesně předepsanou roztečí. Další výhodou je rychlejší a levnější instalace oproti srovnatelnému počtu samostatných tenzometrů, kde navíc nemusí být zajištěná jejich rozteč a dodržení přesných směrů. Existují i speciální aplikace, kde nelze jiné, než vícenásobné tenzometry použít.

4.2.1 Tenzometrické řetězce

Tenzometrické řetězce (Obr. 18) jsou kombinace měřících mřížek stejného typu na stejném základě v pravidelných intervalech. Řetězce s kříži nebo s růžicemi obvykle obsahují 10 měřících mřížek nebo 5 skupin se třemi měřícími mřížkami. Na konci každého řetězce bývá umístěna jedna samostatná mřížka stejného typu, která slouží jako kompenzační nebo jako doplňující. Hlavní využití tenzometrických řetězců je pro zjišťování gradientů napětí.



Obr. 18. Tenzometrické řetězce.

4.2.2 Tenzometrické kříže a tenzometrické růžice

Při vyšetřování rovinné napjatosti je nutné měření deformace ve více směrech. Pro měření při známých směrech hlavních napětí se používají tenzometrické kříže, které mají dvě nezávislá vinutí pod úhlem 90° . Tenzometrických křížů se vyrábí více druhů a nejznámější jsou typy X, L, T a V(4), pojmenované podle tvaru křížení měřících základen (Obr. 19).

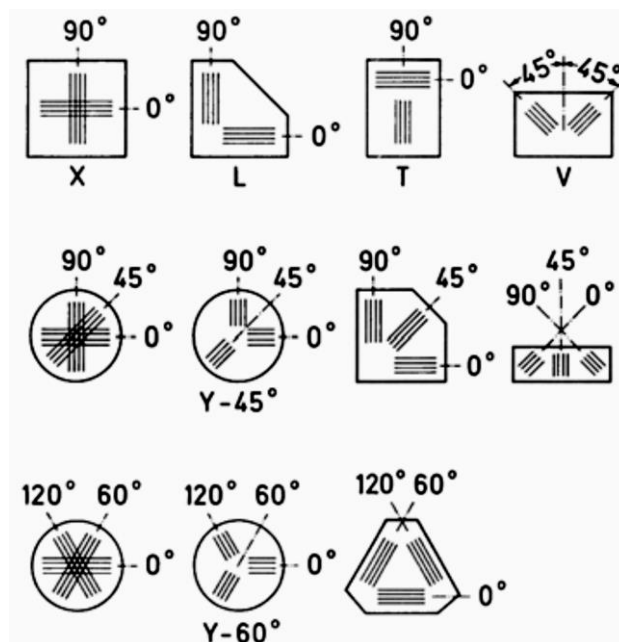
V případě, že není znám směr hlavních napětí pro vyšetřování rovinné napjatosti, je třeba měřit deformaci nejméně ve třech nezávislých směrech. K tomuto účelu slouží tenzometrické růžice. Vyrábí se ve dvou základních provedeních, které se od sebe liší úhlovým natočením jednotlivých měřících základen – $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ a $0^\circ/60^\circ/120^\circ$. Podobně jako u tenzometrických křížů i u růžic se vyrábí několik druhů, která se od sebe liší umístěním měřících mřížek na podložce.

Rozdíly mezi oběma typy jsou minimální. Jsou-li známy alespoň přibližně směry hlavních napětí, dáváme přednost prvnímu typu, růžice druhého typu jsou směrově neutrální. Snažíme se totiž dosáhnout co nejmenšího rozdílu mezi směry mřížek a hlavními směry.

Jak u růžic, tak i u křížů je tvar umístění mřížek na podložce dán snahou o zmenšení resp. zvětšení vlivu integračního principu tenzometru.

Ve zvláštních případech se používá růžic se čtyřmi mřížkami. Čtvrté vinutí je v podstatě nadbytečné – využívá se ho k vyrovnání výsledků měření pomocí metody nejmenších

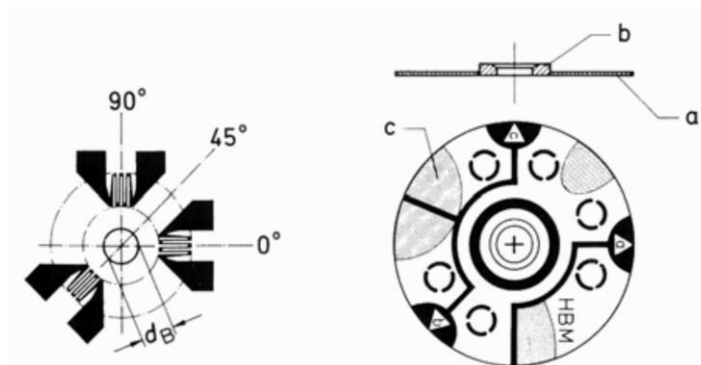
čtverců a tak ke zlepšení přesnosti měření. Doporučuje se ho použít v případě nebezpečí porušení některé mřížky a v místech s obtížným přístupem.



Obr. 19. Tenzometrické kříže a růžice.

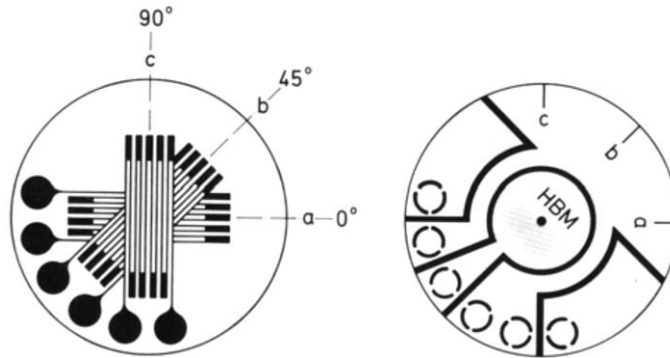
4.2.3 Tenzometrické růžice pro měření zbytkového napětí

K měření zbytkových napětí pomocí tenzometrických růžic jsou dnes k dispozici dvě metody. Obě dvě vycházejí z principu odstraňování materiálu z měřeného objektu v okolí nalepené tenzometrické růžice. Starší odvrtávací metoda, je založena na přerozdělení pole napjatosti a deformace vyvolané vyvrtáním otvoru ve středu tenzometrické růžice (Obr. 20) (4). Pro tuto metodu se používají růžice s třemi vinutími s natočení $0^\circ/45^\circ/90^\circ$ kolem středu.



Obr. 20. Tenzometry pro odvrtávací metodu.

Druhá metoda sloupku, využívá také tenzometrickou ruzici se třemi vinutími (Obr. 21) pod stejným úhlem jak v předchozí metodě, rozdíl je v místě odvrtávání materiálu. Při této metodě se prstencovým vrtákem uvolní sloupek materiálu po obvodu tenzometru.



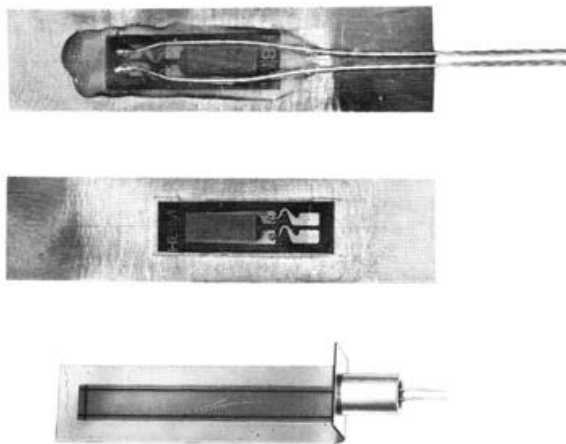
Obr. 21. Tenzometry pro sloupkovou metodu.

4.3 Tenzometry pro speciální použití

Vedle mnoha typů tenzometrů lišících se od sebe polohou a počtem měřících mřížek se vyrábí i poměrně velké množství tenzometrů pro různé speciální aplikace.

4.3.1 Přivařovací tenzometry

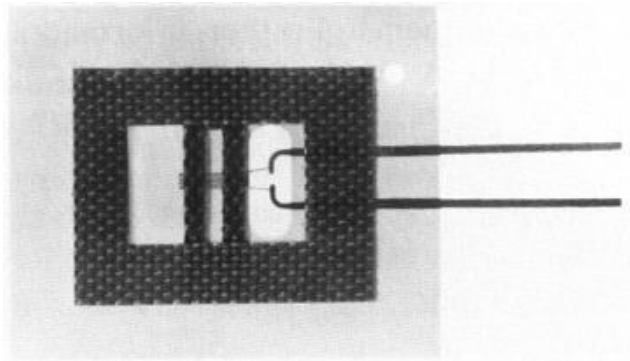
Přivařovací tenzometry (Obr. 22), mají tenkou metalickou základnu, na níž je přitmelena měřící mřížka. K měřenému objektu se připevňují pomocí bodového svařování, čímž je omezeno jejich použití pouze na oceli a temperované litiny. Jsou vhodné vzhledem ke svému rychlému použití. Jsou značně tuhé a proto se používají na tlustostěnných konstrukčních prvcích.



Obr. 22. Přivařovací tenzometry.

4.3.2 Tenzometry s volnou mřížkou

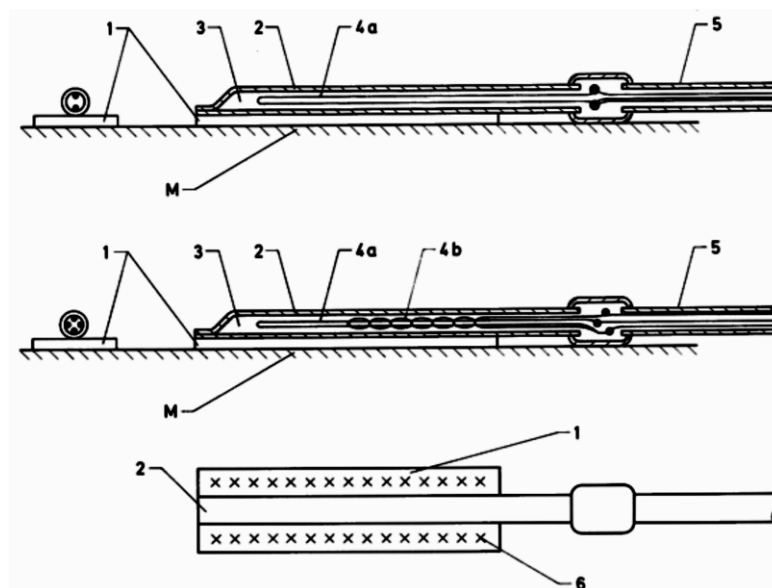
Tento druh tenzometrů (Obr. 23) se používá pro měření v extrémně vysokých (až 1000°C) nebo nízkých teplotách (-200°C a nižších) (4). Měřicí mřížka je připevněna na pomocné podložce, která se odstraní v průběhu připevňování. Pro připevňování se používá speciální keramický nástřík. Některé druhy jsou dodávány s termočlánkem, kterým se kompenzuje teplota, protože samokompenzovatelné tenzometry pro měření za extrémních teplot neexistují.



