

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2008

Tomáš Vojtek

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Deformace rámu testovacího zařízení železničních kol při realizaci experimentů

Tomáš Vojtek

Bakalářská práce

2008

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji rodinným příbuzným za podporu a vytvoření dobrého zázemí nejen pro vytvoření bakalářské práce. Nemohu zde opomenout poděkování lidem z havířovského gymnázia, kteří se zasloužili o mé vzdělání v matematice a fyzice, jsou to paní Mgr. Jindřiška Janečková a pan PaedDr. Vít Tomis, který svým entuziasmem podnítil můj kladný vztah k vědám souvisejícím s fyzikou. Tento vztah prohloubil, mnohé mě naučil a k problematice cenné rady dal pan prof. Ing. Rudolf Kaloč, CSc., kterému tímto děkuji. Děkuji také paní Ing. Stanislavě Vitoušové, Ph.D. a panu Ing. Aleši Hábovi za cenné praktické rady při zpracování této práce. Děkuji vedoucímu práce panu prof. Ing. Bohumilu Culkovi, CSc. za obětavost, vstřícnost, cenné rady a připomínky a za to, co jsem se naučil pod jeho vedením při této práci.

SOUHRN

Práce se zabývá analýzou silového namáhání konstrukce rámu Testovacího zařízení železničních kol, které slouží v laboratoři DFJP k provádění simulačních experimentů při výzkumu kontaktu kolo-kolejnice. Práce se zaměřuje na odhad mechanického napětí, se kterým je nutno počítat při zvýšení maximální dovolené kolmé kolové síly ze současných 70 kN na plánovaných 120 kN. Toho bylo docíleno experimentálně pomocí tenzometrického měření deformací, jehož popis a nejistoty jsou v práci také rozebírány. Součástí práce je i výkres části zařízení s „rotující kolejnicí“ a výkres detailu kritického místa.

KLÍČOVÁ SLOVA

kontakt kolo-kolejnice, bezpečnost proti vykolejení, tenzometrie, deformace, nejistoty měření

TITLE

Deformation of the rail wheel testing installation frame during experiments.

ABSTRACT

The work deals with a stress analysis of the rail wheel testing installation frame which is situated in Jan Perner Transport Faculty laboratory and is instrumental to simulation experiments within the rail-wheel contact research. The work focuses on estimation of mechanical stress which can appear during experiments with higher wheel force (120 kN) than currently allowed 70 kN. This point was reached by experimental work and strain gauges measurement. There is a description of the measurement and its uncertainties in this work as well. A technical drawing of the 'rotating rail-part' of the installation and a detailed drawing of the critical place are included.

KEYWORDS

rail-wheel contact, derailment resistance, strain gauges measurements, strain, measurement uncertainties

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš VOJTEK**

Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**

Studijní obor: **Dopravní prostředky-Kolejová vozidla**

Název tématu: **Deformace rámu testovacího zařízení železničních kol při realizaci experimentů.**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

V práci se zaměřte na deformace rámu při působení statické svislé kolové síly $Q_{max} = 120$ kN. Deformace (mechanické napětí) rámu zjistěte experimentem. Vypracujte:

1. Experimentální analýzu mechanického napětí rámu.
2. Výkres části rámu s kritickým místem.
3. Postup měření deformace (mechanického napětí).
4. Popis nejistot měření deformace (mechanického napětí).

Rozsah grafických prací: **podle pokynů vedoucího BP**
Rozsah pracovní zprávy: **40 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:


- [1] ŠVEJNOCH, V.: Teorie kolejových vozidel, Praha, ČVUT Praha, 1. vydání, 1991, s. 251, ISBN 80-01-00622-0.
[2] HARTWIG, P.: Konstruktive Anpassung des an der Universität Pardubice vorhandenen Eisenbahnradprüfstand. [Diplomová práce], Dopravní fakulta Jana Pernera Univerzity Pardubice, Pardubice, 2006.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.**
Katedra dopravních prostředků a diagnostiky

Datum zadání bakalářské práce: **18. února 2008**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. května 2008**


prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.
děkan

L.S.


doc. Ing. Miroslav Tesař, CSc.
vedoucí katedry

dne

OBSAH

OBSAH	6
1 Úvod	7
2 Současný stav problematiky	8
2.1 Testovací zařízení železničních kol	8
2.2 Síly mezi kolem a kolejnicí	8
3 Teoretický rozbor namáhání ramene	12
3.1 Mechanický model.....	12
3.2 Odhad maximálního ohybového napětí	14
3.3 Určení míst vhodných k měření.....	16
4 Experimentální analýza namáhání ramene.....	18
4.1 Postup a popis měření	18
4.1.1 Tenzometrické snímače	18
4.1.2 Instalace tenzometrů	21
4.1.3 Popis měřicího řetězce, kalibrace	22
4.2 Nejistoty měření.....	25
4.2.1 Nejistoty tenzometrických snímačů.....	26
4.2.2 Nejistoty zbytku měřicího řetězce	29
5 Analýza naměřených dat.....	32
5.1 Výsledky měření	32
5.2 Maximální napětí a extrapolace pro 120 kN.....	34
5.3 Diskuze	35
6 Závěr	36
LITERATURA.....	37
Seznam příloh.....	38

UNIVERZITA PARDUBICE Dopravní fakulta Jana Pernera Dislokované pracoviště Česká Třebová	Bakalářská práce	Strana -7-
---	-------------------------	------------

1 Úvod

Dopravní fakulta Jana Pernera je již několik let místem, kde probíhá výzkum fyzikálních dějů v kontaktu železničního kola s kolejnicí. Jelikož se jedná o velice komplexní problém, nedají se dělat závěry pouze teoreticky a je nutno provádět simulační experimenty. Z provozních důvodů by bylo příliš náročné provádět experimentální měření přímo na vozidlech, a proto je pozornost soustředěna na vývoj speciálního zkušebního zařízení.

V laboratoři DFJP vzniklo a je v provozu *Testovací zařízení železničních kol*. Na tomto zařízení probíhají experimenty týkající se především výzkumu bezpečnosti proti vykolejení a adheze. Aby mohly být prováděny věrnější simulace reálného kontaktu, je zapotřebí rozšířit možnosti testovacího zařízení zvýšením maximální přítláčné kolové síly.

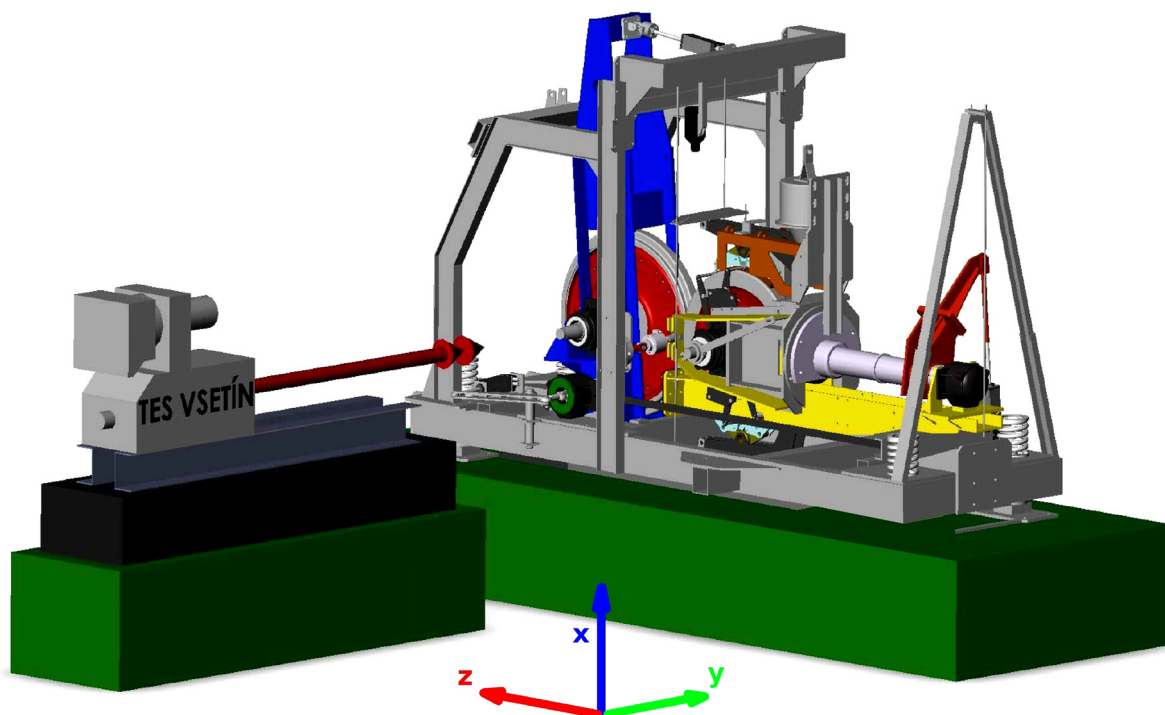
Tato práce si klade za cíl vytvořit podklad pro případné další rozšíření možností TZŽK v podobě analýzy silového namáhání jeho rámu. Taková analýza představuje vyhledání kritických míst na konstrukci rámu, ve kterých dochází ke vzniku největšího mechanického napětí materiálu a určit velikost tohoto napětí při současných dovolených silách. Na základě těchto hodnot je možné pomocí extrapolace s určitou přesností odhadnout mechanické napětí při vyšší kolové síle. Poté je možné odhadnout, zda by šlo bezpečně provádět experimenty s přítláčnou kolovou silou až 120 kN. V práci je uveden teoretický a experimentální rozbor namáhání přítláčného ramene včetně návrhu, postupu a popisu měření.

2 Současný stav problematiky

2.1 Testovací zařízení železničních kol

Předmětem výzkumu na Testovacím zařízení železničních kol (TZŽK) je způsob měření příčných a svislých sil mezi kolem a kolejnici. TZŽK slouží ke vnášení těchto zatěžovacích sil a k jejich měření s použitím tenzometrie. V současné době je možno na zařízení vyvíjet přítláčnou kolmou kolovou sílu maximálně 70 kN. V reálném styku kola s kolejnici (jak bude ukázáno) však vznikají svislé síly i větší než uvedená hodnota.

Zařízení se skládá z rámu svařované konstrukce, sestavy rotující kolejnice, sestavy kola a pohonu s elektromotorem. Vnější zatěžovací síla je vnášena elektrickým válcem přes „modré rameno“ a ložisko na rotující kolejnici. Na *obr. 1* je vidět model celého zařízení a zavedené směry souřadnicových os x, y, z . Sestavný výkres části zařízení s rotující kolejnici je v *příloze 3*.



Obr. 1: Model celého zařízení s naznačenými směry os x, y, z vypracovaný v [2]

2.2 Síly mezi kolem a kolejnici

Jedním z hlavních důvodů měření těchto sil je výzkum v oblasti bezpečnosti proti vykolejení. Bezpečnost proti vykolejení má dva základní aspekty. Vozidlo může vykolejit, jestliže

- dojde k destrukci některého z nosných dílů pojezdu nebo

- poměr $\frac{Y}{Q}$ přesáhne určitou mez vykolejení.

