

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program: M 2301 Strojní inženýrství

Studijní obor: 3901T003 Aplikovaná mechanika

Zaměření: Inženýrská mechanika

Katedra částí a mechanismů strojů

## Napjatost a deformace ojničního šroubu

( Stress and deformation in the bolt of internal combustion engine  
connecting rod )

Luboš Stránský

KST -

Vedoucí diplomové práce:  
Konzultant:

Prof. Ing. Jan Honců, CSc. TU v Liberci  
Ing. Tomáš Zúbek, HDL v Doubí TU v Liberci

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA  
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



314607497

Rozsah práce:  
Počet stran: 55  
Počet příloh: 6

Datum odevzdání:  
10.ledna 2005

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Jméno a příjmení **Luboš Štránský**

obor **Aplikovaná mechanika**

zaměření **Inženýrská mechanika**

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

### **Napjatost a deformace šroubu ojnice pístového spalovacího motoru**

#### **Zásady pro vypracování:**

(uveďte hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Prostudujte výkresy montážního celku úplné ojnice. Seznamte se v dostatečné míře s programovým systémem pro výpočty metodou konečných prvků, a to zejména pokud jde o řešení statických úloh se silovým dotykem součástí.
2. Na základě výkresových a dalších podkladů vytvořte přiměřeně zjednodušený model ojnice a jejího uložení pro případ zatížení při poloze pístu v úvratích.
3. Užitím metody konečných prvků vypočítejte deformace a napětí ve šroubu především v blízkosti dělicí roviny ojnice, a to :
  - a) při pístu v horní úvratí na rozhraní kompresního a expanzního zdvihu, bez vlivu setrvačných sil,
  - b) při pístu v horní úvratí mezi výfukovým a plnicím zdvihem,
  - c) při pístu v dolní úvratí na konci plnicího zdvihu.
4. V hydrodynamické laboratoři spolu s konzultantem připravte potřebné náležitosti a proveďte měření napětí na povrchu šroubu. Výsledky měření porovnejte s výsledky výpočtů podle bodu 3.

Při výpočtech uvažujte teplotu všech součástí shodnou s teplotou prostředí při zkoušce v laboratoři.



Forma zpracování diplomové práce:

- průvodní zpráva: cca 50 stran textu včetně obrázků
- grafické práce: množství nezbytné pro snadné pochopení látky čtenářem

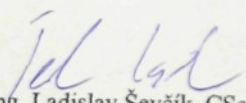
Seznam literatury (uved'te doporučenou odbornou literaturu):

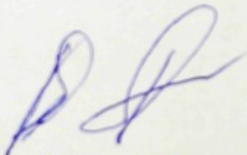
Publikace z oboru klikových mechanismů spalovacích motorů.  
Podklady pro práci s metodou konečných prvků.  
Publikace o měření napětí pomocí elektrických odporových tenzometrů.  
Podklady ŠKODA AUTO a.s. Mladá Boleslav.

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Jan Honců, CSc.

Konzultant diplomové práce: Ing. Tomáš Zůbek, HDL v Doubí, TU Liberec.



  
doc. Ing. Ladislav Ševčík, CSc.  
vedoucí katedry

  
doc. Ing. Petr Louda, CSc.  
děkan

V Liberci, dne 27.11.2003

Platnost zadání diplomové práce je 15 měsíců od výše uvedeného data. Termíny odevzdání diplomové práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

## **TÉMA:**

**NAPJATOST A DEFORMACE OJNIČNÍHO ŠROUBU PÍSTOVÉHO  
SPALOVACÍHO MOTORU**

## **ANOTACE:**

Diplomová práce se zabývá určením napětí a deformací zamontovaného šroubu ojnice především v blízkosti dělicí roviny (roviny řezu) ojniční hlavy. Jsou porovnávány výsledky získané užitím zjednodušené (analytické) výpočtové metody a výsledky získané metodou konečných prvků. Následující měření napětí na povrchu dříku šroubu má potvrdit správnost vypočtených výsledků.