Obr. 23. Tenzometr s volnou mřížkou.

4.3.3 Přivařovací vysokoteplotní tenzometry

Tento druh snímačů (Obr. 24) je určen pro dlouhodobé resp. trvalé měření za nepříznivých podmínek. Tenzometry jsou připevněny na kovové folii a vývody jsou provedeny stíněným kabelem. Dodávají se v zapojení po čtvrt nebo půl mostovém zapojení.



Obr. 24. Přivařovací vysokoteplotní tenzometry.

5 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI

Teoretická část bakalářské práce popisuje prostý ohyb nosníku, odporové tenzometry a jejich praktické použití dle specifických vlastností. Dále je zde popsán postup přípravy tenzometru a povrchu vzorků pro měření a možnosti jejich vzájemného spojení.

Tyto informace využijeme k navržení konstrukce přípravku pro čtyřbodový ohyb a zvolení vhodného typu kovového foliového tenzometru a lepidla pro docílení požadované kvality spojení a přesnosti měření v praktické části. Následně budeme sledovat pokles modulu tečení polymerního materiálu při konstantním ohybovém zatížení v krátkém časovém úseku.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍL PRÁCE

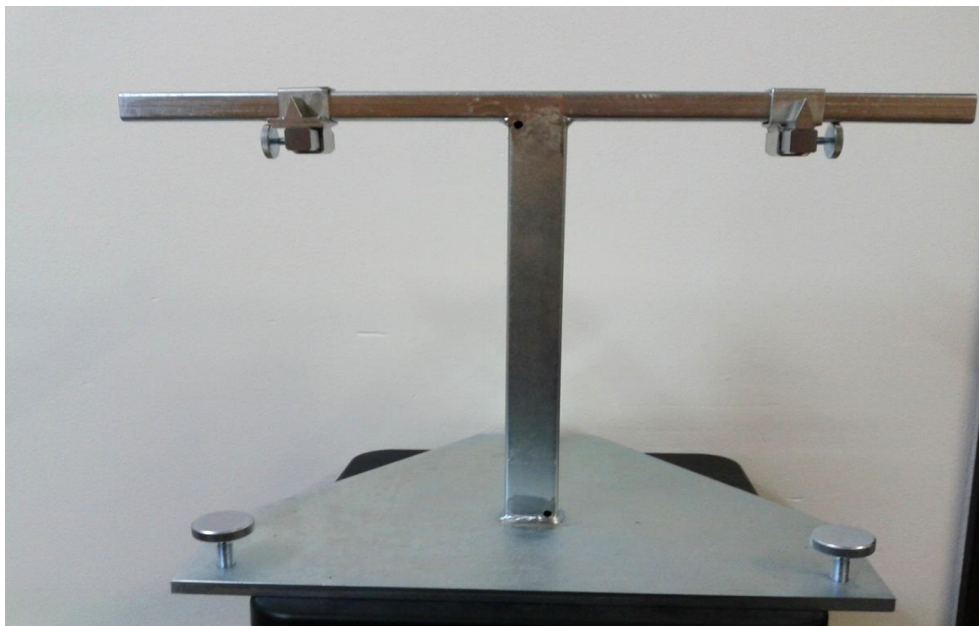
Praktická část bakalářské práce je zaměřena na návrh a výrobu přípravku, na kterém bude sledován nosník z polypropylenu při statickém zatížení čtyřbodovou zkouškou. Pomocí tenzometrů, snímače dráhy a měřící aparatury, budou vyhodnoceny změny napětí a deformace v čase. Na základě změn deformace nosníku, bude vyhodnocen modul tečení.

7 PŘÍPRAVA MĚŘENÍ

Pro splnění bakalářské práce byl zkonstruován měřicí přípravek a zpracována výrobní dokumentace, podle níž byl přípravek vyroben.

7.1 Přípravek

Základem přípravku je deska (příloha P III), která zabezpečuje stabilitu a vodorovnost pomocí sloupkové magnetické vodováhy a tří ustavovacích šroubů. Z důvodu obtížné dostupnosti byla libela o průměru 12 mm nahrazena sloupkovou magnetickou vodováhou. Ve středu desky je přivařena stojna obdélníkového profilu a na ní nosná tyč čtvercového průřezu. Tato tyč slouží jako vedení posuvným členům (příloha P II a P IV) s podpěrami pro nastavení vzájemné vzdálenosti. Podpěry lze dle rozměrů vzorků i vysunout. Ukotvení v nastavených pozicích je zabezpečeno aretačními šrouby. Samotné podpěry jsou navrženy jako trny, s nichž je jeden uložen pevně (příloha P I) a druhý kluzně (příloha P V a P VI). Obě podpěry jsou přilepeny epoxidovým lepidlem Pattex repair epoxy metal k plným výsuvným tyčím čtvercového průřezu. Celá konstrukce je chráněna proti oxidaci galvanickým zinkováním a umožňuje tak použití v klimatických komorách. Před zinkováním byly do stojny vyvrtány otvory, které umožňují cirkulaci vzduchu a tím zamezení kondenzaci par.

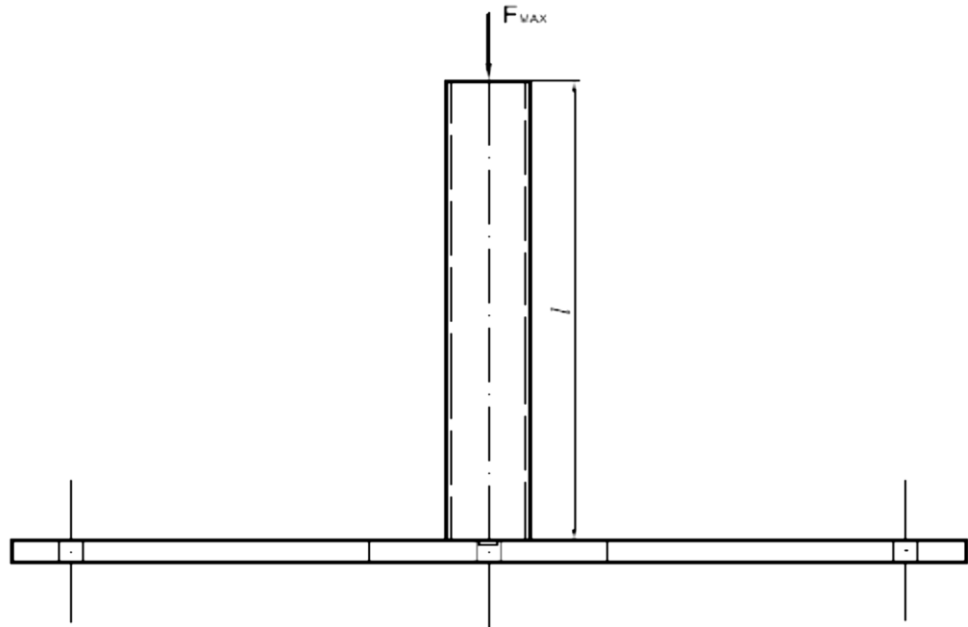


Obr. 25. Přípravek pro měření.

7.1.1 Kontrolní výpočty

- *Stojna na vzpěr*

Použitý polotovár – TR OBD 35 x 20 x 2 ČSN 426936.1 – 11 373, o délce 300 mm.



Obr. 26. Stojna na vzpěr.

– Kvadratický moment průřezu

$$J_z = \frac{1}{12}(BH^3 - bh^3) = \frac{1}{12}(20 \cdot 35^3 - 16 \cdot 31^3) = 31\,737 \text{ mm}^4 \quad (15)$$

– Redukovaná délka vzpěry

$$l_{RED} = \frac{l}{2} = \frac{300}{2} = 150 \text{ mm} \quad (16)$$

– Plocha profilu

$$S = B \cdot H - b \cdot h = 20 \cdot 35 - 16 \cdot 31 = 700 - 496 = 204 \text{ mm}^2 \quad (17)$$

– Poloměr setrvačnosti

$$i = \sqrt{\frac{J_z}{S}} = \sqrt{\frac{31737}{204}} = \sqrt{155,6} = 12,5 \text{ mm} \quad (18)$$

– Štíhlost

Mezní štíhlost pro materiál 11 373 $\lambda_m = 99 \div 105$

$$\lambda = \frac{l_{RED}}{i} = \frac{150}{12,5} = 12 \quad (19)$$

$\lambda_m > \lambda$ - vyhovuje

Dále dle Eulera

- Kritické napětí

Pro materiál 11 373 je kritické napětí $\sigma_{KRIT} = 289 - 0,82\lambda$

$$\sigma_{KRIT} = 289 - 0,82 \cdot 12 = 289 - 9,84 = 279,2 \text{ MPa} \quad (20)$$