Y příčná síla mezi kolem a kolejnicí

Q svislá síla mezi kolem a kolejnicí

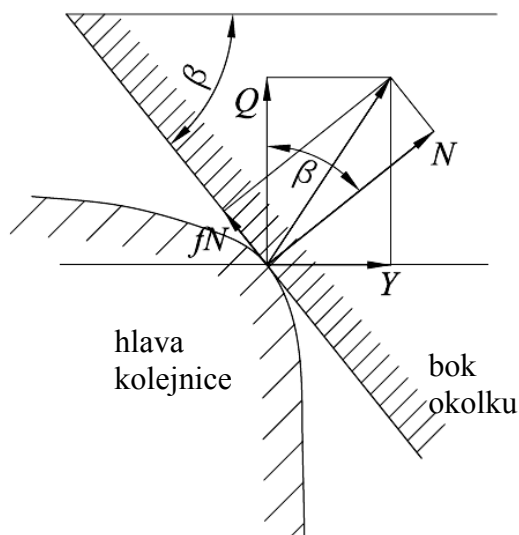
Síly Q a Y tedy tvoří hlavní kritérium při posuzování bezpečnosti proti vykolejení.

Ke zmíněné mezi vykolejení dojde, když se veškeré síly mezi kolem a kolejnicí přenáší pouze okolkem a zároveň výslednice sil je v místě kontaktu kolmá k profilu kolejnice, resp. okolku (síla N), takže neexistuje síla, která by zabránila vyšplhání okolku na hlavu kolejnice. Důležitou roli zde hraje úhel kuželovitosti okolku β . Kdyby nebyla uvažována třecí síla mezi okolkem a kolejnicí, rovnal by se poměr $\frac{Y}{Q}$ přímo tangente úhlu β . Tato třecí síla však, jak bude ukázáno, musí být uvažována, protože má na bezpečnost proti vykolejení velký vliv. Prakticky se vyskytují profily kol s úhly $\beta_1 = 60^\circ$ nebo $\beta_2 = 70^\circ$. Pro tyto úhly by pro srovnání vyšly hodnoty

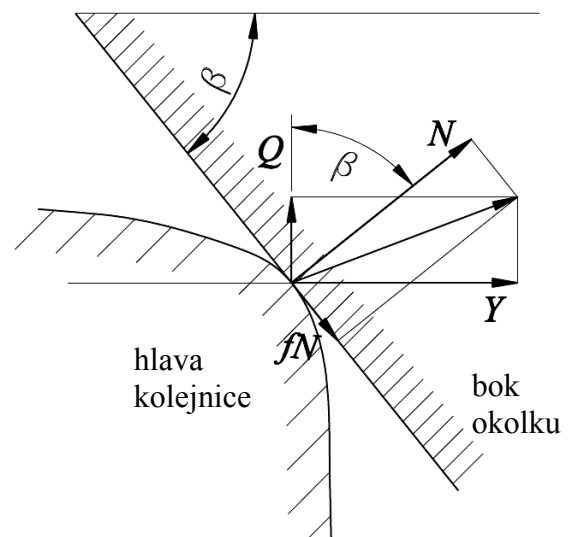
$$\operatorname{tg}\beta_1 = 1,732$$

$$\operatorname{tg}\beta_2 = 2,747$$

Existují dva případy lišící se orientací třecí síly fN , které jsou označeny jako případy a), b) na obr. 2.



Obr. 2a): Příklad kvazistatického působení sil



Obr. 2b): Příklad impulsního působení sil

První případ představuje kvazistatickou polohu nabíhajícího kola, kdy třecí síla směřuje „nahoru“, tedy má kladnou složku v souřadnici z . V tom případě lze podle *obr. 2a*) psát rovnice rovnováhy sil:

$$\begin{aligned} fN \sin \beta + N \cos \beta &= Q \\ N \sin \beta - fN \cos \beta &= Y \end{aligned}$$

odkud plyne pro poměr $\frac{Y}{Q}$:

$$\left(\frac{Y}{Q}\right)_a = \frac{N(\sin \beta - f \cos \beta)}{N(f \sin \beta + \cos \beta)} = \frac{\cos \beta(\operatorname{tg} \beta - f)}{\cos \beta(f \operatorname{tg} \beta + 1)} = \frac{\operatorname{tg} \beta - f}{f \operatorname{tg} \beta + 1} \quad (2.1)$$

$\left(\frac{Y}{Q}\right)_a$ mez bezpečnosti proti vykolejení v případě a) – kvazistatickém

Uvažována je nepříznivější z možných hodnot součinitele tření f z hlediska bezpečnosti proti vykolejení, tedy $f = 0,4$. [3] Pak po dosazení do (2.1) vyjde

$$\begin{aligned} \text{pro } \beta_1 = 60^\circ \quad \left(\frac{Y}{Q}\right)_a &= 0,787 \\ \text{pro } \beta_2 = 70^\circ \quad \left(\frac{Y}{Q}\right)_a &= 1,118 \end{aligned}$$

Druhý případ nastane při náhlém krátkodobém zvýšení síly Y (impulsní zatížení). Zde působí třecí síla fN „dolu“, tedy má zápornou složku v souřadnici z . Podle *obr. 2b*) budou rovnice rovnováhy sil:

$$\begin{aligned} N \cos \beta - fN \sin \beta &= Q \\ N \sin \beta + fN \cos \beta &= Y \end{aligned}$$

odkud plyne pro poměr $\frac{Y}{Q}$:

$$\left(\frac{Y}{Q}\right)_b = \frac{N(\sin \beta + f \cos \beta)}{N(\cos \beta - f \sin \beta)} = \frac{\cos \beta(\operatorname{tg} \beta + f)}{\cos \beta(1 - f \operatorname{tg} \beta)} = \frac{\operatorname{tg} \beta + f}{1 - f \operatorname{tg} \beta}$$

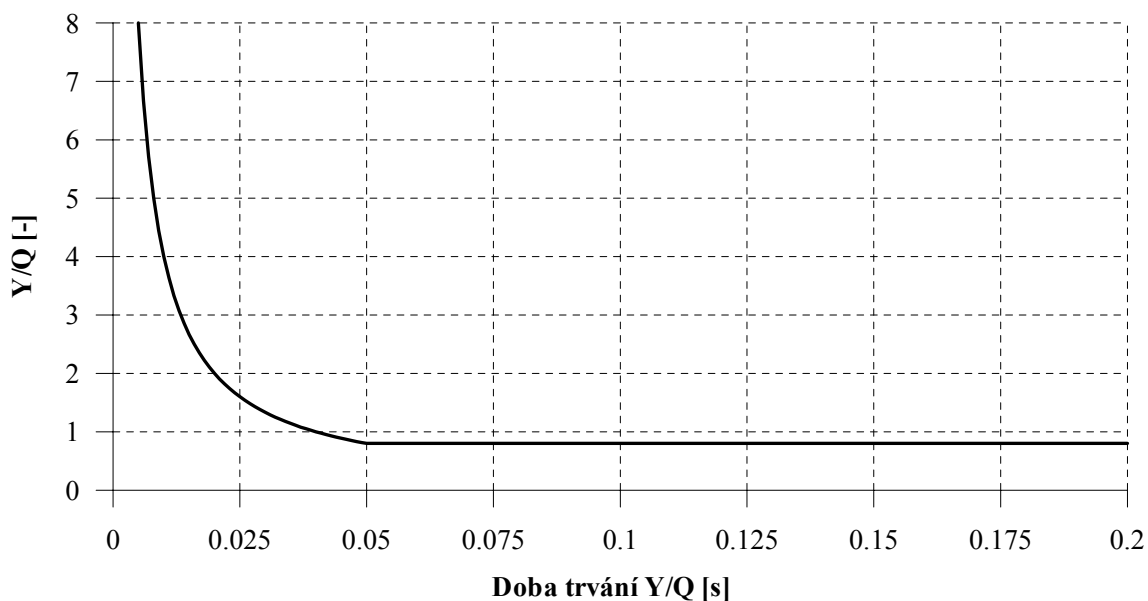
$\left(\frac{Y}{Q}\right)_b$ mez bezpečnosti proti vykolejení v případě b) – impulsním

Zde je uvažován opět nepříznivější hodnota součinitele tření, $f = 0,2$, a po dosazení hodnot vyjde:

$$\text{pro } \beta_1 = 60^\circ \quad \left(\frac{Y}{Q}\right)_b = 2,956$$

$$\text{pro } \beta_2 = 70^\circ \quad \left(\frac{Y}{Q}\right)_b = 6,534$$

V praxi se považuje za provozní mez bezpečnosti hodnota 0,8 pro síly působící od 0,05 s déle a pro síly působící kratší dobu se připouští hodnota $\frac{0,04}{t}$, kde t je doba trvání impulsu.



Graf 1: Závislost kritické hodnoty poměru $\frac{Y}{Q}$ na délce jeho trvání

3 Teoretický rozbor namáhání ramene

Pro řešení tohoto problému a získání uspokojivého výsledku (bez použití numerických metod) je nutné provést experimentální měření. Nejvhodnější prostředek k experimentální analýze je tenzometrické měření deformací. Díky kontaktu snímače s měřenou součástí se snímač deformuje s jejím povrchem a mění svůj elektrický odpor. Přesnost měření je citlivá na kvalitu kontaktu, a proto je instalace tenzometrů náročná. Měření musí být provedeno na rovném místě. Zjištění mechanického napětí v tvarových přechodech a svarech je tedy vyloučené. Z uvedeného plyne požadavek na vytipování nejvhodnějších míst tak, aby nebylo nutné použití příliš velkého počtu tenzometrických snímačů a zároveň bylo možné odhalit kritické místo.

3.1 Mechanický model

Pro první přiblížení řešení poslouží úvahy na základě klasické nauky o pružnosti a pevnosti. Vyšetřované rameno je možné nahradit zjednodušeným mechanickým modelem nosníku konstantního průřezového modulu namáhaného třemi statickými silami v rovině, jejichž působiště jsou vidět na *obr. 3*.

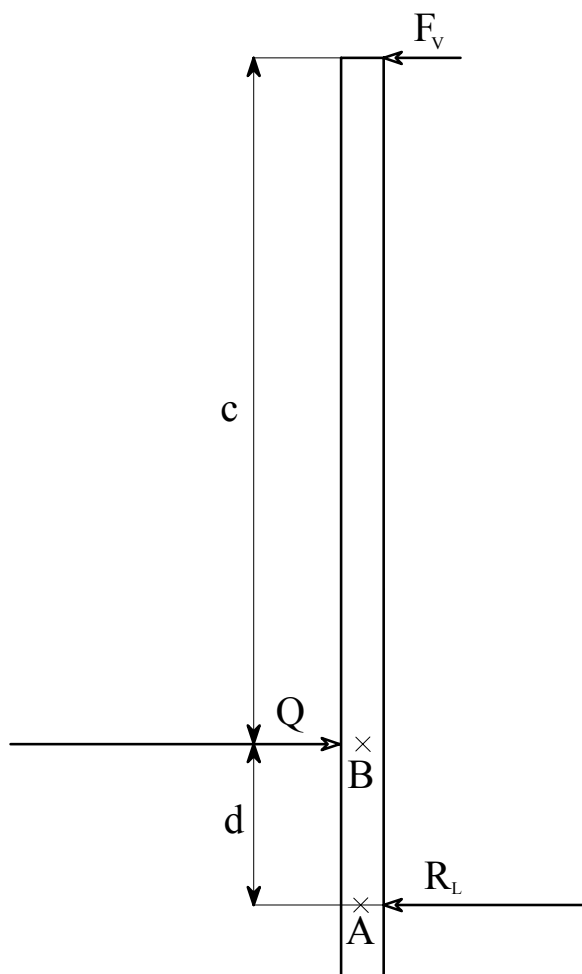
- uchycení zdroje síly F_V ,
- ložisko rotující kolejnice (bod **B**),
- spodní ložisko v rámu (bod **A**).