# **DIPLOMA PROJECT**

## **THEME:**

**STRESS AND DEFORMATION IN THE BOLT OF INTERNAL  
COMBUSTION ENGINE CONNECTING ROD**

## **ANNOTATION:**

This diploma thesis deals with determination of stress and deformation in built-in bolt especially near the connecting rod big end joint (cutting) plane. Results gained by simplified (analytical) computational method and results obtained using Finite Element Method are compared. Subsequently evaluation of stress on the screw shank surface by measurement is performed for verification of results.



## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V Rané, 4. ledna 2005

*Luboš Stránský*

Luboš Stránský

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Prof. Ing. Janu Honcům, CSc. z katedry částí a mechanismů strojů Technické univerzity v Liberci za rady při řešení úlohy. Dále bych chtěl poděkovat pracovníkům hydrodynamické laboratoře Technické univerzity v Liberci za pomoc při přípravě a provedení experimentu jmenovitě Ing. Alešovi Lufínkovi a Ing. Tomášovi Zůbkovi.



## Obsah

|                                                        |    |
|--------------------------------------------------------|----|
| Seznam symbolů                                         | 7  |
| Úvod                                                   | 11 |
| 1 Namáhání šroubu                                      | 12 |
| 1.1 Počáteční úvahy                                    | 12 |
| 1.2 Předpětí ve šroubech                               | 13 |
| 1.3 Silové působení ojnice na šrouby                   | 15 |
| 2 Analytický výpočet                                   | 17 |
| 2.1 Tuhost šroubu a stlačované části ojnice            | 17 |
| 2.2 Napětí ve šroubu                                   | 20 |
| 3 Výpočet pomocí MKP                                   | 23 |
| 3.1 Výpočtový model                                    | 23 |
| 3.2 Tvorba sítě konečných prvků                        | 24 |
| 3.3 Okrajové podmínky modelu                           | 27 |
| 3.4 Tuhost podložky                                    | 28 |
| 3.5 Výsledky                                           | 30 |
| 4 Experimentální ověření výsledků                      | 41 |
| 4.1 Volba způsobu měření napětí                        | 41 |
| 4.2 Měření odporovými tenzometry                       | 41 |
| 4.3 Instalace tenzometrů                               | 42 |
| 4.4 Měření na trhačím stroji                           | 45 |
| 4.5 Výpočet mechanického napětí z elektrického signálu | 47 |
| 5 Porovnání výsledků                                   | 51 |
| 6 Závěr                                                | 54 |
| Literatura                                             | 55 |

Seznam symbolů

| Označení        | Rozměr             | Význam                                                        |
|-----------------|--------------------|---------------------------------------------------------------|
| $a$             | $\text{m.s}^{-2}$  | zrychlení pístu                                               |
| $C_1, C_2$      | -                  | hodnoty charakterizující citlivost tenzometru                 |
| $c_p$           | $\text{N.mm}^{-1}$ | tuhost podložky                                               |
| $c_p^A$         | $\text{N.mm}^{-1}$ | tuhost podložky zjištěná analytickou metodou                  |
| $c_p^P$         | $\text{N.mm}^{-1}$ | pokusně zjištěná tuhost podložky                              |
| $c_s$           | $\text{N.mm}^{-1}$ | tuhost šroubu                                                 |
| $c_{Si}$        | $\text{N.mm}^{-1}$ | i-tá tuhost náhradního válce šroubu                           |
| $d$             | mm                 | průměr pístu                                                  |
| $d_2$           | mm                 | střední průměr závitu                                         |
| $d_3$           | mm                 | malý průměr závitu                                            |
| $D_1$           | mm                 | střední průměr dotykové plochy matice                         |
| $D_2$           | mm                 | vnější průměr dotykové plochy matice                          |
| $D_3$           | mm                 | vnitřní průměr dotykové plochy matice                         |
| $E$             | MPa                | modul pružnosti v tahu                                        |
| $e_i$           | mm                 | vzdálenost hrany víka ojnice od osy šroubu při i-tém zatížení |
| $f_1$           | -                  | součinitel tření v závitu                                     |
| $f_2$           | -                  | součinitel tření mezi maticí a ojnicí                         |
| $F_{Ci}$        | N                  | i-tá celková síla ve šroubu                                   |
| $F_i$           | N                  | i-tá zatěžující síla                                          |
| $F_{Mi}$        | N                  | síla ve šroubu vyvozená staticky neurčitým momentem           |
| $F_N$           | N                  | normálová síla                                                |
| $\Delta F_{Pi}$ | N                  | nárůst síly v podložce při i-tém zatížení                     |
| $F_Q$           | N                  | síla předpětí šroubu                                          |
| $F_{Q\min}$     | N                  | minimální síla předpětí šroubu                                |
| $F_{Q\max}$     | N                  | maximální síla předpětí šroubu                                |
| $F_R$           | N                  | reakční síla                                                  |
| $\Delta F_{Si}$ | N                  | nárůst síly ve šroubu při i-tém zatížení                      |