- Dovolené napětí

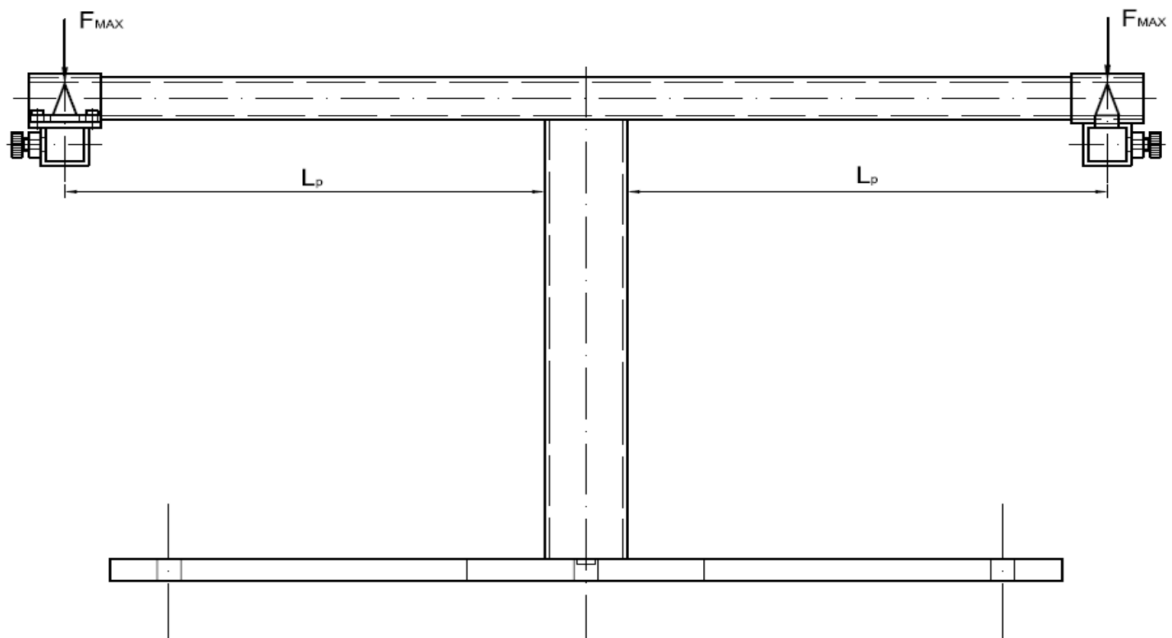
$$\sigma_{DOV} = \frac{\sigma_{KRIT}}{k} = \frac{279,2}{2} = 139,6 \text{ MPa} \quad (21)$$

- Maximální zatěžující síla

$$F_{MAX} = S \cdot \sigma_{DOV} = 204 \cdot 139,6 = 28478,4 \text{ N} \quad (22)$$

- **Nosník na ohyb**

Použitý polotovár – TR 20 x 16 x 2 ČSN 426935.1 – 11 373, o délce 500 mm.



Obr. 27. Nosník na ohyb.

Pro výpočet je použit délkový rozměr $L_p = 215$ mm, což je maximální vzdálenost podpěry na posuvném členu od stojny.

- Dovolené napětí v ohybu

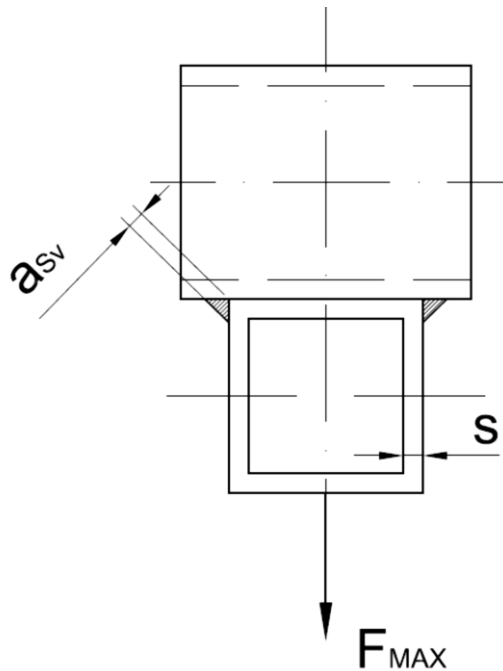
Pro materiál 11 373 je dovolené napětí v ohybu $\sigma_{DO} = 110 \div 165$ MPa, voleno 110 MPa.

$$\sigma_{DO} = \frac{M_o}{W_o} = \frac{F \cdot L_p}{\frac{1}{6}(A^3 - a^3)} \Rightarrow F_{MAX} \quad (23)$$

- Maximální zatěžující síla

$$F_{MAX} = \frac{\sigma_{DO} \cdot (A^3 - a^3)}{6 \cdot L_p} = \frac{110 \cdot (20^3 - 16^3)}{6 \cdot 215} = \frac{429440}{1290} = 332,9 \text{ N} \quad (24)$$

- **Svar posuvného členu na smyk**



Obr. 28. Svar posuvného členu na smyk.

- Dovolené napětí ve svaru

Pro materiál 11 373 je dovolené napětí ve svaru $\tau_{DSv} = 0,65\sigma_{Dt}$.

$$\tau_{DSv} = 0,65 \cdot \sigma_{Dt} = 0,65 \cdot 111 = 72,2 \text{ MPa} \quad (25)$$

$$\tau_{DSv} = \frac{F}{S_{Sv}} = \frac{F}{a_{Sv}(b_{Sv} - 2s) \cdot 2} \Rightarrow F_{MAX} \quad (26)$$

- Maximální zatěžující síla

$$F_{MAX} = \tau_{DSv} \cdot a_{Sv} \cdot (b_{Sv} - 2s) \cdot 2 = 72,2 \cdot 3 \cdot (25 - 4) \cdot 2 = 9097,2 \text{ N} \quad (27)$$

7.2 Zkušební vzorek

Jako základní polotovar byla použita polypropylenová deska, vyrobená technologií vytlačování přes širokoštěrbinovou hlavu, o rozměrech (v / š / l) 8 x 1000 x 2000 mm.

Tab. 2. Vlastnosti PP udávané výrobcem.

Měrná hmotnost (hustota)	g/cm ³	0,92
Pevnost v tahu	MPa	30
Modul pružnosti v ohybu	MPa	1200
Teplotní okruh použití	°C	Od 0 do +100
Teplota tání	°C	165

Z desky byl odřezán zkušební vzorek o rozměrech 8 x 21 x 600 mm (Obr. 29). Vzniklé nerovnosti a ořepy po oddělení materiálu, byly začištěny brusným papírem.

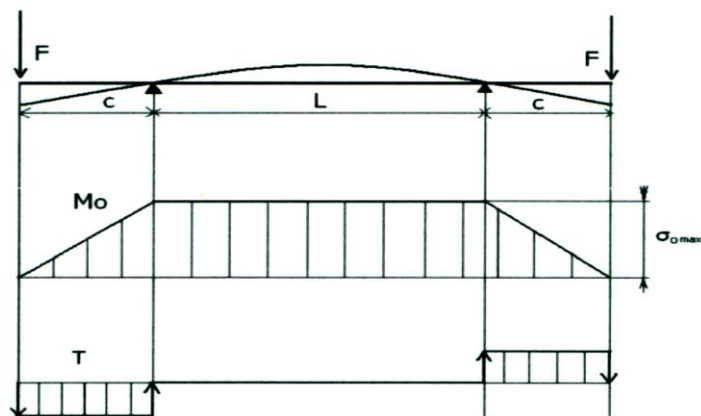


Obr. 29. Zkušební vzorek.

Polypropylenový vzorek bude zatížen čtyřbodovým ohybem (Obr. 30) s těmito parametry.

Tab. 3. Parametry a zatížení nosníku.

Vzdálenost podpěr	$L = 300 \text{ mm}$
Rameno zatěžující síly	$c = 150 \text{ mm}$
Zatěžující síla	$F = 4,9 \text{ N}$
Napětí v ohybu	$\sigma_o = 3,28 \text{ MPa}$




Obr. 30. Zatížení zkušební vzorku.

7.3 Měřicí snímače a aparatura

7.3.1 Tenzometrický snímač

Pro měření krátkodobého tečení zvoleného termoplastu byl zvolen jednoosý foliový odporový tenzometr firmy HMB (Obr. 31), který disponuje měřicí mřížkou z konstantanu o délce 6 mm, upevněnou na polyamidové podložce.

 Dehnungsmeßstreifen Strain Gauges Jauges d'extensométrie		Bestellnummer Order No. No. de référence	1-LY11-6/120
Widerstand Resistance Résistance	120 Ω \pm 0.35 %	Typ Type Type	6/120LY11
k-Faktor Gauge factor Facteur k	2.08 \pm 1 %	Stückzahl Contents Quantité	10
Quersensitivität Transverse Sensitivity Sensibilité transverse	-0.1 %	Temperaturkoeffizient des k-Faktors Temperature coefficient of gauge factor Coefficient de température du facteur k	104 \pm 10 [10^{-6} / °C] (-10...+45°C)
Temperaturkompensation: Angepaßt für Temperature Compensation: Compensated for Compensation de température: Compensé pour	Ferritischen Stahls mit Steel with Acier avec	Folienlos Lot Lot de la feuille	A398/35
		Herstellungslös Batch Lot de fabrication	812033718
		$\alpha =$	10.8 [10^{-6} / °C]

Obr. 31. Zvolený typ tenzometru.

7.3.2 Induktivní snímač dráhy

Pro vyhodnocování změny deformace (průhybu) nosníku v průběhu zkoušky byl zvolen induktivní snímač dráhy WA-L s volným jádrem, rozsahem 100 mm a chybou linearit 0,2 % (Obr.32).



Obr. 32. Induktivní snímač dráhy WA-L.

Kovová posuvná tyč se pohybuje v těle cívek, které jsou umístěny v pouzdře snímače, ale nedotýká se jich. Těmito cívkami vyráběné magnetické pole se rozladí a právě toto rozladění je měřítkem pro vyhodnocení posunu, měřené délky.

7.3.3 Měřicí aparatura

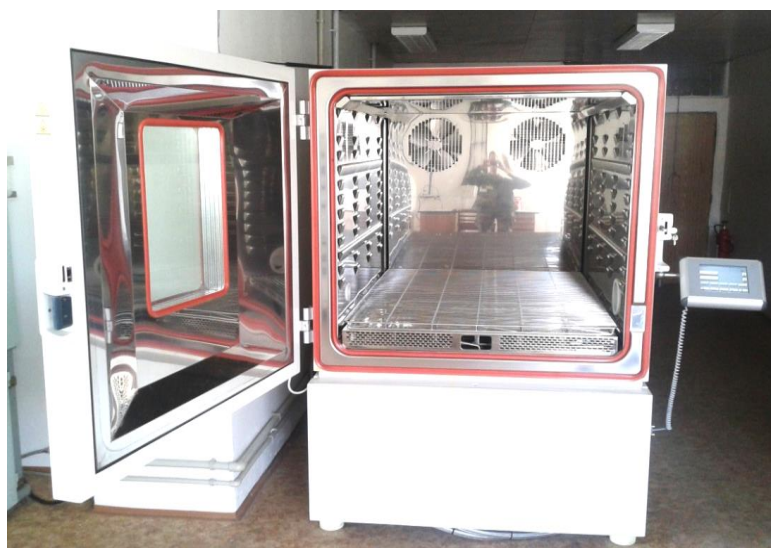
Vlastní měření a spolehlivé zaznamenávání dat po dobu experimentu bylo provedeno pomocí osmikanálové ústředny MGC Plus (Obr. 33), ke které byly připojeny všechny snímače. Odporový tenzometr v půlmůstkovém zapojení a induktivní snímač dráhy. Naměřené hodnoty v relativním čase byly přeneseny a následně uloženy na harddisk ústřednou připojenou k přenosnému PC. Vzorkovací frekvence byla u snímačů nastavena na 0,1 Hz, což znamená, že měřené veličiny byly zaznamenávány po 10 sekundách a ukládány do PC. Následně byly tyto veličiny převedeny do formátu *xls* určeným pro MS Excel.