Protože mezi rotující kolejnici a druhým kolem je valivá vazba, může být směr reakce v ložisku rotující kolejnice pouze ve směru spojnice středů kol, tedy ve směru vodorovném (směr osy z). Směr zdrojové síly je také daný, takže úloha je staticky určitá a lze snadno určit velikost a směr reakcí. Pro zjednodušení budou všechny síly považovány za průměty do osy z . Z toho plyne sestavení rovnice rovnováhy sil podle schématu na *obr. 3*.

$$Q - F_V - R_L = 0 \quad (3.1)$$

a rovnice rovnováhy momentů z hledem k bodu **A**:

$$(c + d)F_V - d \cdot Q = 0 \quad (3.2)$$



Obr. 3: Síly působící na rameno a jejich působíště

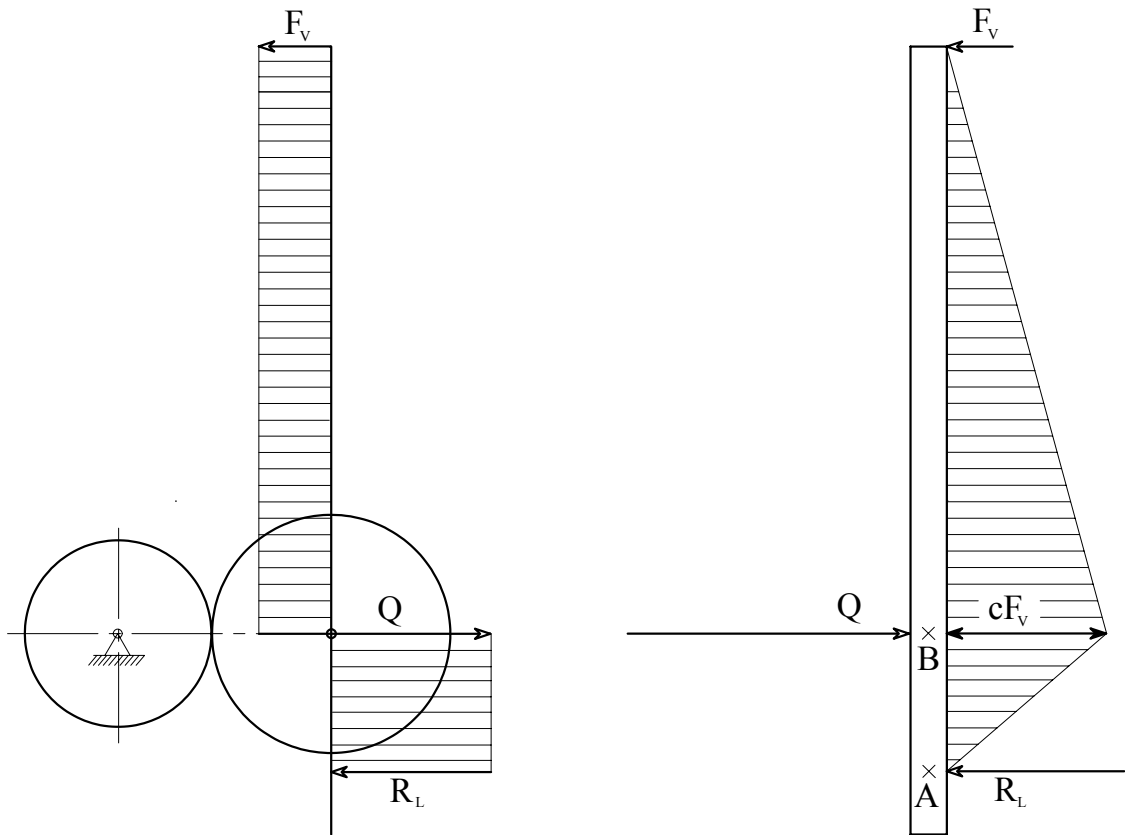
Q přítláčná síla mezi kolem a kolejnici

F_v zdrojová síla válce

R_L reakce ve spodním ložisku

c, d vzdálenosti, $c = 1960$ mm, $d = 400$ mm

Průběh posouvající síly a ohybového momentu je pak uveden na obr. 4.



Obr. 4: Průběh posouvající síly (vlevo) a ohybového momentu (vpravo)

Z obr. 4 plyne, že maximální ohybový moment působí v bodě **B** a má velikost

$$M_o = F_v c \quad (3.3)$$

Síla F_v je určena rovnicí (3.2):

$$F_v = \frac{d}{c+d} Q, \quad (3.4)$$

takže po dosazení do (3.3) je maximální ohybový moment

$$M_o = \frac{cd}{c+d} Q. \quad (3.5)$$

3.2 Odhad maximálního ohybového napětí

Zjednodušující předpoklady jsou následující. Rameno je zatíženo pouze ohybovým momentem v jednom směru vzniklým působením popsanych vodorovných sil. Dále je rameno

považováno za nosník s konstantní tuhostí po celé délce, ve kterém nevznikají smyková napětí způsobené kroucením. Ohybové napětí lze určit podle vztahu

$$\sigma(x) = \frac{M_o(x)}{W_o} = \frac{M_o(x)z_{\max}}{I_o} \quad (3.6)$$

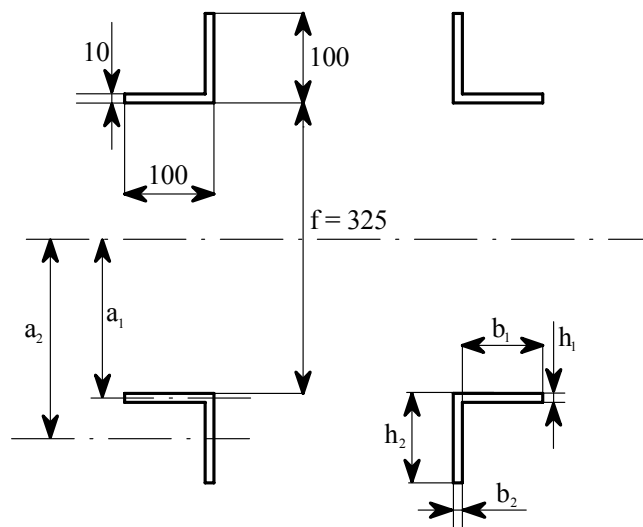
$M_o(x)$ ohybový moment v místě namáhání

z_{\max} největší vzdálenost vláken od neutrální osy

I_o kvadratický moment setrvačnosti v ohybu ramena

Maximální moment síly M_o je určen rovnicí (3.5). Největší vzdálenost vláken od neutrální osy z_{\max} je podle *obr. 5*

$$z_{\max} = \frac{f}{2} + 100 \text{ mm} = \left(\frac{325}{2} + 100 \right) \text{ mm} = 262,5 \text{ mm}$$



Obr. 5: Příčný průřez nosníky ramena

Zbývá určit kvadratický moment setrvačnosti v ohybu I_o . Rameno se v kritickém místě skládá ze čtyř tyčí průřezu „L“. Tuto tyč lze rozložit na dva obdélníky o stranách b_1, h_1 a b_2, h_2 (*obr. 5*). Obdélníky mají vzhledem ke svým osám momenty setrvačnosti I'_{o1} a I'_{o2} :

$$I'_{o1} = \frac{1}{12} b_1 h_1^3$$

$$I'_{o2} = \frac{1}{12} b_2 h_2^3$$

UNIVERZITA PARDUBICE Dopravní fakulta Jana Pernera Dislokované pracoviště Česká Třebová	Bakalářská práce	Strana -16-
---	-------------------------	-------------

Tyto momenty setrvačnosti je nutno přepočíst na momenty setrvačnosti vzhledem ke skutečné neutrální ose namáhání, posunuté oproti vlastním osám o hodnoty a_1 a a_2 . (obr. 5)

$$a_1 = \left(\frac{325}{2} + 5 \right) \text{ mm} = 167,5 \text{ mm}$$

$$a_2 = \left(\frac{325}{2} + 50 \right) \text{ mm} = 212,5 \text{ mm}$$

Jestliže S_1 a S_2 jsou plochy obdélníků tvořících profil tyče, pak s použitím Steinerovy věty lze psát

$$I_{o1} = \frac{1}{12} b_1 h_1^3 + S_1 a_1^2 = \frac{1}{12} b_1 h_1^3 + b_1 h_1 a_1^2$$

$$I_{o2} = \frac{1}{12} b_2 h_2^3 + S_2 a_2^2 = \frac{1}{12} b_2 h_2^3 + b_2 h_2 a_2^2$$

a celkový moment setrvačnosti I_o je

$$I_o = 4(I_{o1} + I_{o2}) = \frac{1}{3} b_1 h_1^3 + 4b_1 h_1 a_1^2 + \frac{1}{3} b_2 h_2^3 + 4b_2 h_2 a_2^2$$

$$I_o = 2,85 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4 = 28\,500 \text{ cm}^4$$

Ohybové napětí potom vychází, pro $c = 1\,960 \text{ mm}$, $d = 400 \text{ mm}$ a $Q = 70\,000 \text{ N}$:

$$\sigma = \frac{M_{o\max} z_{\max}}{I_o} = \frac{cd}{c+d} \frac{Q z_{\max}}{I_o} \quad (3.7)$$

$$\underline{\underline{\sigma(70 \text{ kN}) = 21,4 \text{ MPa}}}$$

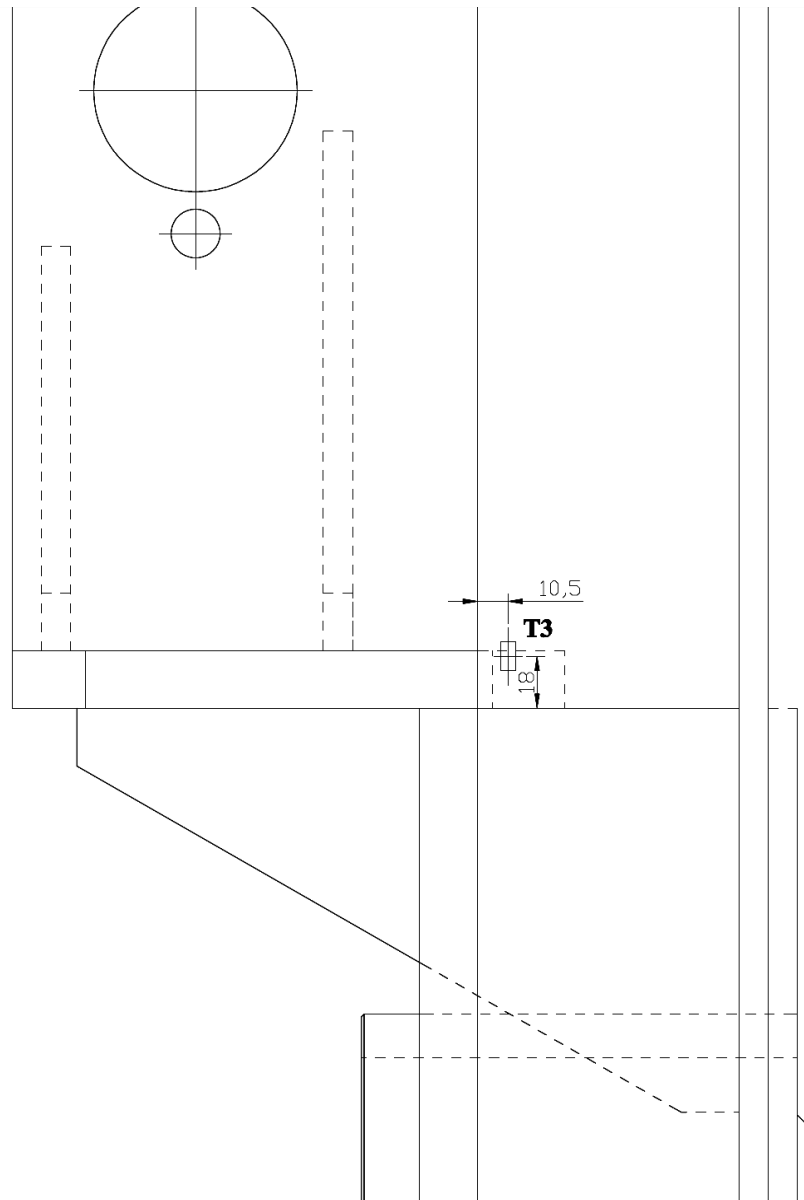
Pro sílu $Q = 120\,000 \text{ N}$ potom vyjde napětí