| Označení     | Rozměr | Význam                                                              |
|--------------|--------|---------------------------------------------------------------------|
| $F_{T1}$     | N      | třecí síla v závitu                                                 |
| $F_{T2}$     | N      | třecí síla mezi maticí a ojnicí                                     |
| $F_U$        | N      | utahovací síla                                                      |
| $F_{Vi}$     | N      | celková pracovní síla namáhající šrouby                             |
| $K$          | -      | konstanta tenzometru                                                |
| $L$          | mm     | délka ojnice                                                        |
| $\Delta L^A$ | mm     | analyticky určený součet deformací šroubu a podložky                |
| $L_D$        | mm     | délka drátku tenzometru                                             |
| $\Delta L^M$ | mm     | součet deformací šroubu a podložky použitý při MKP                  |
| $L_i$        | mm     | i-tá délka náhradního válce šroubu                                  |
| $L_p$        | mm     | délka podložky                                                      |
| $\Delta L_p$ | mm     | zkrácení podložky při předpětí                                      |
| $\Delta L_s$ | mm     | prodloužení šroubu při předpětí                                     |
| $\Delta L_z$ | mm     | změna délky šroubu a podložky při působení pracovní síly            |
| $M$          | N.m    | utahovací moment                                                    |
| $M_1$        | N.m    | moment překonávající tření v závitu                                 |
| $M_2$        | N.m    | moment překonávající tření mezi maticí a ojnicí                     |
| $M_{pi}$     | N.m    | staticky neurčitý moment v křivém prutu tvaru prstence              |
| $m_p$        | g      | hmotnost pístu                                                      |
| $m_\ell$     | g      | hmotnost pístního čepu                                              |
| $m_{ks}$     | g      | hmotnost stíracího kroužku                                          |
| $m_k$        | g      | hmotnost pístního kroužku                                           |
| $m_\xi$      | g      | hmotnost šroubu                                                     |
| $m_o$        | g      | hmotnost ojnice                                                     |
| $m_{pa}$     | g      | hmotnost pánve                                                      |
| $m_{bp}$     | g      | hmotnost bronzového pouzdra                                         |
| $m$          | g      | celková hmotnost součástí, které zatěžují šrouby dynamickými silami |

| Označení      | Rozměr                   | Význam                                                               |
|---------------|--------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| $n$           | $\text{min}^{-1}$        | otáčky motoru                                                        |
| $p$           | MPa                      | tlak ve válci                                                        |
| $p_a$         | MPa                      | atmosférický tlak                                                    |
| $p_i$         | mm                       | i-tý průměr náhradního válce šroubu                                  |
| $\Delta p$    | MPa                      | rozdíl tlaku ve válci a atmosférického tlaku                         |
| $P$           | mm                       | rozteč závitu                                                        |
| $R_r$         | $\Omega$                 | odpor rezistoru                                                      |
| $R_t$         | $\Omega$                 | odpor tenzometru                                                     |
| $R$           | $\Omega$                 | odpor                                                                |
| $\Delta R$    | $\Omega$                 | změna odporu                                                         |
| $\Delta R_t$  | $\Omega$                 | změna odporu zatíženého tenzometru                                   |
| $R_{t0}$      | $\Omega$                 | odpor nezatíženého tenzometru                                        |
| $r_k$         | m, mm                    | poloměr kliky                                                        |
| $r_{kc}$      | m                        | poloměr klikového čepu                                               |
| $S$           | $\text{mm}^2$            | plocha pístu                                                         |
| $S_D$         | $\text{mm}^2$            | plocha průřezu drátku tenzometru                                     |
| $S_i$         | $\text{mm}^2$            | i-tá plocha průřezu náhradního válce šroubu                          |
| $U_1$         | V                        | napájecí napětí                                                      |
| $U_2$         | V                        | napětí na tenzometru                                                 |
| $U_{2z}$      | V                        | zesílené napětí na tenzometru                                        |
| $S_p$         | $\text{mm}^2$            | plocha průřezu válce nahrazujícího podložku                          |
| $z$           | -                        | zesílení zesilovače                                                  |
| $\alpha$      | $^\circ$                 | úhel definující polohu kliky (v horní úvrati je $\alpha = 0^\circ$ ) |
| $\beta$       | $^\circ$                 | úhel profilu závitu                                                  |
| $\gamma$      | $^\circ$                 | úhel stoupání závitu                                                 |
| $\delta$      | $^\circ$                 | úhel určující polohu zatěžujících sil při analytickém výpočtu        |
| $\varepsilon$ | -                        | poměrné prodloužení                                                  |
| $\lambda$     | -                        | poměr poloměru kliky k délce ojnice                                  |
| $\rho$        | $\Omega \cdot \text{mm}$ | rezistivita                                                          |