Obr. 33. Ústředna MGC Plus.

7.3.4 Klimatická komora

Pro zabezpečení konstantní teploty a vlhkosti v průběhu měření, byl přípravek se vzorkem vložen do klimatické komory VCS 7150-5 (Obr. 34).



Obr. 34. Klimatická komora VCS 7150-5.

7.4 Mechanické zatížení

Zatěžující sílu a vznik ohybového momentu při čtyřbodové zkoušce zajišťují dvě závaží o hmotnosti 0,5 kg. První z nich je normalizované závaží (Obr. 35) o hmotnosti 0,5 kg a druhým závažím je ocelový disk o hmotnosti 0,480 kg, doplněný závažím normalizované hmotnosti 0,020 kg. Závaží jsou na nosník zavěšeny pomocí šňůry.



Obr. 35. Sada normalizovaných závaží.

7.5 Lepidlo

Pro pevné spojení polyamidové podložky tenzometrického snímače s polypropylenovým vzorkem, bylo zvoleno vteřinové lepidlo Loctite 406 (Obr. 36), které je přednostně určeno k lepení plastů a elastomerů. Zaručuje velmi vysokou pevnost spoje u problematicky spojitelných materiálů.



Obr. 36. Lepidlo Loctite 406.

7.5.1 Vlastnosti

- Technologie: kyanoakrylát
- Vzhled (nevytvrzený): průhledná, čirá až slámově žlutá kapalina
- Složky: jednosložkový
- Viskozita: nízká
- Vytvrzení: vlhkostí
- Aplikace: lepení
- Teplotní odolnost: - 40 až + 80 °C

Pro zlepšení vlastností lepeného spoje byl použit aktivátor Loctite 770 (Obr. 37), který zvyšuje adhezi lepidla k povrchu plastů s nízkým povrchovým napětím (polypropylen). Jedná se o nízko viskózní bezbarvý aktivátor pro kyanoakrylátová lepidla.

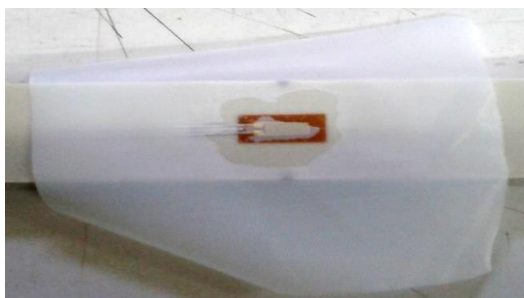


Obr. 37. Aktivátor Loctite 770.

8 POSTUP MĚŘENÍ

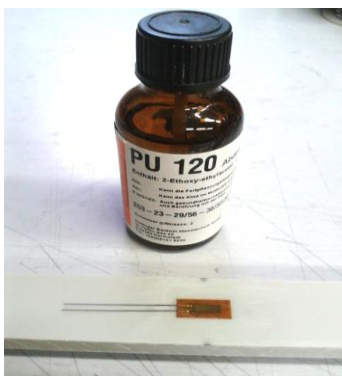
Polypropylenový vzorek je očištěn od nečistot a mastnoty. Na koncích vzorku jsou vyvrtány otvory a provlečeny šňůry pro zavěšení závaží. Aby šňůry se závažím neklouzaly na konci nosníku, jsou opatřeny tyto konce drážkou ve tvaru písmene V.

V polovině vzorku je označení polohy tenzometru na horní i spodní straně. Dle velikosti zvoleného tenzometru je zdrsňena dostatečně velká plocha vzorku. Zdrsňená plocha je zbavena nečistot vyfoukáním. Na takto připravené ploše je nanesen aktivátor Loctite 770. Po odpaření zbytků aktivátoru, je do středu označené polohy pro tenzometr nanesena tenká vrstva vteřinového lepidla Loctite 406. Na lepidlo je umístěn tenzometr tak, že vlákna měřící mřížky jsou orientována do směru působícího napětí. Čtvereček teflonu položeným přes tenzometr je po dobu 10 sekund tlačěn na celou plochu tenzometru (Obr. 38), aby byl vytlačen přebytek lepidla.



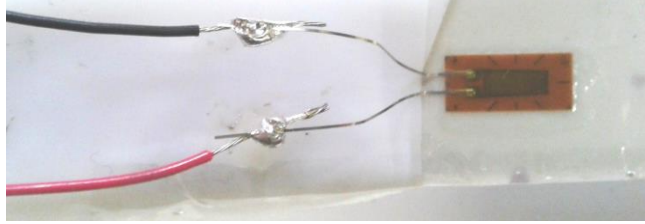
Obr. 38. Lepení tenzometru.

Po odejmutí teflonu je polyuretanovým lakem PU 120 nanesena na tenzometr krycí vrstva, která po vytvrzení plní ochranu před vlhkostí, nečistotami a mechanickým poškozením (Obr. 39).



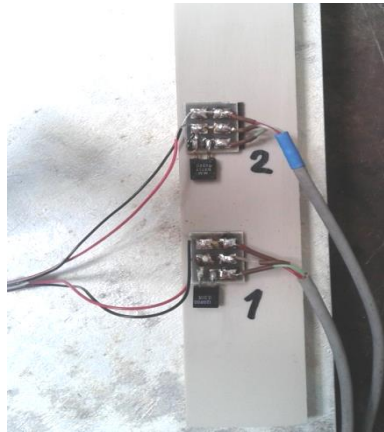
Obr. 39. Nanesení krycí vrstvy.

Po vytvrzení polyuretanového laku je vzorek otočen a tento postup opakován u druhého tenzometru.



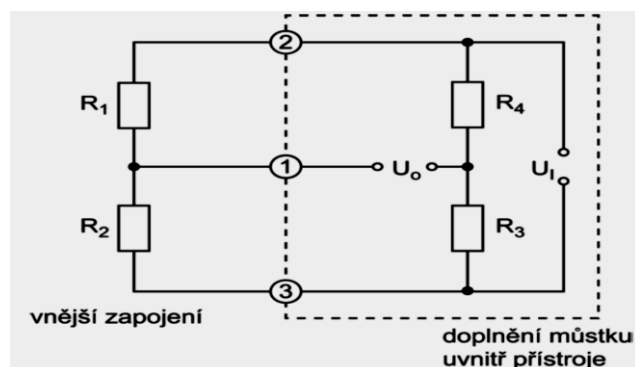
Obr. 40. Připájení tenzometru.

Na kontakty tenzometrů jsou připájeny drátky (Obr. 40). Pájené spoje jsou odizolovány a pevně přichyceny lepicí páskou k vzorku. Opačné konce drátků jsou od obou tenzometrů připájeny ke kompenzačním odporům se stejnou velikostí odporu jako tenzometry (Obr. 41). Tyto odpory kompenzují vliv změny teploty při měření a jsou přilepeny oboustrannou lepicí páskou ke kousku polypropylenu, který nebude mechanicky namáhán a je připevněn k desce přípravku stejným způsobem.



Obr. 41. Kompenzační odpory.

Ke kompenzačním odporům jsou připájeny kontakty propojovacích kabelů, které jsou zapojeny do ústředny MGC Plus. Spojením tenzometru, kompenzačního odporu a ústředny, je vytvořen Weatsonův půlmost (Obr. 42).



Obr. 42. Půlmostové zapojení tenzometru.

Přípravek je vložen do klimatické komory VCS 7150-5, stavěcími šrouby a sloupkovou vodováhou je určena rovina. Podpěry jsou nastaveny na vzdálenost $L = 300$ mm. Na zkoumaném vzorku je rozměřena a označena stejná vzdálenost a je umístěn na podpěry v nezatíženém stavu. Prostřednictvím polohovacího magnetického stojánku Kinex, je umístěn do místa maximálního průhybu nosníku inдукtivní snímač dráhy WA-L a propojen s ústřednou MGC Plus. Hrot snímače je umístěn na vzorek. Pomocí PC a softwaru je provedeno nastavení nulového bodu inдукtivního snímače dráhy, jednotky v mm a vzorkovací frekvence 0,1 Hz (10 s). U tenzometrů je nastaveno napájecí napětí $U = 2,5$ V, jednotky v MPa a stejná vzorkovací frekvence.

Na klimatické komoře je nastavena požadovaná teplota 60°C a vlhkost 50%. Po spuštění záznamového zařízení (programu) je vzorek zatížen závažím a klimatická komora je uzavřena.