$$\underline{\underline{\sigma(120 \text{ kN}) = 36,7 \text{ MPa}}}$$

3.3 Určení míst vhodných k měření

Konstrukce ramena je teoreticky nejvíce zatížena ohybovým napětím podle rovnice (3.6). Proto je kritické místo hledáno tam, kde je největší ohybový moment, tedy u ložiska rotující kolejnice. Díky složitosti konstrukce vznikají koncentrace napětí v tvarových přechodech, ve kterých je nutno očekávat větší hodnoty napětí než hodnota, která vyšla ze zjednodušeného výpočtu. Na obrázku v příloze 2 jsou vidět tyto tvarové přechody a první dvě místa, která by mohla být kritická a na která byly nalepeny tenzometry. Přesná poloha tenzometrů T1 a T2 je zakótována na výkresu v příloze 4.

Třetí místo bylo zvoleno v části konstrukce, kde vzniká tlakové napětí. Nosníky jsou zde namáhány na vzpěr. Místo se nachází v blízkosti maximálního ohybového momentu a tvarového přechodu (*obr. 6*)



Obr. 6: Umístění třetího tenzometru

Čtvrté místo slouží pro kontrolu namáhání v symetricky stejné části konstrukce na opačné straně. Je situováno v obrazu symetrie prvního místa podle roviny rotující kolejnice.

UNIVERZITA PARDUBICE Dopravní fakulta Jana Pernera Dislokované pracoviště Česká Třebová	Bakalářská práce	Strana -18-
---	-------------------------	-------------

4 Experimentální analýza namáhání ramene

Pro experimentální část práce byl naplánován a dodržován postup, který lze shrnout do těchto bodů:

- Teoretická příprava
- Přesné určení měřících míst
- Volba a počet snímačů
- Vybroušení a odmaštění měřených míst
- Nalepení tenzometrů
- Sestavení elektrického měřícího obvodu
- Kalibrace ústředny na základě parametrů tenzometru
- Zkušební zatěžování, ověření správnosti zapojení
- Vlastní měření
- Vyhodnocení naměřených dat

V kapitolách 3.1, 3.2 a 3.3 byl popsán první a druhý krok včetně teoretického odhadu hodnoty maximálního napětí. Další postup je rozebírán v následujících kapitolách.

4.1 Postup a popis měření

Měření bylo realizováno na Testovacím zařízení železničních kol, které se nachází v uzavřeném prostoru laboratoře kolejových vozidel na DFJP, ve kterém je přizpůsobena teplota a vlhkost pro instalaci a použití tenzometrie. Při měření byly dodržovány bezpečnostní předpisy a zásady pro manipulaci s pomůckami tak, aby nedošlo k narušení měřícího obvodu poškozením některé z jeho částí. Pro zjištění mechanického napětí byly použity tenzometrické snímače, které byly nainstalovány na čtyři určená místa po dvou (1 aktivní a 1 kompenzační), tedy v celkovém počtu 8.

4.1.1 Tenzometrické snímače

Volba snímačů pro experimentální vyhodnocení vychází z charakteru materiálu, jeho namáhání a nemožnosti měření mechanického napětí uvnitř materiálu. Prakticky lze měřit pouze deformace, a to na povrchu materiálu. Snímač, který měří deformace se nazývá tenzometr. Jde o elektrický odporový snímač, který je tvořen drátkem z vhodného materiálu. Elektrický odpor drátku se mění podle toho, jak je deformován měřený objekt.

V důsledku těsné vazby tenzometru s měřeným objektem je poměrná deformace jeho drátku stejně velká jako poměrná deformace kovu ve směru rovnoběžném s drátkem. Délka

drátku se při deformaci zvětšuje a plocha průřezu se zmenšuje. To vede ke zvětšování elektrického odporu tenzometru, jak lze vidět ve vztahu pro výpočet elektrického odporu (4.1.1).

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad [\Omega] \quad (4.1.1)$$

ρ měrný elektrický odpor materiálu drátku; [Ωm]

l délka drátku; [m]

S plocha průřezu drátku; [m^2]

Při měření se odpor mění v určité závislosti na poměrné deformaci. Tato změna bude matematicky popsána jako poměr $\frac{\Delta R}{R}$ a její závislost na poměrné deformaci odvozena. Je účelné vyjádřit totální diferenciál dR :

$$dR = \frac{\partial R}{\partial l} dl + \frac{\partial R}{\partial S} dS + \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho \quad (4.1.2)$$

přičemž podle (4.1.1) platí $\frac{\partial R}{\partial l} = \frac{\rho}{S}$, $\frac{\partial R}{\partial S} = -\frac{\rho l}{S^2}$ a $\frac{\partial R}{\partial \rho} = \frac{l}{S}$.

Po dosazení do (4.1.2):

$$dR = \frac{\rho}{S} dl + \left(-\frac{\rho l}{S^2}\right) dS + \frac{l}{S} d\rho$$

Pro nekonečně malou poměrnou změnu $\frac{dR}{R}$ pak lze po dosazení rovnosti (4.1.1) psát

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S} + \frac{d\rho}{\rho}. \quad (4.1.3)$$

Protože platí $S = \pi r^2$, kde r je poloměr průřezu drátku, platí také

$$\frac{dS}{dr} = 2\pi r \Rightarrow dS = 2\pi r dr.$$

Podíl $\frac{dS}{S}$ dále bude

$$\frac{dS}{S} = \frac{2\pi r dr}{\pi r^2} = 2 \frac{dr}{r}. \quad (4.1.4)$$

Podle definice Poissonova čísla μ

$$\mu = \frac{-\frac{dr}{r}}{\frac{dl}{l}}$$

lze dosadit do (4.1.4) a vyjde rovnost

$$\frac{dS}{S} = -2\mu \frac{dl}{l},$$

podle níž po dosazení do (4.1.3) získáme vztah

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \left(-2\mu \frac{dl}{l}\right) + \frac{d\rho}{\rho} = \varepsilon + 2\mu\varepsilon + \frac{d\rho}{\rho} = \varepsilon \left(1 + 2\mu + \frac{d\rho}{\varepsilon\rho}\right),$$

kde

$\varepsilon = \frac{dl}{l}$ je poměrná deformace a

$K_d = \left(1 + 2\mu + \frac{d\rho}{\varepsilon\rho}\right)$ je deformační konstanta tenzometru; je uváděna u každého tenzometru výrobcem.

Po zavedení deformační konstanty K_d vyjde vztah

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon K_d \tag{4.1.5}$$

Výsledná poměrná změna $\frac{\Delta R}{R}$ se získá integrací rovnice (4.1.5).

$$\int_R^{R+\Delta R} \frac{dR}{R} = \int_{l_0}^{l_0+\Delta l} \varepsilon K_d$$

$$\int_R^{R+\Delta R} \frac{dR}{R} = K_d \int_{l_0}^{l_0+\Delta l} \frac{dl}{l}$$

$$\ln \frac{R + \Delta R}{R} = K_d \ln \frac{l_0 + \Delta l}{l_0}$$

S přihlédnutím k rovnosti

$$K_d \ln \frac{l_0 + \Delta l}{l_0} = K_d \ln(1 + \varepsilon) = \ln(1 + \varepsilon)^{K_d}$$

vyjde po odlogaritmování

$$\frac{R + \Delta R}{R} = (1 + \varepsilon)^{K_d}$$

$$\left(1 + \frac{\Delta R}{R}\right)^{\frac{1}{K_d}} = 1 + \varepsilon$$

Závislost změny odporu na poměrné deformaci tedy je

$$\varepsilon = \left(1 + \frac{\Delta R}{R}\right)^{\frac{1}{K_d}} - 1 \quad (4.1.6)$$

K měření byly použity odporové fóliové tenzometry vhodné pro měření na ocelových konstrukcích typu 6/120LY11 od firmy HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik). Všechny měly tyto výrobcem garantované parametry:

elektrický odpor $R_1 = 120,00 \Omega \pm 0,35 \%$

deformační konstanta $K_d = 2,03 \pm 1 \%$

4.1.2 Instalace tenzometrů

Instalace, tedy nalepení tenzometrů a připojení jejich výstupů k měřicímu obvodu je důležitou součástí příprav, která musí být provedena bezchybně, aby měření proběhlo správně. Před samotnou instalací tenzometrů je ale nutné dostatečně připravit povrch, na který budou nalepeny. V těchto místech proběhlo vybroušení povrchového nátěru na konstrukci tak, aby bylo možné dosáhnout přímého kontaktu tenzometru s namáhaným materiálem. To bylo provedeno bruskou a zároveň tak došlo k částečnému odstranění vroubků a nerovností materiálu, které nesmí v místě nalepení tenzometru být. Poté, pro dosažení lepší drsnosti povrchu, byl povrch zarovnán ručně pomocí smirkového papíru.

Po zarovnání povrchu následovalo odmaštění, které je nutné pro ideální kontakt snímače s materiálem měřeného objektu. To lze provést speciálním tenzometrickým odmašťovadlem k tomu určeným. V připravených místech konstrukce bylo použito odmašťovadlo typu RMS 1 na bázi acetonu a isopropanolu. Když je povrch konstrukce dokonale očištěný a relativně hladký, je možné přejít k lepení tenzometru.

Pro lepení použitého typu tenzometru se používají chemické přípravky dodávané výrobcem (HBM). Bylo použito speciální jednosložkové lepidlo, které má zajistit co nejlepší přenos deformací konstrukce na snímač. Přesto nejsou nikdy pružné vlastnosti lepidla dokonalé, a proto je vliv lepidla na naměřené hodnoty deformací uvažován ve výpočtu nejistot měření. Lepení probíhalo tak, že po nanesení lepidla na zadní stranu tenzometru byl tenzometr opatrně palcem přes pomocnou fólii přitlačován na plochu konstrukce postupně od jednoho kraje ke druhému, aby došlo k vytlačení vzduchových bublin mezi tenzometrem

UNIVERZITA PARDUBICE Dopravní fakulta Jana Pernera Dislokované pracoviště Česká Třebová	Bakalářská práce	Strana -22-
---	-------------------------	-------------

a konstrukcí. Poté bylo nutné přitlačovat tenzometr ke konstrukci po dobu minimálně 1,5 minuty než lepidlo utuhlo.