| Označení      | Rozměr          | Význam                                                             |
|---------------|-----------------|--------------------------------------------------------------------|
| $\sigma_i$    | MPa             | největší napětí ve šroubu v místě dělicí roviny při i-tém zatížení |
| $\sigma_{Ti}$ | MPa             | tahové napětí ve šroubu v místě tenzometrů při i-tém zatížení      |
| $\varphi$     | °               | třecí úhel                                                         |
| $\omega$      | s <sup>-1</sup> | kruhová frekvence                                                  |

## Úvod

Ojniční šroub patří mezi nejvíce namáhané součásti klikového mechanismu spalovacího motoru. Při jeho přetržení zpravidla vznikají těžká poškození motoru, a proto je třeba věnovat jeho výpočtu přiměřenou pozornost. Cílem diplomové práce je podat přehled o napjatosti a deformaci šroubu při zatížení podle bodu 3 zadání (a také při nezatíženém předepnutém stavu) užitím metody konečných prvků. Ze zadání vyplývá, že zřejmě jde o zjištění namáhání šroubu v případech, kdy podélná síla v ojnici nabývá extrémních hodnot (největší tahová a největší tlaková). Je požadováno zjistit napětí především v blízkosti dělicí roviny a výsledky ověřit experimentálním měřením. Avšak v blízkosti dělicí roviny není možné měřit deformaci šroubu a proto byly též zjištěny a porovnány hodnoty napětí na povrchu dřívku šroubu v místě, kde to možné je.

Vedlejším cílem diplomové práce je porovnání výsledků analytického výpočtu (užívaného před rozvojem výpočetní techniky), metody konečných prvků (dále jen MKP) a experimentálního měření.

Pro splnění úkolu podle zadání diplomové práce byly k dispozici:

- záznam průběhu tlaku ve válci (rozvinutý indikátorový diagram)
- úplný smontovaný píst s pístním čepem a úplnou ojnicí
- výkresy úplné ojnice s pístem, úplné ojnice a jednotlivých částí

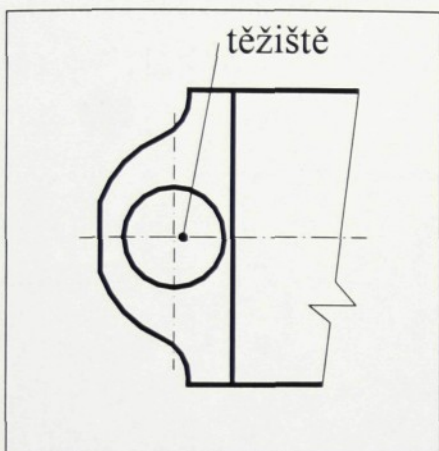
Veškerý text byl napsán pomocí programu Word 2000 a obrázky nakresleny programem Autocad 14.