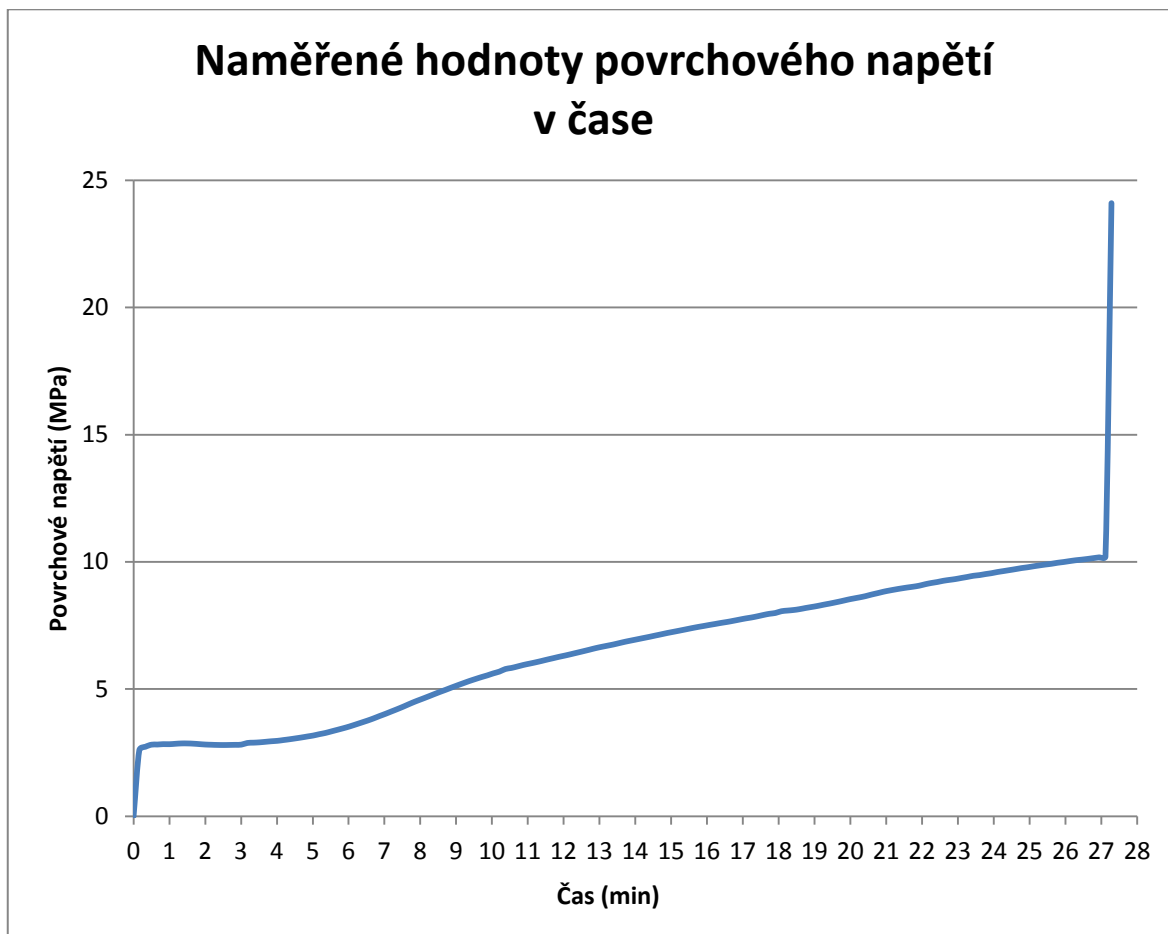


Obr. 43. Přípravek se zatíženým nosníkem v klimatické komoře.

9 NAMĚŘENÉ HODNOTY

Sběr a záznam dat o změnách povrchového napětí a deformace nosníku, vlivem parametrů uvedených v Tab. 2, probíhal v délce 19 hodin a 22 minut při teplotě 60°C a vlhkosti prostředí 50 %.

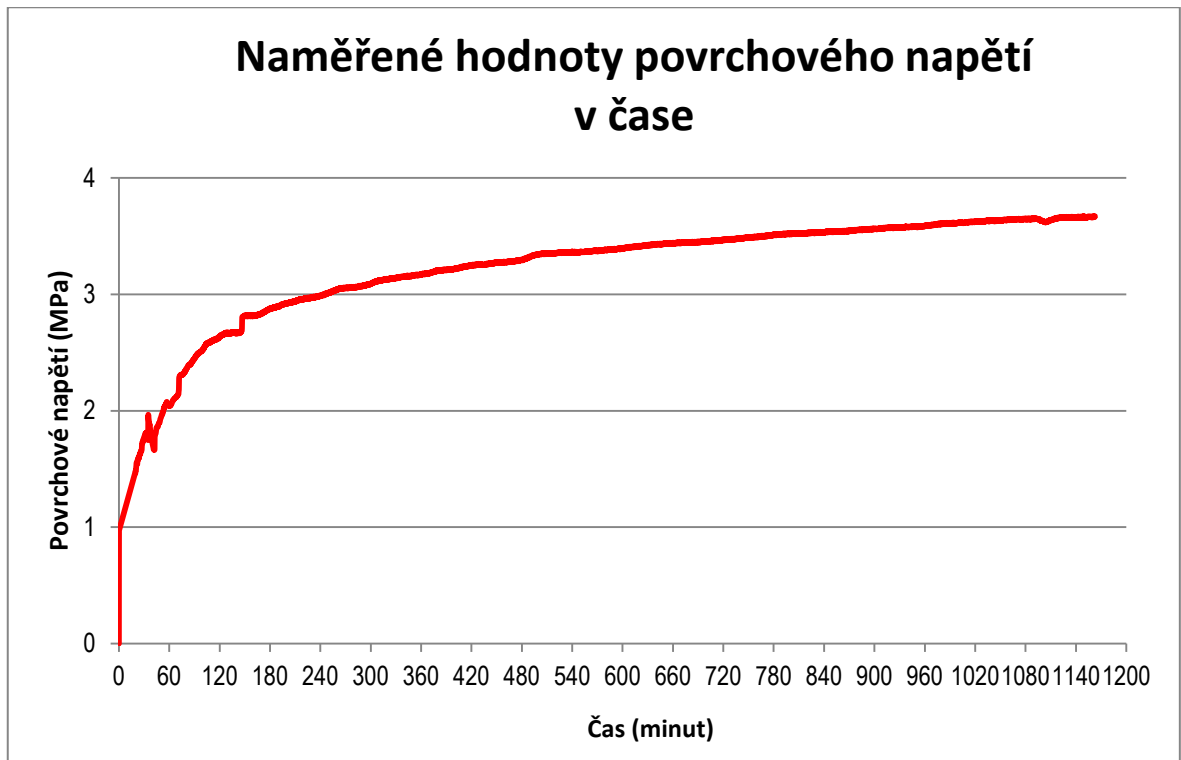
9.1 Tahové napětí



Obr. 44. Průběh povrchového tahového napětí na nosníku v čase.

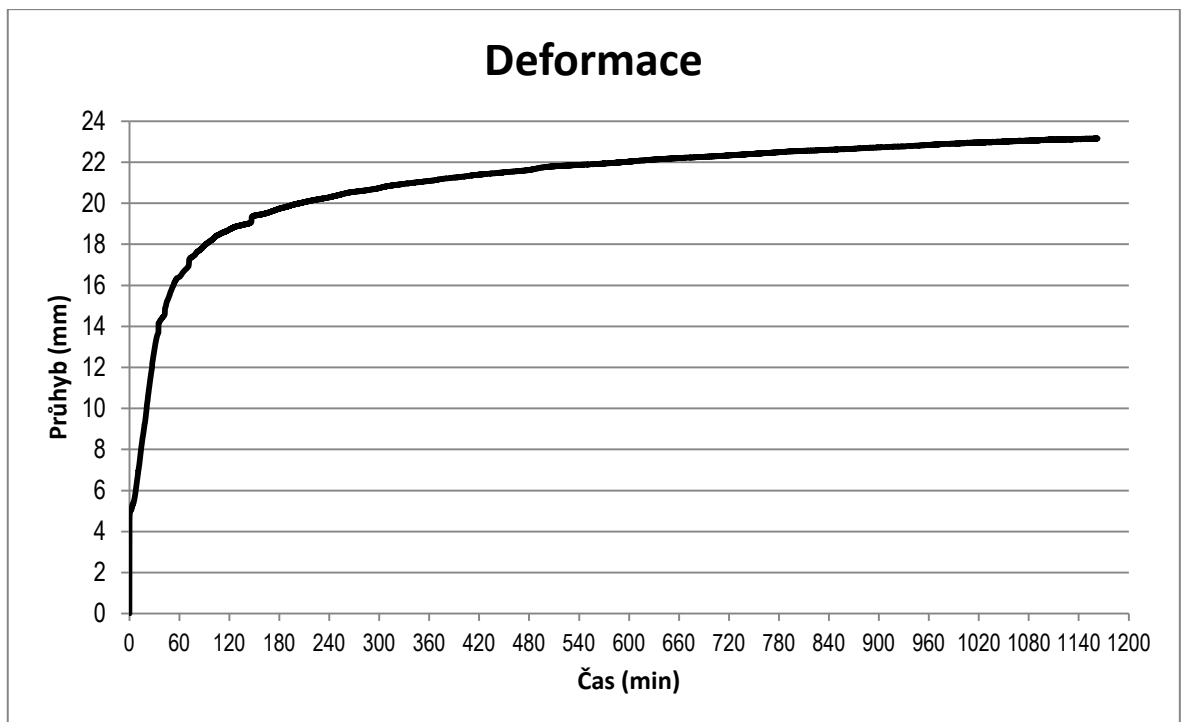
Při prvotním zatížení tenzometru snímajícího povrchové napětí v tahu, byla snímačem vykázána hodnota 2,6 MPa. Hodnota povrchového napětí se v průběhu 27 minut dostala na hodnotu 10,2 MPa. Při tak velké změně přetvoření měřicí mřížky tenzometru a tím způsobené změně odporu, byla dosažena technická hranice ústředny MGC Plus. Vnitřní odpory ústředny zapojené do pŕlmostu s tenzometrem a kompenzačním odporem nedokázaly tuto změnu vykompenzovat. Měření povrchové napětí se ustálilo na hodnotě 24,1 MPa a bylo konstantní až do ukončení měření.

9.2 Tlakové napětí



Obr. 45. Průběh povrchového tlakového napětí nosníku v čase.

9.3 Průběh deformace



Obr. 46. Průběh deformace nosníku v čase.