Dále následovalo přilepení svorkovnice se dvěma izolovanými kontakty těsně k tenzometru, na které pak byly přiletovány drátky tenzometru a následně další vodiče elektrického obvodu. Drátky tenzometru musely být přiletovány tak, aby před svorkovnicí zbyl dostatečně dlouhý úsek volného drátku, který tak vytvářel potřebnou vůli pro deformace.

Celý postup byl proveden ve všech čtyřech měřených místech a také na čtyřech plíšcích z oceli (je nutno použít stejný materiál jako ten, na kterém jsou aktivní tenzometry) určených pro instalaci kompenzačních tenzometrů. Ty byly pak nalepeny vedle aktivních tenzometrů, ale lepidlem, jehož vlastnosti přenosu deformací naopak brání, což je u kompenzačních tenzometrů žádoucí. Bylo použito speciální dvousložkové lepidlo (chemopren).

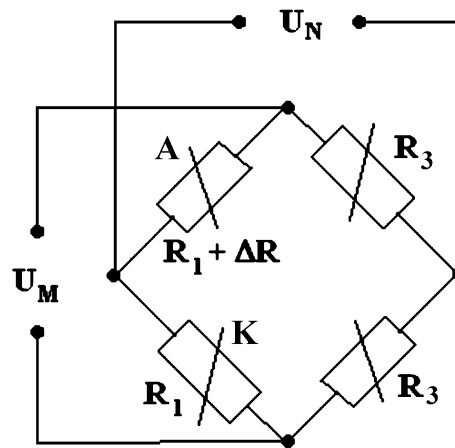
Před instalací dalších kabelů bylo provedeno kontrolní měření elektrického odporu nainstalovaných tenzometrů ohmmetrem, kterým byla ověřena správnost instalace.

4.1.3 Popis měřicího řetězce, kalibrace

Schéma měřicího řetězce vychází z použité měřicí metody, tedy z metody porovnávací můstkové. Jedná se o speciální druh zapojení odporových snímačů do tzv. polovičního Wheatstonova můstku, který společně se dvěma vnitřními rezistory zesilovače tvoří plný můstek. Základní schéma je uvedeno na *obr. 7*.

V každém obvodu jsou vždy zapojeny dva tenzometry, jeden aktivní a jeden kompenzační. Jedním výstupem jsou mezi sebou spojeny. Mezi opačnými výstupy je měřeno napětí U_M . V nezátíženém stavu je $U_M = 0$ a můstek je vyvážený. Jakmile dojde ke změně odporu aktivního tenzometru vzhledem ke kompenzačnímu (v důsledku deformací), rovnováha můstku se poruší a mezi opačnými výstupy tenzometrů se objeví rozdíl potenciálů, který je snímán jako $U_M \neq 0$.

Změny teplot nastávají stejně u tenzometru aktivního i kompenzačního, takže na měřené napětí nemají vliv. Oba tenzometry mají stejný odpor R_1 . Odpor dalších částí obvodu, jako jsou kabely, jsou rovněž stejné pro oba tenzometry a nemají na měřené napětí vliv, takže je zde naplno využito výhod můstkové metody.



Obr. 7: Schéma zapojení měřícího obvodu

Význam dalších veličin:

$R_2 = R_1 + \Delta R$ odpor aktivního tenzometru při deformaci a změně odporu ΔR ; [Ω]

R_3 odpor uvnitř zesilovače; [Ω]

U_M měřené elektrické napětí; [V]

U_N napájecí elektrické napětí; [V]

I_1 proud procházející větví s kompenzačním tenzometrem; [A]

I_2 proud procházející větví s aktivním tenzometrem; [A]

Ze schématu (obr. 7) je patrné, že

$$U_N = I_2(R_2 + R_3) = I_1(R_1 + R_3) \quad (4.1.7)$$

a dále

$$U_M = R_2 I_2 - R_1 I_1,$$

odkud po dosazení (4.1.7):

$$U_M = \frac{U_N R_2}{R_2 + R_3} - \frac{U_N R_1}{R_1 + R_3} = \frac{U_N R_1 + \Delta R}{R_1 + \Delta R + R_3} - \frac{U_N R_1}{R_1 + R_3}$$

Při skutečném zapojení nastaví zesilovač svůj vnitřní odpor tak, aby platilo $R_3 = R_1$, takže dalšími úpravami postupně vyjde:

$$U_M = U_N \frac{R_1 + \Delta R}{2R_1 + \Delta R} - U_N \frac{R_1}{2R_1}$$

$$\left(U_M + \frac{U_N}{2} \right) (2R_1 + \Delta R) = U_N (R_1 + \Delta R)$$

$$2R_1 \left(U_M + \frac{U_N}{2} \right) - U_N R_1 = \Delta R \left[U_N - \left(U_M + \frac{U_N}{2} \right) \right]$$

$$R_1 (2U_M + U_N - U_N) = \Delta R \left(\frac{U_N}{2} - U_M \right)$$

$$\Delta R = \frac{2R_1 U_M}{\frac{U_N}{2} - U_M} = \frac{4R_1 U_M}{U_N - 2U_M},$$

z čehož po dosazení do (4.1.6) plyne

$$\varepsilon = \left(1 + \frac{\Delta R}{R_1} \right)^{\frac{1}{K_d}} - 1 = \left[1 + \frac{4R_1 U_M}{R_1 (U_N - 2U_M)} \right]^{\frac{1}{K_d}} - 1 = \left(1 + \frac{4U_M}{U_N - 2U_M} \right)^{\frac{1}{K_d}} - 1 \quad (4.1.8)$$

Pro snadnější kalibraci se zanedbává malý člen $-2U_M$, takže vztah nabude této podoby:

$$\varepsilon = \left(1 + \frac{4U_M}{U_N} \right)^{\frac{1}{K_d}} - 1 \quad (4.1.9)$$

Po dosazení do jednorozměrného Hookeova zákona $\sigma = \varepsilon E$, kde

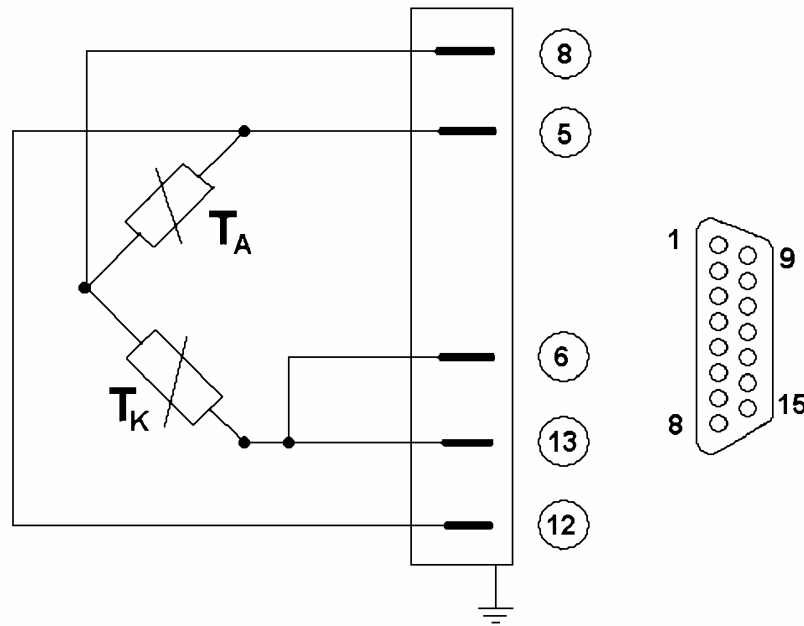
σ mechanické napětí ve směru rovnoběžném s drátky tenzometru [Pa]

E Youngův modul pružnosti v tahu oceli; $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Pa

vyjde vztah (4.1.10), který byl použit při kalibraci ústředny.

$$\sigma = E \left[\left(1 + \frac{4U_M}{U_N} \right)^{\frac{1}{K_d}} - 1 \right] \quad (4.1.10)$$

Pro propojení tenzometru a měřícího zesilovače byly použity šestižilové kabely se stíněním. Ke svorkovnicím tenzometru byly přiletovány vodiče podle schématu na *obr. 8*. Na tomto obrázku je také vidět, jaké uspořádání kolíků měl konektor na výstupu kabelu. Konektor byl pak zapojen do pultu se zdírkami, odkud vedou propojovací kabely k měřící ústředně.



Obr. 8: Schéma připojení vodičů k tenzometrům a uspořádání kolíků konektoru

Před zapojením kabelů do ústředny byly pro kontrolu správnosti zapojení na kolících konektorů změřeny odpory jednotlivých větví obvodu. Při správném zapojení je mezi kolíky 5 – 8, 6 – 8, 8 – 12 a 8 – 13 odpor odpovídající R_A , tj. 120Ω , a mezi kolíky 5 – 6, 5 – 13, 6 – 12 a 12 – 13 je odpor odpovídající $2R_A$, tj. 240Ω . Mezi kolíky 5 – 12 a 6 – 13 je odpor nulový a při zbylých kombinacích je odpor nekonečně velký.

Na závěr sestavy měřicího řetězce byly nastaveny kanály ústředny a provedena nepřímá kalibrace, tedy zadání číselné hodnoty mechanického napětí σ v MPa, které odpovídá poměrné změně elektrického napětí v $\frac{\text{mV}}{\text{V}}$. To lze vypočítat podle vztahu (4.1.10), přičemž uvažována je změna $1 \frac{\text{mV}}{\text{V}}$.

$$\sigma = E \left[\left(1 + \frac{4U_M}{U_N} \right)^{\frac{1}{K_d}} - 1 \right] = 2,1 \cdot 10^5 \left[\left(1 + \frac{4 \cdot 10^{-3}}{1} \right)^{\frac{1}{2,03}} - 1 \right] \text{MPa} = 2,1 \cdot 10^5 \left(1,004^{\frac{1}{2,03}} - 1 \right) \text{MPa}$$

$$\underline{\underline{\sigma = 413,3740 \text{ MPa}}}$$

4.2 Nejistoty měření

Žádným měřením nelze zjistit hledanou veličinu přesně. Při každém měření vznikne chyba, která je definována jako rozdíl naměřené hodnoty a skutečné hodnoty. Skutečná hodnota ani chyba nejsou známy. Chyby se vyskytují náhodně a jsou stejně pravděpodobné s kladným i záporným znaménkem. Menší chyby jsou pravděpodobnější než větší.

Z Gaussovy teorie náhodných chyb plyne, že s rostoucím počtem měření je možné veličinu stanovit s menším rozptylem hodnot. Tento rozptyl hodnot je pro konečný počet měření stanoven výběrovou směrodatnou odchylkou

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}{n(n-1)}}$$

kde Δ_i je odchylka i -té naměřené hodnoty od výběrového průměru a n je celkový počet měření. Touto výběrovou směrodatnou odchylkou je dána nejistota typu A, která závisí pouze na počtu opakovaných měření. Vzhledem k charakteru měření v této práci nemá nejistota typu A smysl, protože se nejednalo o opakovaná měření (nebyl proveden minimální počet měření 10).