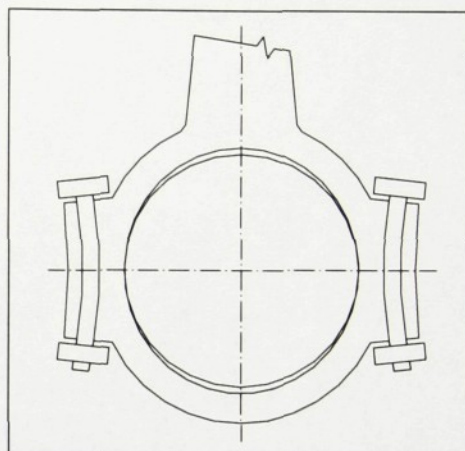
## 1 Namáhání šroubu

### 1.1 Počáteční úvahy

Šroub je po dotažení matice napínán silou předpětí. Ta způsobuje nejen jeho podélné natažení, ale zřejmě i ohyb. Lze tak usuzovat z toho, že osa šroubu neprochází těžištěm dělicí plochy hlavy ojnice (obr.1). Důsledkem takového umístění šroubu je deformace hlavy ojnice, která je příčinou zmíněného ohybového namáhání šroubu (obr.2). Nerovnoměrnost rozložení síly na dělicí ploše je patrně ještě zvýrazněna, protože hlava šroubu stlačuje více vnější část hlavy ojnice než vnitřní.

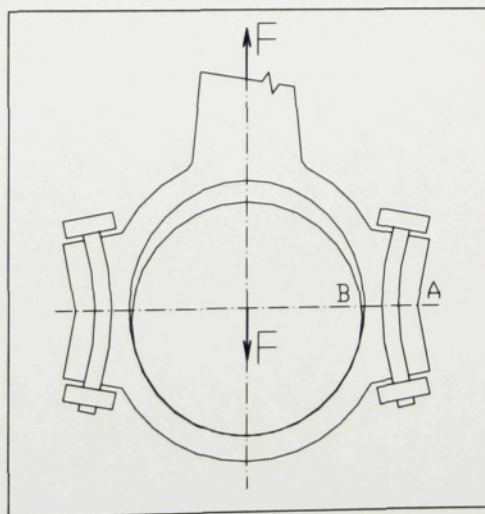


Obr.1 – dělicí plocha hlavy ojnice



Obr.2 – deformace předepnuté hlavy ojnice

Tahové zatížení ojnice silou  $F$  pak zřejmě bude ohybové namáhání šroubu zvětšovat a tlakové zmenšovat. Největší podélné deformace lze tedy podle obrázku 3 očekávat na povrchu šroubu ve vlákne, které je nejbližší klikovému čepu.



Obr.3 - deformace při tahovém zatížení

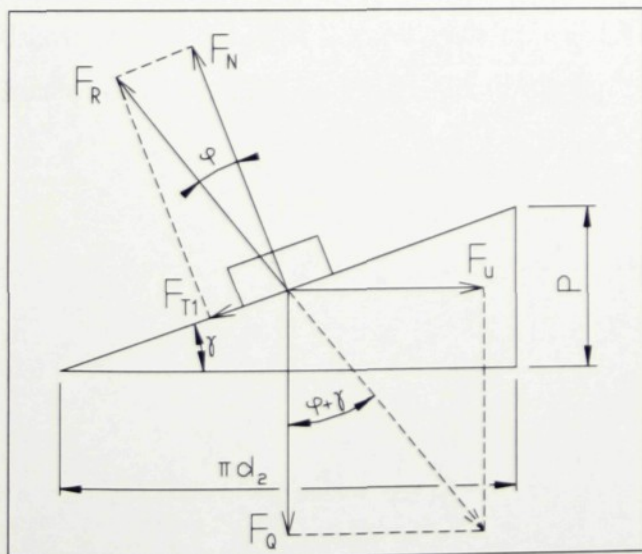
Ve šroubu je po utažení napjatost ještě složitější kvůli krutovému namáhání, které ve šroubu vzniká při utahování matice. Namáhání krutem ale po krátké době vymizí díky mikroposuvům, a proto není zahrnuto do výpočtu.