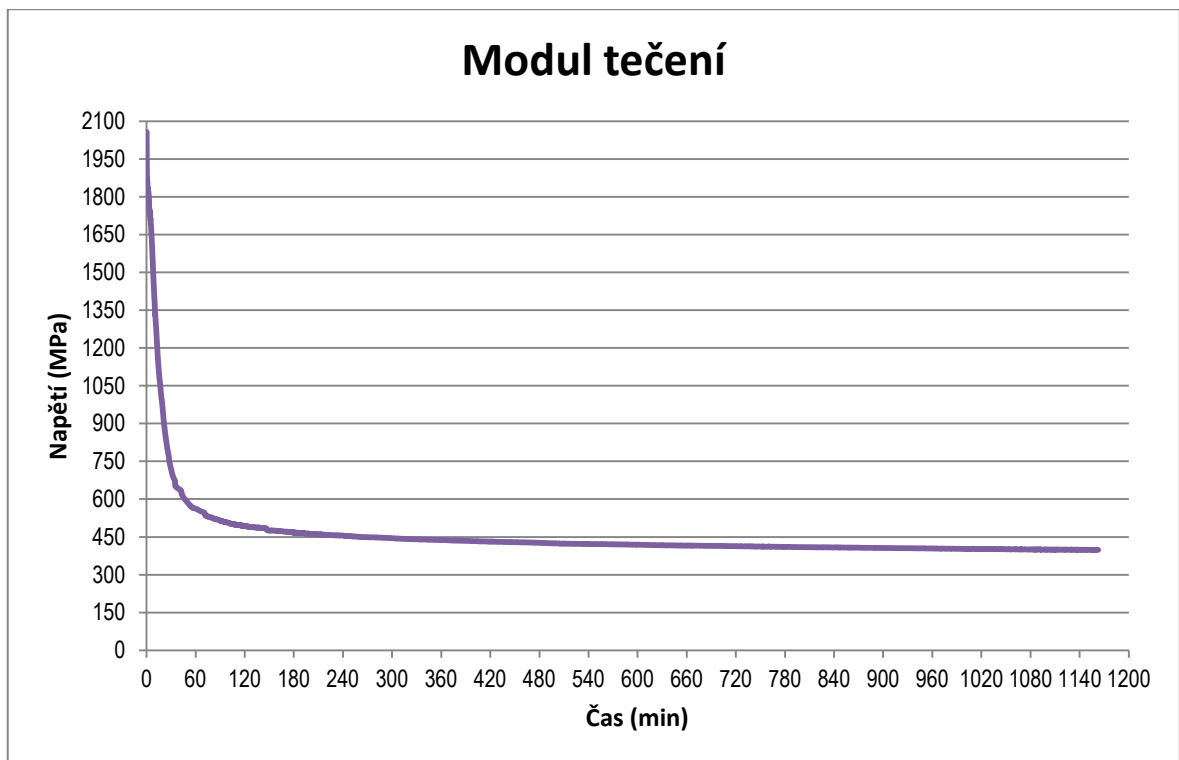
Průběh deformace nosníku ve vertikálním směru y , je měřen ve středu vzdálenosti mezi podpěrami, kde nabývá maximálních hodnot. Při prvotním zatížení nosníku byla snímačem dráhy naměřena hodnota $y = 4,49$ mm. V průběhu měření tato hodnota narůstala až do svého maxima $y = 23,16$ mm.

9.4 Modul tečení

Modul tečení E_t s rostoucí deformací y klesá. Na deformaci má taktéž vliv modul průřezu v ohybu W_o , teplota a hodnota vyvozeného ohybového napětí. Naměřené hodnoty deformace y , byly dosazeny do vzorce

$$E_t = \frac{3 \cdot F \cdot L^2 \cdot c}{2 \cdot b \cdot h^3 \cdot y} \quad (28)$$

a jednotlivé výsledky zaneseny do grafu.



Obr. 47. Průběh modulu tečení v čase.

Při prvotním zatížení nosníku byla zjištěna hodnota deformace $y = 4,49$ mm, která odpovídá modulu tečení $E_t = 2057,5$ MPa. Po 60 minutách klesl modul tečení na hodnotu $E_t = 562,4$ MPa a na konci experimentu byla tato hodnota $E_t = 398,4$ MPa.

ZÁVĚR

Cílem práce bylo navrhnout, konstrukčně zpracovat, vyrobit a ověřit funkčnost přípravku pro čtyřbodový ohyb. Hlavní požadavek byl kladen na konstrukční jednoduchost, vyrobiteľnost, plynulé nastavení vzdálenosti podpěr a povrchovou úpravu. Na posuvných členech jsou ukotveny podpěry, které lze prostřednictvím aretačních šroubů plynule nastavit ve dvou osách. Vůči vnějším vlivům je přípravek chráněn galvanickým zinkováním se silou vrstvy pokovení do 20 μm . Funkce přípravku byla ověřena tím, že byl sledován pokles modulu tečení a změny povrchových napětí při konstantním ohybovém zatížení, teplotě a vlhkosti vzduchu. Modul tečení byl vyhodnocován na základě hodnot naměřené deformace nosníku.

Naměřené výsledky lze aplikovat při dimenzování čističek odpadních vod, sýpek, jímek, bazénů apod. při montáži nebo servisních odstávkách, kdy je nádoba krátkodobě zatížena vnitřním nebo vnějším působením sil. Nádoby jsou zpravidla umístěny v zemi. Při běžném provozu se tlaky zeminy a vnitřní náplně nádoby vyrovnávají. Je-li nádoba vypuštěna a působí-li na ni tlak zeminy, může v krátkém časovém úseku docházet k nežádoucí deformaci, poklesu modulu tečení a tím k zborcení celé konstrukce.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ŠUBA, Oldřich. *Mechanické chování těles*. Vyd. 3. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, 2006, 96 s. ISBN 80-7318-484-2.
- [2] VOLEK, František. *Základy pružnosti a pevnosti*. Vyd. 2. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, 2006, 157 s. ISBN 80-7318-440-0.
- [3] HRUŠKA, František. *Senzory: Fyzikální principy, úpravy signálů, praktické použití*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010. ISBN 978-80-7454-096-7.
- [4] VLK, MILOŠ a kol. *Experimentální mechanika*. Brno : FIS VUT v Brně, 2003.
- [5] HRUBANT, L. a HRUBANT, J. *Měřicí technika*. odborné časopisy. [Online], 2004 [cit. 2013-01-06], URL: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au070427.pdf>.
- [6] VOJÁČEK, A. *automatizace.hw*. [Online], 2006 [cit. 2013-01-09], URL: <http://automatizace.hw.cz/clanek/2006111601>
- [7] VTS, Zlín. [Online] 2010 [cit. 2013-01-13], URL: <http://www.vtsz.cz/polovodicove-tenzometry.php>.
- [8] VTS, Zlín. [Online] 2010 [cit. 2013-01-13], URL: <http://www.vtsz.cz/files/lepeni-tenzometru.pdf>.
- [9] VYBÍRAL, B. *fyzikalniolympiada* [Online], 2012 [cit. 2013-01-07], URL: <http://fyzikalniolympiada.cz/texty/pruznost.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

M_o	[Nm]	Ohybový moment
T	[N]	Posouvající síla (příčná síla)
N	[N]	Normálová síla (osová síla)
F_{MAX}	[N]	Maximální zatěžující síla
F	[N]	Zatěžující síla
σ	[MPa]	Normálové napětí
σ_o	[MPa]	Napětí v ohybu
σ_{KRIT}	[MPa]	Kritické napětí
σ_{DOV}	[MPa]	Dovolené napětí
σ_{DO}	[MPa]	Dovolené napětí v ohybu
σ_{Dt}	[MPa]	Dovolené napětí v tahu
τ_{DSv}	[MPa]	Dovolené napětí ve svaru
L_p	[m]	Maximální vzdálenost podpěry od stojny
L	[m]	Vzdálenost podpěr
S	[m ²]	Plocha
S_{Sv}	[m ²]	Plocha svaru
s	[m]	Tloušťka svařovaného materiálu
a_{Sv}	[m]	Výška trojúhelníku koutového svaru
b_{Sv}	[m]	Délka svaru
φ	[rad]	Úhel natočení
ρ	[m]	Poloměr křivosti
E	[MPa]	Modul pružnosti
E_t	[MPa]	Modul tečení
ε	[-]	Poměrné prodloužení

J_z	$[m^4]$	Kvadratický moment průřezu
b	$[m]$	Šířka nosníku
h	$[m]$	Výška nosníku
EJ_z	$[Nm^2]$	Tuhost v ohybu
W_o	$[m^3]$	Průřezový modul v ohybu
K	$[-]$	Koeficient deformace
k	$[-]$	Součinitel bezpečnosti
l_{RED}	$[m]$	Redukovaná délka vzpěry
l	$[m]$	Délka vzpěry
i	$[m]$	Poloměr setrvačnosti
λ	$[-]$	Štíhlost
λ_m	$[-]$	Mezní štíhlost
y	$[m]$	Deformace nosníku (průhyb)
c	$[m]$	Rameno zatěžující síly

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Metoda řezu.	12
Obr. 2. Nosník namáhaný ohybovým momentem.	13
Obr. 3. Oddělená levá část nosníku.	13
Obr. 4. Deformační hypotéza pro prostý ohyb.	14
Obr. 5. Deformovaný element nosníku při prostém ohybu.	15
Obr. 6. Typy vnějších zatížení nosníku.	17
Obr. 7. Průběh ohybového momentu a posouvajících sil.	17
Obr. 8. Rozdělení odporových tenzometrů.	18
Obr. 9. Drátkový tenzometr.	19
Obr. 10. Foliový tenzometr.	21
Obr. 11. Katodové napařování.	22
Obr. 12. Vakuové napařování.	23
Obr. 13. Tři nejběžnější tvarová provedení polovodičových tenzometrů.	25
Obr. 14. Typy polovodičových tenzometrů bez (nahore) a s podložkou (dole).	26
Obr. 15. Význam označení polovodičových tenzometrů.	26
Obr. 16. Příprava tenzometru při lepení.	31
Obr. 17. Vzorek typů a velikostí odporových tenzometrů.	36
Obr. 18. Tenzometrické řetězce.	38
Obr. 19. Tenzometrické kříže a růžice.	39
Obr. 20. Tenzometry pro odvrtávací metodu.	39
Obr. 21. Tenzometry pro sloupkovou metodu.	40
Obr. 22. Přivařovací tenzometry.	40
Obr. 23. Tenzometr s volnou mřížkou.	41
Obr. 24. Přivařovací vysokoteplotní tenzometry.	41
Obr. 25. Přípravek pro měření.	45
Obr. 26. Stojna na vzpěr.	46
Obr. 27. Nosník na ohyb.	47
Obr. 28. Svár posuvného členu na smyk.	48
Obr. 29. Zkušební vzorek.	49
Obr. 30. Zatížení zkušebního vzorku.	49
Obr. 31. Zvolený typ tenzometru.	50
Obr. 32. Induktivní snímač dráhy WA-L.	50