Nejistoty typu B jsou tedy rozhodující pro stanovení celkové nejistoty. Jsou způsobeny nedokonalostmi použitých prostředků k měření. Patří sem nedokonalosti měřících přístrojů, kabelů, podmínek měření, měřících metod a nejistoty fyzikálních konstant a výpočtu výsledku při vyhodnocování měření. Při použité tenzometrii se mohly projevit nejistoty veličin $\Delta R, R, U_M, K_d, E$, které jsou popsány v kapitole 4.1 a které společně ovlivňují nejistotu měřených poměrných deformací ε . Konstanty a vztahy budou považovány za správné a jejich nejistoty za nulové. Zbývá probrat nejistoty tenzometrických snímačů a zbytku měřícího řetězce.

4.2.1 Nejistoty tenzometrických snímačů

Nejistota odporu tenzometru se stanoví na základě údaje uvedeného výrobcem na obalu. Jak již bylo uvedeno v kap. 4.1.1, interval odchylky odporu tenzometru je $\pm 0,35\%$. Uvažováno je normální rozdělení pravděpodobnosti hodnot a skutečnost, že hranici uvedeného intervalu odpovídá krajní chyba, která je podle počtu pravděpodobnosti $\pm 3\sigma$, kde σ je směrodatná odchylka normálního rozdělení. Pro výpočet nejistoty se použije směrodatná odchylka, tedy uvedený interval dělený třemi.

$$\underline{u_R} = \pm \frac{0,35\%}{3} = \underline{\underline{\pm 0,117\%}}$$

Nejistota deformačního faktoru tenzometru se určí analogicky s tím rozdílem, že rozdělení pravděpodobnosti je uvažováno podle [5] rovnoměrné. Směrodatnou odchylku σ takového rozdělení lze určit z obecného vztahu

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 p(x) dx, \quad (4.2.1)$$

kde μ je střední hodnota a $p(x)$ je hustota pravděpodobnosti, která je v tomto případě rovna konstantě $p(x) = c$. Konstantu c určíme z podmínky

$$\int_{-x_{kr}}^{x_{kr}} c dx = 1$$

kde x_{kr} je krajní hodnota intervalu a odkud plyne

$$2x_{kr}c = 1 \Rightarrow c = \frac{1}{2x_{kr}}.$$

a podle (4.2.1) lze psát

$$\sigma^2 = \int_{-x_{kr}}^{x_{kr}} (x - \mu)^2 c dx = \frac{c}{3} [(x - \mu)^3]_{-x_{kr}}^{x_{kr}} = \frac{c}{3} 2x_{kr}^3 = \frac{1}{2 \cdot 3x_{kr}} 2x_{kr}^3 = \frac{x_{kr}^2}{3}$$

Krajní hodnotu uvedenou výrobcem je tedy třeba pro určení nejistoty vydělit $\sqrt{3}$.

$$\underline{\underline{u_{Kd}}} = \pm \frac{1\%}{\sqrt{3}} = \pm \underline{\underline{0,577\%}}$$

Nejistota geometrie snímače. Ke snížení této nejistoty se používá vyznačený kříž v místě měření na konstrukci a vyznačené osy na snímači. Chyba geometrie může být posun ve svislém směru (x), posun ve vodorovném směru (y) nebo natočení o určitý úhel (α). V měřených místech není napětí vlivem koncentrátorů napětí rozloženo jednoduše a změny poměrné deformace podle souřadnic x a y jsou neurčitelné. Proto nelze tyto odchylky započítat a bude probrán pouze vliv natočení o úhel (α).

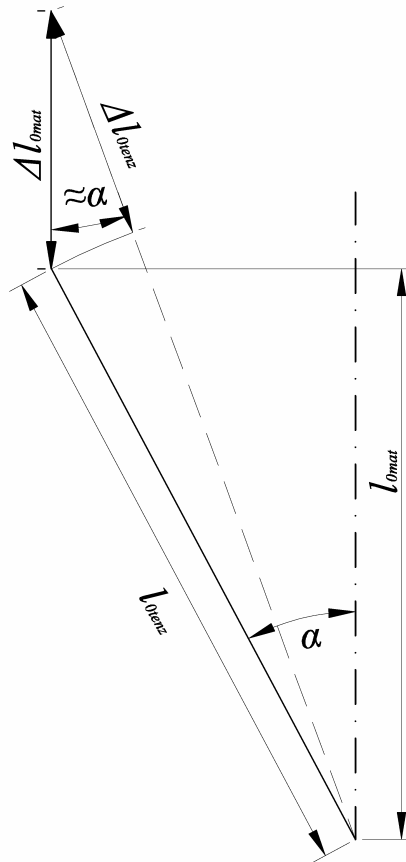
Jestliže je osa tenzometru vychýlena o úhel α , je délka měřeného materiálu v nezátíženém stavu l_{0mat} , přičemž délka tenzometru je l_{0tenz} . Pak platí vztah

$$l_{0mat} = l_{0tenz} \cos \alpha.$$

Když dojde k deformaci materiálu o Δl_{mat} , délka tenzometru se změní pouze o Δl_{tenz} , jak lze vidět z *obr. 9* a platí pro ni

$$\Delta l_{tenz} = \Delta l_{mat} \cos \alpha.$$

Odtud lze určit nejistotu na základě rozdílu poměrné deformace materiálu ε_{mat} a poměrné deformace tenzometru ε_{tenz} .



Obr. 9: Deformace tenzometru pootočeného o úhel α

$$u_G = \varepsilon_{mat} - \varepsilon_{tenz} = \frac{\Delta l_{mat}}{l_{0mat}} - \varepsilon_{tenz} = \frac{\Delta l_{tenz}}{\cos \alpha \cdot l_{0tenz} \cos \alpha} - \varepsilon_{tenz} = \varepsilon_{tenz} \left(\frac{1}{\cos^2 \alpha} - 1 \right)$$

Za nejvyšší úhlovou odchylku je dle zkušeností AL považován úhel $\alpha = 3^\circ$. Při měření odpovídala nejvyšší hodnota poměrných deformací napětí 80 MPa, tedy

$$\varepsilon_{max} = \frac{\sigma}{E} = \frac{80}{210\,000} = 3,81 \cdot 10^{-4} = 381 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}. \quad (4.2.2)$$

Pro tyto poměrné deformace tedy získáváme (po vydělení statistickým koeficientem pro normální rozdělení 3) vztah pro výpočet nejistoty geometrie tenzometru:

$$\underline{\underline{u_G}} = \frac{\varepsilon_{max}}{3} \left(\frac{1}{\cos^2 \alpha} - 1 \right) = \frac{381}{3} \frac{\mu\text{m}}{\text{m}} \left(\frac{1}{\cos^2 3^\circ} - 1 \right) = \underline{\underline{0,35 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}}}$$

Nejistota kvality povrchu měřeného místa závisí na nerovnosti povrchu měřené konstrukce. Vzhledem k velmi malým chybám (podle zkušeností AL a [5]), které v důsledku těchto nerovností vznikají může být nejistota kvality povrchu považována za nulovou.

UNIVERZITA PARDUBICE Dopravní fakulta Jana Pernera Dislokované pracoviště Česká Třebová	Bakalářská práce	Strana -29-
---	-------------------------	-------------

Nejistota lepidla je určena parametry výrobce lepidla. Použito bylo lepidlo HBM Z 70, pro které je definovaná statická poměrná deformace při prvním cyklu $1 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ a při třetím cyklu $0,5 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$. Výsledná nejistota lepidla je součtem prvního, druhého a třetího cyklu.

$$\underline{\underline{u_{lep} = 2,5 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}}}$$

4.2.2 Nejistoty zbytku měřícího řetězce

Na měření poměrných deformací je nutno nahlížet jako na nepřímé měření veličiny pomocí jiných veličin. Pro nejistotu takového měření platí gaussův zákon nejistot měření

$$u_{\varepsilon}^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial v_i} \right)^2 u_i^2,$$

kde v_i je obecně i -tá veličina a u_i její nejistota. V případě poměrných deformací jsou podle vztahu (4.1.9) vstupujícími veličinami U_M a K_d . Nejistota napětí U_M je stanovena zkušenostmi AL a její hodnota činí přibližně $u_{D\dot{U}} = 0,7\%$. Parciální derivace podle U_M a K_d jsou:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial U_M} = \frac{1}{K_d} \left(1 + \frac{4U_M}{U_N} \right)^{\frac{1}{K_d}-1} \cdot \frac{4}{U_N} = \frac{\varepsilon}{K_d} \cdot \frac{4}{U_N + 4U_M}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial K_d} = \left(1 + \frac{4U_M}{U_N} \right)^{\frac{1}{K_d}} \cdot \ln \left(1 + \frac{4U_M}{U_N} \right) \left(-\frac{1}{K_d} \right) = -\frac{\varepsilon}{K_d^2} \ln \left(1 + \frac{4U_M}{U_N} \right)$$

a daná nejistota je

$$\begin{aligned} u_{\varepsilon}^2 &= \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial U_M} u_{D\dot{U}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial K_d} u_{K_d} \right)^2 \\ u_{\varepsilon}^2 &= \left(\frac{\varepsilon}{K_d} \cdot \frac{4}{U_N + 4U_M} u_{D\dot{U}} \right)^2 + \left[-\frac{\varepsilon}{K_d^2} \ln \left(1 + \frac{4U_M}{U_N} \right) \right]^2 \\ u_{\varepsilon}^2 &= \left(\frac{\varepsilon}{K_d} \right)^2 \left(\frac{4}{U_N + 4U_M} u_{D\dot{U}} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon}{K_d} \right)^2 \left[\frac{1}{K_d} \ln \left(1 + \frac{4U_M}{U_N} \right) u_{K_d} \right]^2 \\ u_{\varepsilon} &= \frac{\varepsilon}{K_d} \sqrt{\left(\frac{4u_{D\dot{U}}}{U_N + 4U_M} \right)^2 + \left[\frac{u_{K_d}}{K_d} \ln \left(1 + \frac{4U_M}{U_N} \right) \right]^2} \end{aligned} \quad (4.2.3)$$

Napájecí napětí bylo rovno $U_N = 10 \text{ V}$. Podle vztahu (4.1.9) lze odvodit že

$$(\varepsilon + 1)^{K_d} = 1 + \frac{4U_M}{U_N}$$

$$U_M = \frac{U_N}{4} [(\varepsilon + 1)^{K_d} - 1].$$

Maximálním poměrným deformacím podle (4.2.2) pak odpovídá měřené napětí

$$U_M = 1,934 \text{ mV}.$$

Po dosazení hodnot do (4.2.3) vyjde:

$$\begin{aligned} u_\varepsilon &= \frac{381 \cdot 10^{-6}}{2,03} \sqrt{\left(\frac{4 \cdot 0,007 \cdot 1,934 \cdot 10^{-3}}{10 + 4 \cdot 1,934 \cdot 10^{-3}}\right)^2 + \left[\frac{0,00577 \cdot 2,03}{2,03} \ln\left(1 + \frac{4 \cdot 1,934 \cdot 10^{-3}}{10}\right)\right]^2} = \\ &= \frac{381 \cdot 10^{-6}}{2,03} \sqrt{(0,005411 \cdot 10^{-3})^2 + (0,004462 \cdot 10^{-3})^2} \\ \underline{\underline{u_\varepsilon}} &= \underline{\underline{0,001316 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}}} \end{aligned}$$

Nejistota kabelu propojujícího snímač s měřícím zesilovačem se může projevit v důsledku změny jeho odporu. Při měření byly použity 6-žilové kabely, u kterých je vliv teploty kompenzován zesilovačem. Proto lze považovat nejistotu kabelu za nulovou.