## 1.2 Předpětí

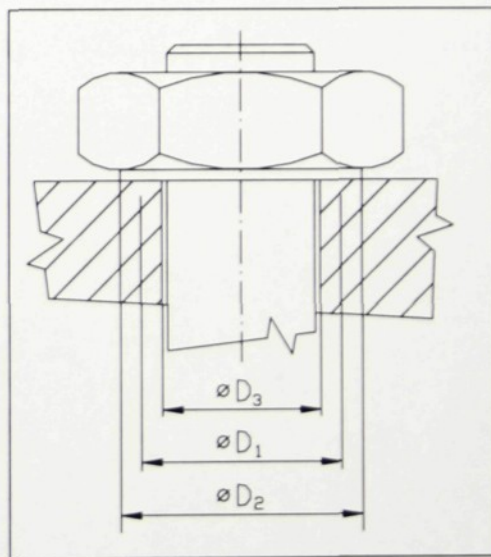
Ojnicní šrouby se montují s předpětím, které je dáno předepsanou velikostí utahovacího momentu  $M$ . Ten je tvořen složkami  $M_1$  a  $M_2$ . Moment  $M_1$  překonává třecí sílu v závitu, moment  $M_2$  třecí sílu mezi maticí a ojnicí a na vzniku předpětí se tedy účastní pouze složka  $M_1$ .

Jak je známo, výpočet silového působení při utahování (a povolování) šroubu se zjednodušuje nahrazením matice tělískem, které se pohybuje po šroubové ploše. Veškeré působící síly se přitom soustřeďují v bodě, ležícím na průsečnici šroubové plochy a válce o průměru  $d_2$  (střední průměr závitu). Po rozvinutí této válcové plochy obsahující střední šroubovici do roviny je možné uvažovat silové poměry obdobně, jako při pohybu tělesa na nakloněné rovině podle obr.4. Pak tedy je

$$M_1 = \frac{d_2}{2} \cdot F_Q \cdot \operatorname{tg}(\gamma + \varphi) .$$



Obr.4 – těleso na nakloněné rovině



Obr.5 – dotyková plocha matice



Působením síly předpětí vzniká na dotykové ploše při pohybu matice, jak již bylo zmíněno, třecí síla, která je překonávána momentem  $M_2$ . Tato síla působí na středním průměru dotykové plochy matice (obr. 5) a pak tedy platí

$$M_2 = F_{T2} \cdot \frac{D_1}{2} = f_2 \cdot F_Q \cdot \frac{D_1}{2} .$$

Jak již bylo uvedeno, platí

$$M = M_1 + M_2$$

a sílu předpětí lze pak vyjádřit ve tvaru

$$F_Q = \frac{M}{\frac{d_2}{2} \cdot \operatorname{tg}(\gamma + \varphi) + f_2 \cdot \frac{D_1}{2}} .$$

Součinitel tření je obecně velmi neurčitá veličina a lze říci, že co kniha, to jiný doporučený rozsah této veličiny. Literatura [4] udává pro mazaný závit s kovově lesklým povrchem rozsah  $0,16 \div 0,24$  a literatura [5] pro slabě mazaný povrch hodnotu  $f = 0,15$ . Podle výkresu sestavy je závit namáčen do zředěného molyka (chem. látka snižující tření) s válcovým olejem a proto je zvolen součinitel tření v závitu  $f_1 = 0,12$ . Obdobně je zvolen druhý součinitel  $f_2 = 0,15$ , který má větší hodnotu vzhledem k horší kvalitě dotykové plochy matice a slabšímu mazání. Výkres sestavy udává velikost utahovacího momentu v rozmezí  $M = 40\text{--}4 \text{ N.m}$ , a byla zvolena jeho střední hodnota  $M = 38 \text{ N.m}$ .

Další veličiny potřebné pro výpočet jsou

$$\gamma = \operatorname{arctg} \frac{P}{\pi \cdot d_2} = \operatorname{arctg} \frac{1}{\pi \cdot 8,35} = 2,183^\circ , \quad D_1 = \frac{D_2 + D_3}{2} = \frac{13,5 + 9,5}{2} = 11,5 \text{ mm} .$$

Ve výpočtu úhlu tření  $\varphi$  je uvažován i úhel profilu metrického závitu  $\beta$ , takže