Obr. 33. Ústředna MGC Plus.....	51
Obr. 34. Klimatická komora VCS 7150-5.....	51
Obr. 35. Sada normalizovaných závaží.....	52
Obr. 36. Lepidlo Loctite 406.....	52
Obr. 37. Aktivátor Loctite 770.....	53
Obr. 38. Lepení tenzometru.....	54
Obr. 39. Nanesení krycí vrstvy.....	54
Obr. 40. Připájení tenzometru.....	55
Obr. 41. Kompenzační odpory.....	55
Obr. 42. Půlmostové zapojení tenzometru.....	55
Obr. 43. Přípravek se zatíženým nosníkem v klimatické komoře.....	56
Obr. 44. Průběh povrchového tahového napětí na nosníku v čase.....	57
Obr. 45. Průběh povrchového tlakového napětí nosníku v čase.....	58
Obr. 46. Průběh deformace nosníku v čase.....	58
Obr. 47. Průběh modulu tečení v čase.....	59

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Materiál a koeficient deformace kovových tenzometrů.	20
Tab. 2. Vlastnosti PP udávané výrobcem.	49
Tab. 3. Parametry a zatížení nosníku.	49

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Přípravek 1/7 – Trn

Příloha P II: Přípravek 2/7 – Posuvný člen pravý

Příloha P III: Přípravek 3/7 – Deska

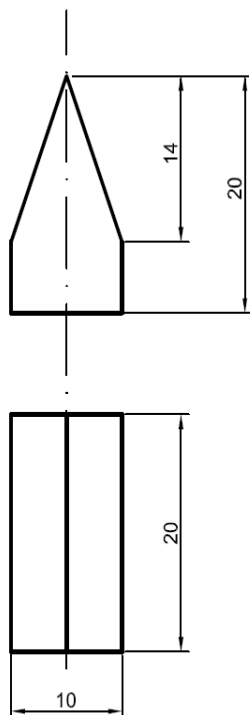
Příloha P IV: Přípravek 4/7 – Posuvný člen levý

Příloha P V: Přípravek 5/7 – Kluzné uložení 2

Příloha P VI: Přípravek 6/7 – Kluzné uložení 1

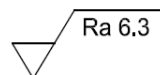
Příloha P VII: Přípravek 7/7 – Sestava

PŘÍLOHA P I: PŘÍPRAVEK 1/7 - TRN



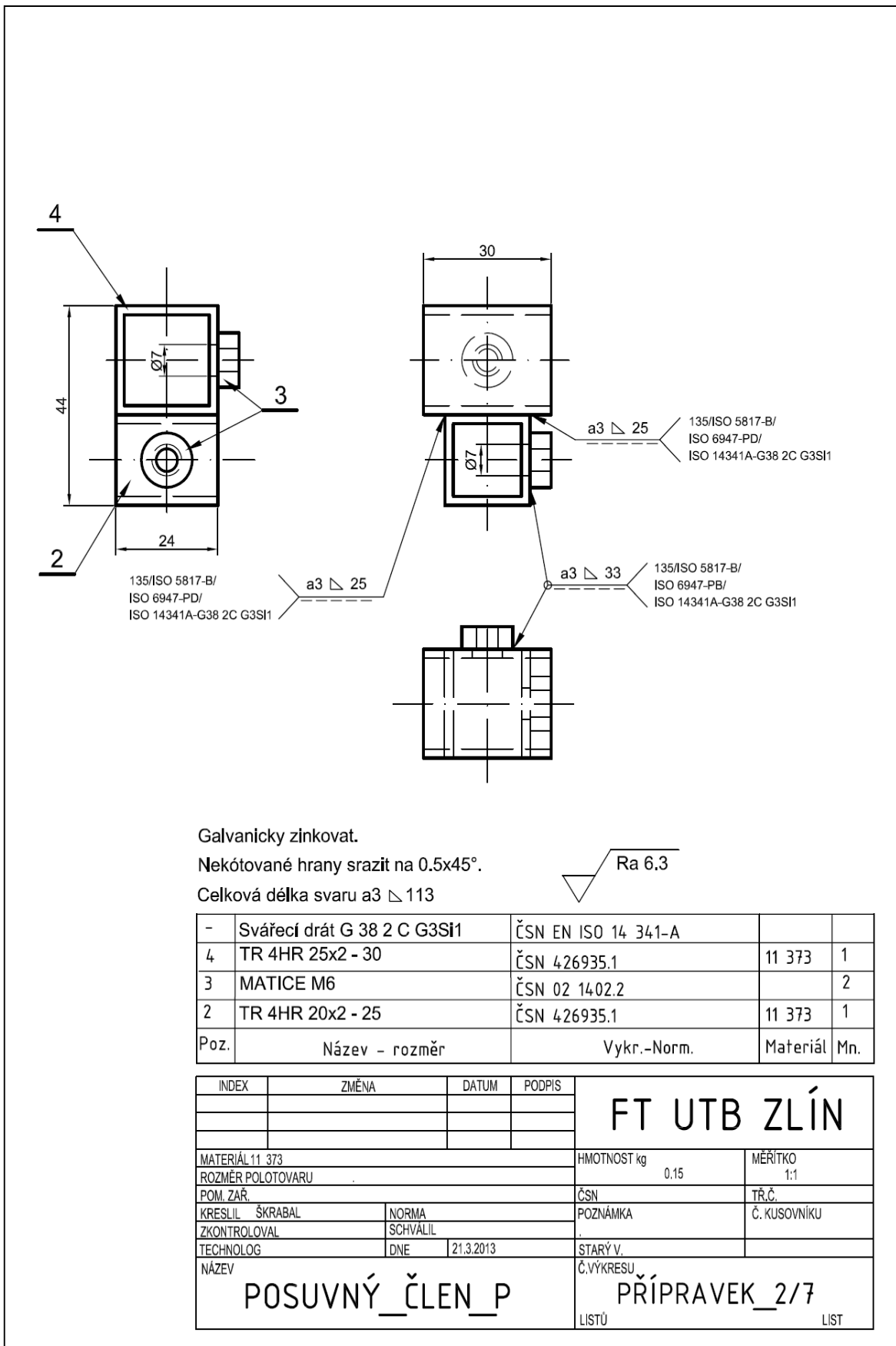
Galvanicky zinkovat.

Nekótované hrany srazit na 0.5x45°.

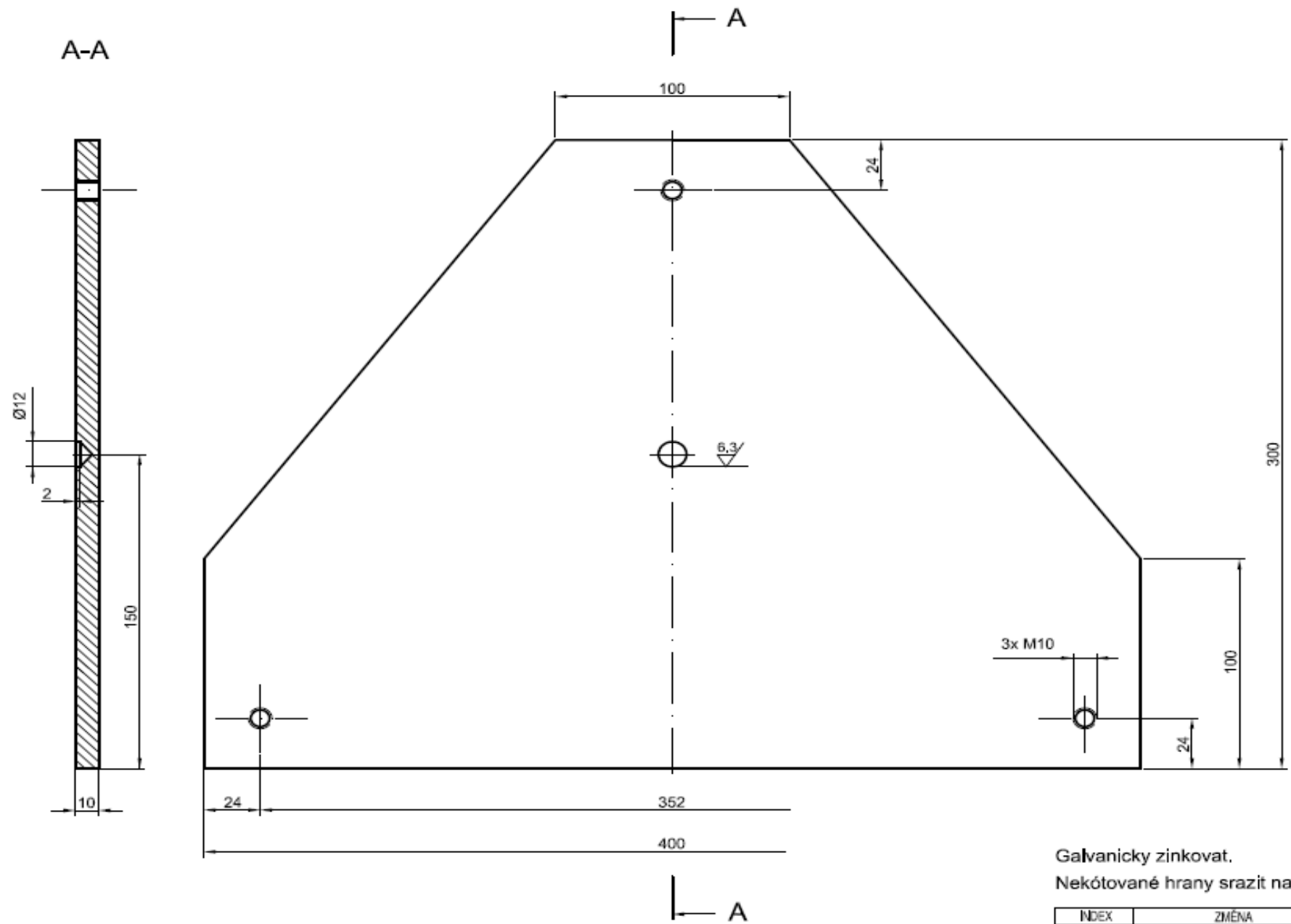


INDEX	ZMĚNA	DATUM	PODPIS	FT UTB ZLÍN	
MATERIÁL 11 373				HMOTNOST kg	MĚŘÍTKO
ROZMĚR POLOTOVARU				0,012	2:1
POM. ZAŘ.				ČSN	TR.Č.
KRESLIL	ŠKRABAL	NORMA		POZNÁMKA	Č. KUSOVNÍKU
ZKONTROLOVAL	SCHVÁLIL				
TECHNOLOG	DNE	21.3.2013		STARÝ V.	
NÁZEV				Č. VÝKRESU	
TRN				PŘÍPRAVEK_1/7	
				LISTŮ	LIST