Stejně tak lze považovat za nulové nejistoty kabelu propojující ústřednu s počítačem a vyhodnocovacího software a hardware.

Výsledná nejistota typu B celého řetězce se získá dosazením do následujícího vztahu pro kombinovanou nejistotu:

$$\begin{aligned} u_B &= \sqrt{u_{lep}^2 + u_G^2 + u_\varepsilon^2} = \sqrt{2,5^2 + 0,35^2 + 0,001316^2} \\ \underline{\underline{u_B}} &= \underline{\underline{2,524 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}}} \end{aligned}$$

Rozšířená nejistota typu B, která zahrnuje všechny odchylky s pravděpodobností výskytu 95 %, odpovídá za předpokladu normálního rozdělení pravděpodobnosti intervalu $(-2\sigma; 2\sigma)$, takže její hodnota je

$$\underline{\underline{u}} = \underline{\underline{2u_B}} = \underline{\underline{5,049 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}}}$$

a pro mechanické napětí pak bude nejistota

$$\underline{\underline{u_\sigma}} = E \cdot u_B \cong \underline{\underline{1,1 \text{ MPa}}}.$$

V této nejistotě však nejsou započteny některé další vlivy, např. nejistoty geometrie snímače s ohledem na posun ve vodorovném a svislém směru. Z toho důvodu bude považována za rozšířenou nejistotu hodnota

$$\underline{u_{\sigma}} = 2 \text{ MPa} .$$

5 Analýza naměřených dat

Ve vyhodnocovacím software bylo nastaveno 7 kanálů, ze kterých byla exportována naměřená data. Byly to tyto kanály:

FQinčást přítláčné síly Q měřená na vnitřní straně vzhledem ke kolu

FQoutčást přítláčné síly Q měřená na vnější straně vzhledem ke kolu

FYpříčná síla vynikající v kontaktu

T1mechanické napětí měřené tenzometrem T1

T2mechanické napětí měřené tenzometrem T2

T3mechanické napětí měřené tenzometrem T3

T4mechanické napětí měřené tenzometrem T4

Výstupem z jednotlivých kanálů byly hodnoty v čase se vzorkovací frekvencí 1000 Hz.

5.1 Výsledky měření

Kolmé kolová síla $Q(t)$ je v každém časovém okamžiku určena vztahem

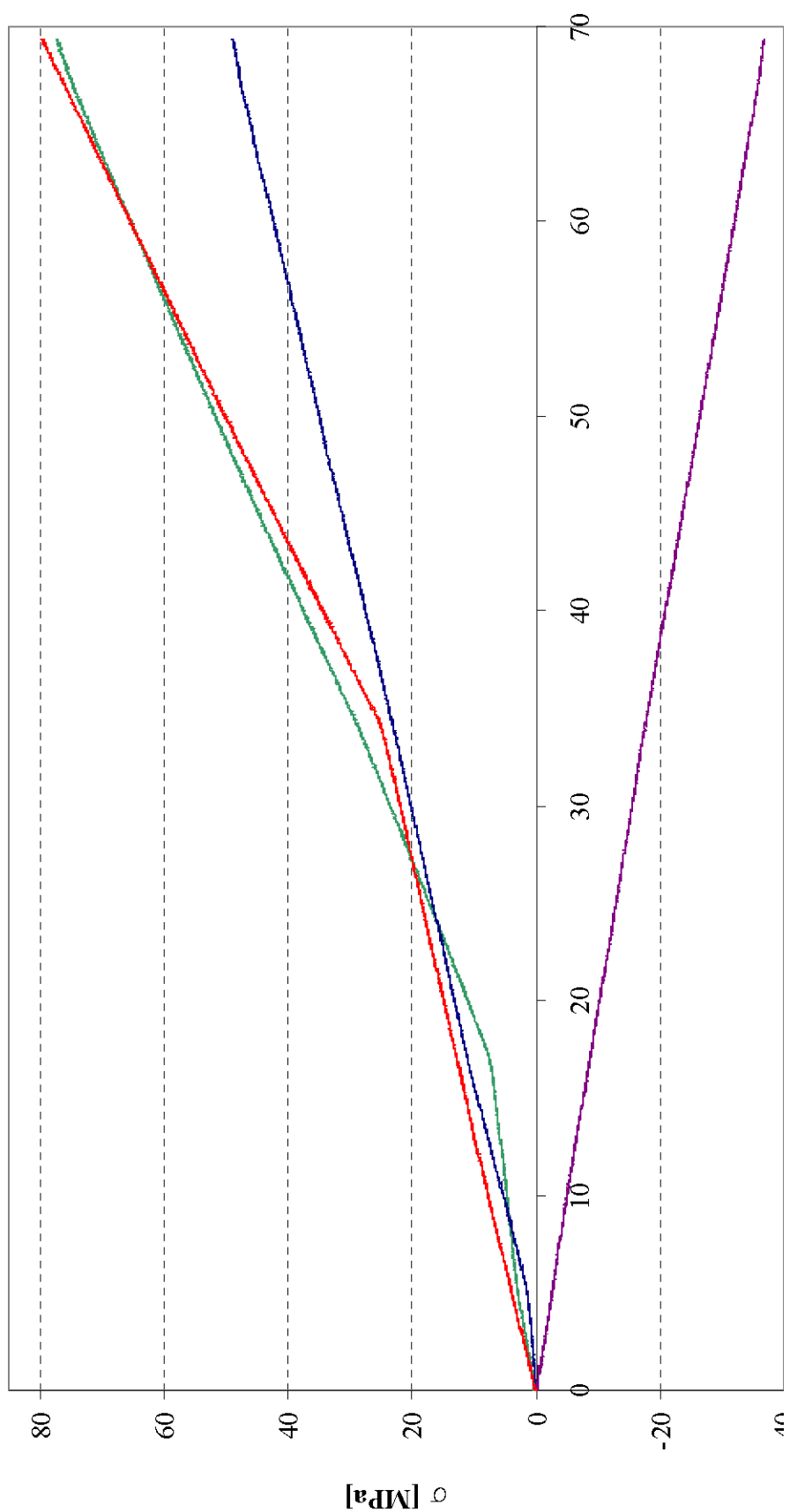
$$Q(t) = FQ_{in} + FQ_{out}.$$

V době měření nebyl plně funkční měřící řetězec této síly. Záznam velikosti síly FQin mohl být proveden pouze do velikosti 22,9297 kN a záznam síly FQout pouze do 22,9395 kN. Při vyšší skutečné kolové síle již naměřené hodnoty zůstaly rovny uvedeným mezím. FQin dosáhla své maximální hodnoty dříve než FQout, přičemž v tom okamžiku byla hodnota FQout rovna 20,9863 kN. Z uvedeného plyne, že bylo možné provádět měření s maximální kolovou silou Q pouze 43,9 kN místo očekávaných 70 kN. Proto bylo rozhodnuto, že síla Q bude pro vyšší hodnoty než 43,9 kN určena nepřímou, a to za předpokladu konstantní změny síly v čase při zatěžování. Vnášení lineárně rostoucí síly na Testovacím zařízení železničních kol je totiž možné. Z časového záznamu pak šla určit směrnice růstu síly v čase pomocí lineární regrese (derivaci nelze jednoduše provést, protože naměřené hodnoty v určitém pásmu odchylek rychle kolísají). Pomocí získané rovnice (5.1) pak byly potřebné hodnoty Q dopočteny.

$$Q(t) = 0,014\ 133\ 8 \cdot t - 1,247\ 58 \quad (5.1)$$

kde t je pořadí zaznamenané hodnoty, tedy čas v milisekundách.

Byla tedy získána závislost $Q(t)$ a také závislost napětí na i -tém tenzometru na čase $\sigma_i(t)$. Z těchto závislostí lze pak vyloučením času získat závislost $\sigma_i(Q)$ pro $i = 1, 2, 3, 4$. Tyto závislosti jsou uvedeny v grafu 2.



Graf 2: Závislosti naměřených hodnot napětí na zatěžující kolové síle

5.2 Maximální napětí a extrapolace pro 120 kN

Z naměřených hodnot (*graf 2*) lze usoudit, že největší mechanické napětí vzniklo v místě s tenzometrem T4. Toto místo je tedy označeno za kritické a nejvyšší naměřená hodnota v něm bude považována za nejvyšší napětí v celé konstrukci. Hodnota tohoto napětí pro kolovou sílu přesně podle naměřených hodnot

$$\sigma_{\max}(69,153 \text{ kN}) = 79,329 \text{ MPa},$$

takže přibližně kolové síle 70 kN odpovídá napětí

$$\sigma_{\max}(70 \text{ kN}) \cong 80 \text{ MPa}.$$

Předpokladem pro extrapolaci hodnot napětí je pokračování lineárního průběhu $\sigma_4(Q)$ v intervalu 70 ÷ 120 kN. V tom případě může být provedena lineární regrese na základě hodnot v intervalu za posledním zlomem linearity, tedy v intervalu 40 ÷ 70 kN. Metodou nejmenších čtverců pak byla určena přímka s rovnicí

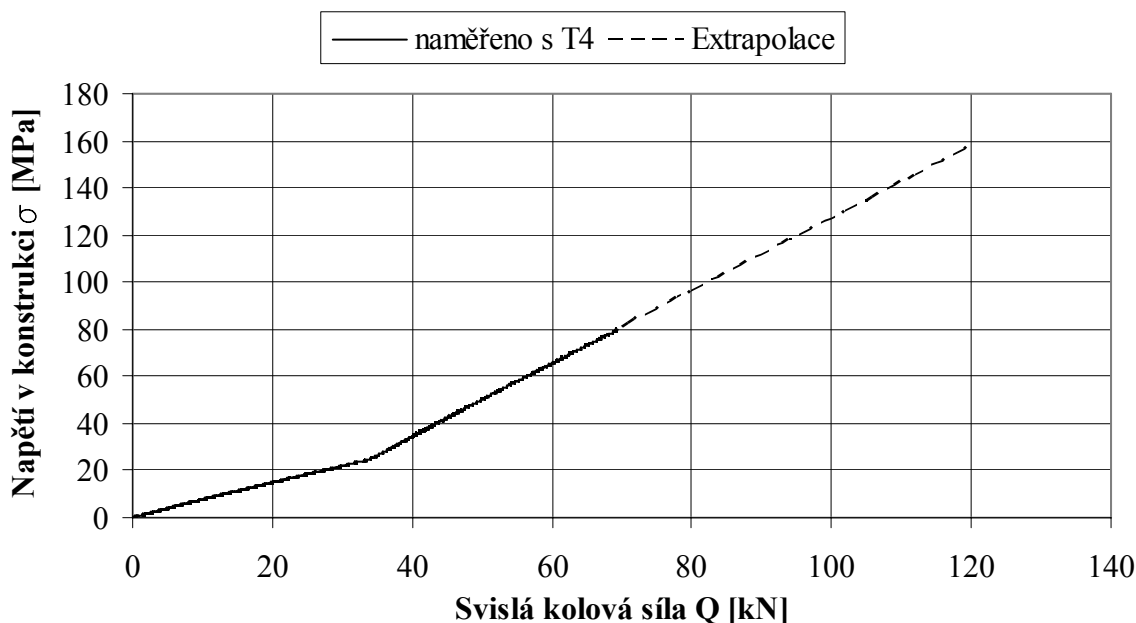
$$\sigma_{4\text{ext}} = a + bQ \quad [\text{MPa}],$$

kde

$$a = -26,90925$$

$$b = 1,53785$$

V *grafu 3* je vyznačen průběh napětí $\sigma_4(Q)$ i s extrapolovanou částí $\sigma_{4\text{ext}}$.