PŘÍLOHA P II: PŘÍPRAVEK 2/7 – POSUVNÝ ČLEN PRAVÝ



PŘÍLOHA P III: PŘÍPRAVEK 3/7 – DESKA



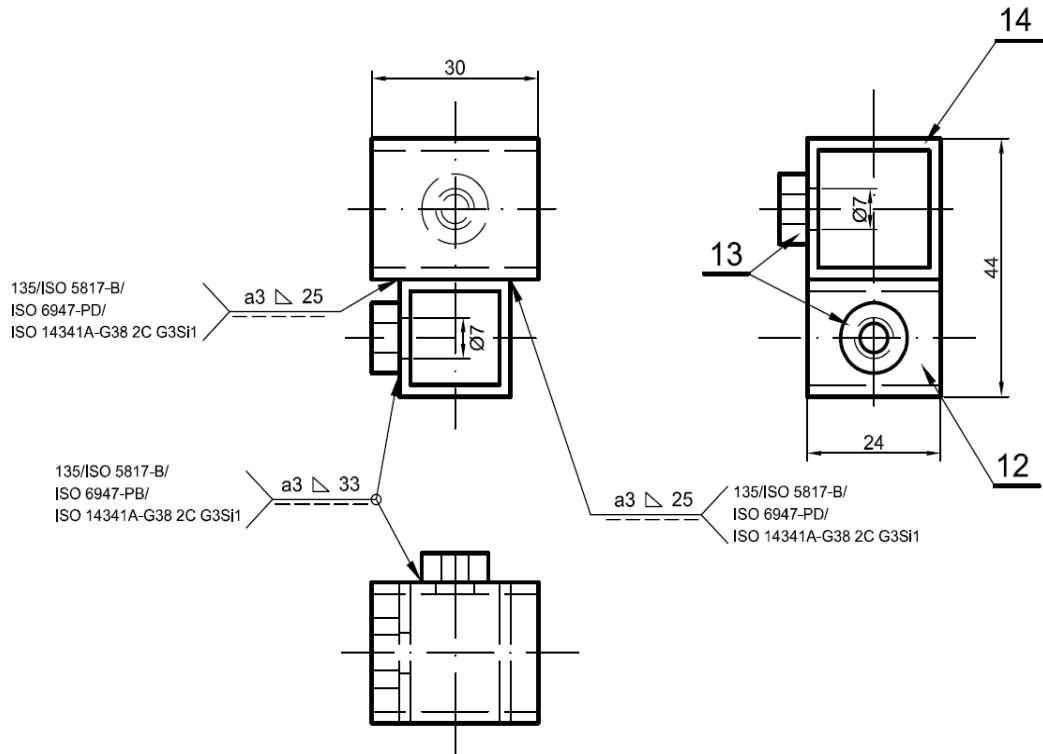
Galvanicky zinkovat.

Nekótované hrany srazit na 0.5x45°.



INDEX	ZMĚNA	DATUM	PODPIS	FT UTB ZLÍN	
MATERIÁL 11 373				HMOTNOST kg	MĚŘÍTKO
ROZMĚR POLOTOVARU				5,2	1:2
POM. ZAB.				ČSN	TR.Č.
KRESLIL ŠKRABAL	NORMA			POZNÁMKA	Č. KUSOVNIKU
ZKONTROLOVAL	SCHVÁLIL				
TECHNOLÓG	DNE	21.3.2013		STARÝ V.	
NÁZEV				Č. VÝKRESU	
DESKA				PŘÍPRAVEK_3/7	
				LISTŮ	LIST

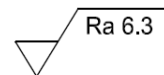
PŘÍLOHA P IV: PŘÍPRAVEK 4/7 – POSUVNÝ ČLEN LEVÝ



Galvanicky zinkovat.

Nekótované hrany srazit na 0.5x45°.

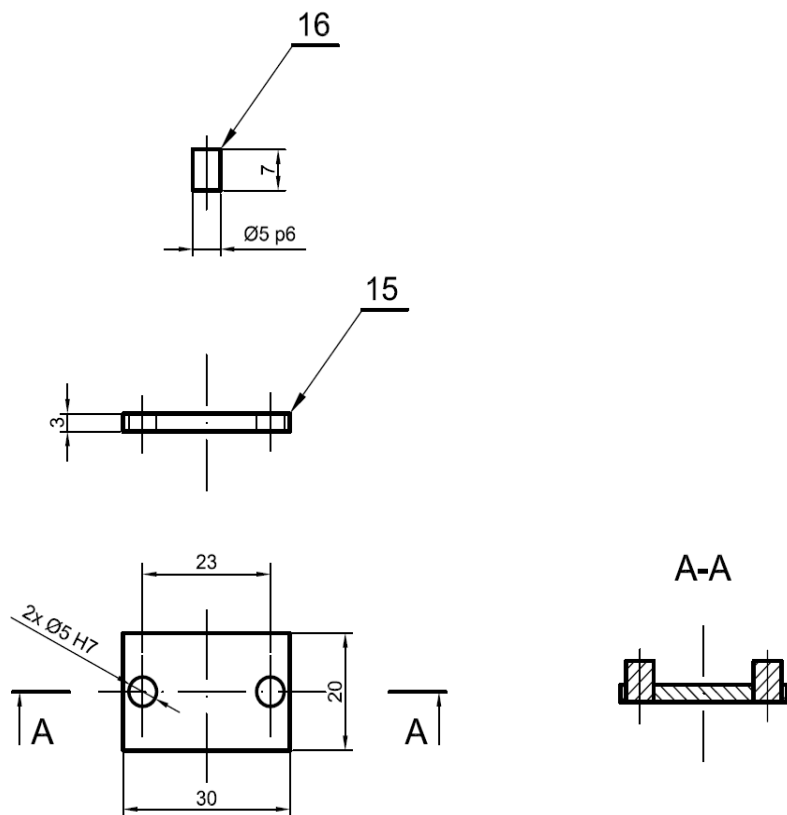
Celková délka svaru a3 ∇ 113



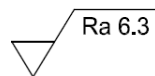
-	Svářecí drát G 38 2 C G3Si1	ČSN EN ISO 14 341-A		
14	TR 4HR 25x2 - 30	ČSN 426935.1	11 373	1
13	MATICE M6	ČSN 02 1402.2		2
12	TR 4HR 20x2 - 25	ČSN 426935.1	11 373	1
Poz.	Název - rozměr	Vykr.-Norm.	Materiál	Mn.

INDEX	ZMĚNA	DATUM	PODPIS	FT UTB ZLÍN	
MATERIÁL 11 373			HMOTNOST kg		MĚŘÍTKO
ROZMĚR POLOTOVARU			0,15		1:1
POM. ZAŘ.			ČSN		TR.Č.
KRESLIL	ŠKRABAL	NORMA	POZNÁMKA		Č. KUSOVNIKU
ZKONTROLOVAL	SCHVÁLIL				
TECHNOLOG	DNE	21.3.2013	STARÝ V.		
NÁZEV			Č. VÝKRESU		
POSUVNÝ_ČLEN_L			PŘÍPRAVEK_4/7		
			LISTŮ		LIST

PŘÍLOHA P V: PŘÍPRAVEK 5/7 – KLUZNÉ ULOŽENÍ 2



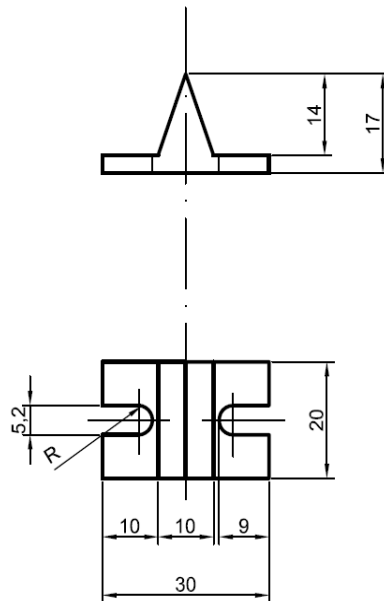
Galvanicky zinkovat.
Nekótované hrany srazit na 0.5x45°.
2x váleček nalisovat do podložky



16	Váleček		11 373	2
15	Podložka		11 373	1
Poz.	Název - rozměr		Vykr.-Norm.	Materiál Mn.

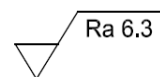
INDEX	ZMĚNA	DATUM	PODPIS	FT UTB ZLÍN	
MATERIÁL 11 373				HMOTNOST kg	MĚŘÍTKO
ROZMĚR POLOTOVARU				0.02	1:1
POM. ZAŘ.				ČSN	TŘ.Č.
KRESLIL ŠKRABAL	NORMA		POZNÁMKA	Č. KUSOVNÍKU	
ZKONTROLOVAL	SCHVÁLIL				
TECHNOLOG	DNE	21.3.2013	STARÝ V.		
NÁZEV			Č. VÝKRESU		
KLUZNÉ_ULOŽENÍ_02			PŘÍPRAVEK_5/7		
			LISTŮ	LIST	

PŘÍLOHA P VI: PŘÍPRAVEK 6/7 – KLUZNÉ ULOŽENÍ 1



Galvanicky zinkovat.

Nekótované hrany srazit na 0,5x45°.



INDEX	ZMĚNA	DATUM	PODPIS	FT UTB ZLÍN	
MATERIÁL 11 373				HMOTNOST kg	MĚŘÍTKO
ROZMĚR POLOTOVARU				0,012	1:1
POM. ZAŘ.				ČSN	TR.Č.
KRESLIL ŠKRABAL	NORMA			POZNÁMKA	Č. KUSOVNÍKU
ZKONTROLOVAL	SCHVÁLIL				
TECHNOLOG	DNE	21.3.2013		STARÝ V.	
NÁZEV	KLUZNÉ_ULOŽENÍ_01			Č. VYKRESU	PŘÍPRAVEK_6/7
				LISTŮ	LIST

PŘÍLOHA P VII: PŘÍPRAVEK 7/7 – SESTAVA