Graf 3 Extrapolace hodnot napětí naměřených tenzometrem T4

UNIVERZITA PARDUBICE Dopravní fakulta Jana Pernera Dislokované pracoviště Česká Třebová	Bakalářská práce	Strana -35-
---	-------------------------	-------------

Po dosažení hodnoty 120 kN za Q vyjde výsledná hledaná hodnota napětí

$$\sigma_{\max}(120 \text{ kN}) = 157,6 \text{ MPa},$$

která po zaokrouhlení nahoru a zatížení celkovou nejistotou vypočtenou v kap. 4.2 nabude hodnot

$$\underline{\underline{\sigma_{\max}(120 \text{ kN}) = (158 \pm 2) \text{ MPa}}}$$

5.3 Diskuze

Lineární lomené průběhy závislosti ohybového napětí na zatěžující síle svědčí o skokovité změně ohybové tuhosti konstrukce v měřeném místě, a tedy o určité změně rozložení sil v průběhu zatěžování. Tento fenomén nelze vysvětlit s předpoklady formulovanými v kap. 3. Naměřené hodnoty jsou výrazně vyšší (až čtyřikrát) než výpočtový odhad. Byla očekávána vyšší hodnota z důvodu vlivů koncentrátorů napětí, ale tak značný rozdíl svědčí o mylných předpokladech. Pravděpodobnou příčinou je zcela nedostačující předpoklad o namáhání jednoduchého nosníku s konstantním průřezovým modulem na prostý ohyb. Ve skutečnosti jsou vnitřní silové účinky v konstrukci složitější. Pro vysvětlení průběhů $\sigma_i(Q)$ a maximálních hodnot by musela být provedena analýza ramene alespoň jako prostorové rámové konstrukce (což je nad rámec této práce) kdy by se pravděpodobně daly popsat změny podmínek pro rozložení sil v konstrukci.

Ve skutečnosti se mohou v konstrukci vyskytnout i větší napětí než naměřené v kritickém místě. Je to proto, že napětí v koncentrátorech napětí, jako jsou svary a tvarové přechody, nelze měřit pomocí tenzometrů. Dalším důvodem může být neodhalení skutečného místa s nejvyšším napětím, protože složitost konstrukce vyžaduje důkladnější analýzu pomocí numerických metod, což je také nad rámec této práce.

UNIVERZITA PARDUBICE Dopravní fakulta Jana Pernera Dislokované pracoviště Česká Třebová	Bakalářská práce	Strana -36-
---	-------------------------	-------------

6 Závěr

Úkolem práce bylo určit maximální hodnotu mechanického napětí v konstrukci rámu Testovacího zařízení železničních kol (TZŽK) při vnášení kolmé kolové síly 120 kN. Toho bylo docíleno na základě provedeného měření mechanického napětí při kolmé kolové síle 70 kN pomocí tenzometrie a extrapolace naměřených hodnot pro 120 kN. Výsledná hodnota je $\sigma_{\max}(120 \text{ kN}) = (158 \pm 2) \text{ MPa}$. Nejen pro získání tohoto výsledku bylo potřeba provést další úkoly, které splňují všechny na začátku vytyčené cíle. Mezi tyto úkoly patří vytipování míst pro instalaci tenzometrů na základě rozboru namáhání rámu, provedení analýzy nejistot měření včetně výpočtu výsledné nejistoty a zpracování výkresové dokumentace zatěžujícího ramena a sestavného výkresu části zařízení s rotující kolejnici. Podklady pro sestavu této dokumentace byly získány prostřednictvím měření rozměrů, které autor prováděl na samotném zařízení.

Tato práce je převážně rázu experimentálního, avšak byly provedeny i potřebné teoretické rozborů v podobě úvah, matematických odvození a výpočtů týkajících se bezpečnosti proti vykolejení, namáhání zatěžujícího ramene, principu tenzometrie a nejistot měření. Při rozboru namáhání konstrukce TZŽK byla pozornost soustředěna na zatěžující rameno, které bylo od doby svého původního návrhu rekonstruováno a u kterého před touto prací nebyla provedena analýza namáhání teoretická ani experimentální. Experimentální část byla provedena v rámci této práce a její přínos je zřejmý již jen kvůli časové náročnosti provádění tenzometrie. Výsledkem experimentu je nejen maximální hodnota mechanického napětí v konstrukci zatěžovacího ramene, ale také průběh tohoto napětí v závislosti na kolmé kolové síle na čtyřech různých místech konstrukce.

Pro teoretickou část by bylo zapotřebí provést analýzu pomocí metody konečných prvků, což je mimo rámec této práce. Rovněž nad rámec této práce je provedení vhodnějšího analytického řešení, a sice vyslovení reálnějších předpokladů o zatěžujícím rameni, na které je nutno nahlížet alespoň jako na prostorovou rámovou konstrukci. Práce ukázala, že předpoklad prostého nosníku je nepoužitelný. I to je však přínosem, protože takový výpočet již v budoucnu nemusí být prováděn.

UNIVERZITA PARDUBICE Dopravní fakulta Jana Pernera Dislokované pracoviště Česká Třebová	Bakalářská práce	Strana -37-
---	-------------------------	-------------

LITERATURA

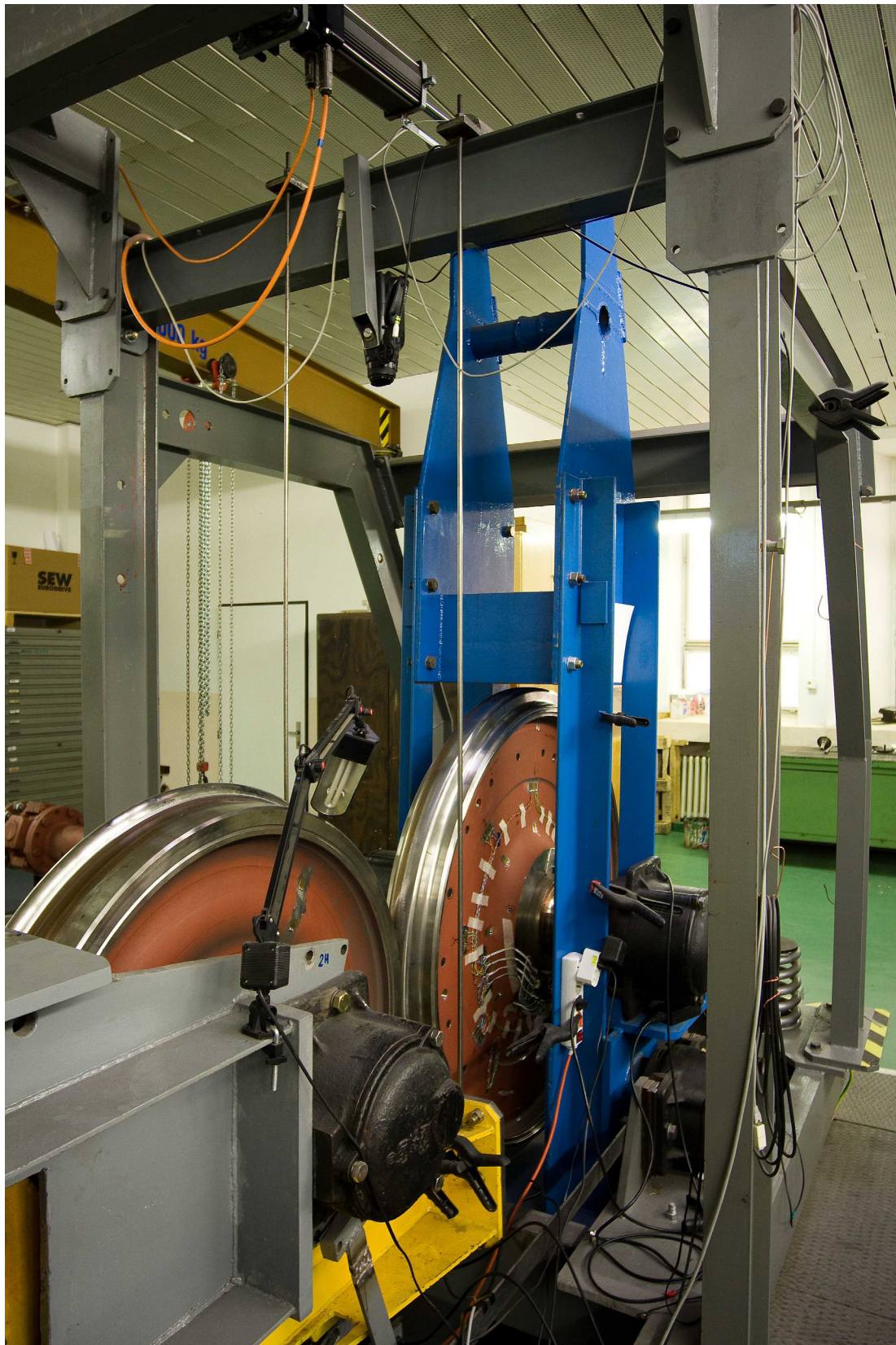
- [1] CULEK, B. st., MALINSKÝ, J., CULEK, B. ml.: Výzkum na testovacím zařízení železničních kol., *Nová železniční technika*, 2007, roč. 15, č. 2, s. 20 – 21. ISSN 1210-3942
- [2] HARTWIG, P.: *Konstruktive Anpassung des Eisenbahnradprüfstandes der Universität Pardubice an die Messung von Adhäsionserscheinungen*. [Diplomová práce], Dopravní fakulta Jana Pernera Univerzity Pardubice, Pardubice, 2006.
- [3] ŠVEJNOCH, V.: *Teorie kolejových vozidel*, Praha, ČVUT Praha, 1. vydání, 1991, s. 251, ISBN 80-01-00622-0.
- [4] VYBÍRAL, B.: *Zpracování dat fyzikálních měření*, Studijní text pro řešitelé FO, dostupné z <http://fo.cuni.cz/texty/mereni.pdf>
- [5] *Tenzometrické měření ocelových konstrukcí – metodika*, Zkušební laboratoř AL DFJP, dokument AL-M-06
- [6] *Standard deviation* [online], poslední revize 1. 5. 2008, [cit. 2. 5. 2008], dostupné z http://en.wikipedia.org/wiki/Standard_deviation

Seznam příloh

1. Pohled na Testovací zařízení železničních kol v laboratoři DFJP
2. Tenzometry T1 a T2 nainstalované ve vytipovaných místech
3. Výkres sestavy s rotující kolejnici
4. Výkres detailu s kritickým místem a s umístěním tenzometrů

PŘÍLOHA 1:

Pohled na Testovací zařízení železničních kol v laboratoři DFJP



PŘÍLOHA 2:

Tenzometry T1 a T2 nainstalované ve vytipovaných místech