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{f_1}{\cos \frac{\beta}{2}} = \operatorname{arctg} \frac{0,12}{\cos \frac{60}{2}} = 7,889^\circ$$

a síla předpětí pak je

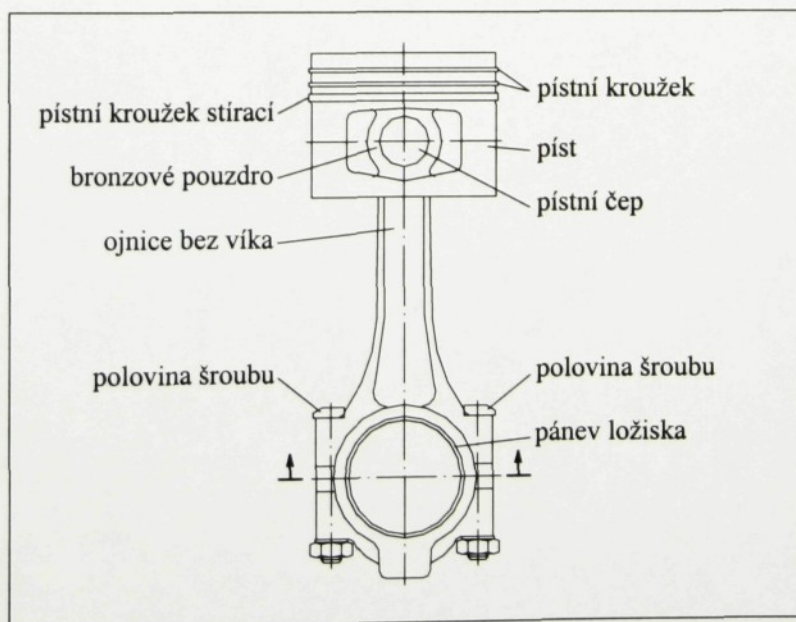
$$F_Q = \frac{38000}{\frac{8,35}{2} \cdot \operatorname{tg}(2,183 + 7,889) + 0,15 \cdot \frac{11,5}{2}} = 23690 \text{ N} .$$

S ohledem na neurčitost hodnot součinitelů tření a toleranci utahovacího momentu může mít velikost síly předpětí značný rozptyl. Maximální síla předpětí může být odhadnuta pro největší moment, tedy  $M = 40 \text{ N.m}$  a součinitele tření  $f_1 = 0,11$  a  $f_2 = 0,14$ , minimální síla pak pro nejmenší moment, tedy  $M = 36 \text{ N.m}$  a součinitele tření  $f_1 = 0,13$  a  $f_2 = 0,16$ . S využitím těchto hodnot byly odhadnuty extrémní velikosti síly předpětí

$$F_{Q_{\max}} = 26706 \text{ N} \quad \text{a} \quad F_{Q_{\min}} = 21048 \text{ N}.$$

### 1.3 Silové působení ojnice na šrouby

Šroub je zatížen silami při polohách pístu dle bodu 3 zadání. Zatěžující síla působící na šrouby je dána součtem síly od tlaku pracovní látky ve válci a setrvačné síly od pohybujících se součástí klikového mechanismu, které se nacházejí nad dělicí rovinou (obr.6). Tlak ve válci pro příslušnou polohu pístu byl odečten z indikátorového diagramu, který je přiložen. Od této hodnoty tlaku byl následně odečten atmosférický tlak, který na píst působí z opačné strany. Pro výpočet byly zvoleny otáčky motoru  $n = 4000 \text{ min}^{-1}$ . Kladné znaménko síly značí namáhání ojnice tahem.



Obr.6 - celek ojnice s pístem



Hmotnosti částí klikového mechanismu, jejichž dynamické účinky působí na šrouby:

Při studiu výkresových podkladů byl zjištěn značný rozptyl hmotností pístu a ojnice daný způsobem výroby. Tyto součásti jsou proto zařazovány do hmotnostních skupin. V následujícím výpočtu byly v obou případech zvoleny střední hodnoty hmotností ze stanoveného rozsahu.

|                       |                     |                              |                       |
|-----------------------|---------------------|------------------------------|-----------------------|
| píst .....            | $m_p = 283\text{g}$ | bronzové pouzdro .....       | $m_{bp} = 13\text{g}$ |
| čep .....             | $m_c = 78\text{g}$  | pístní kroužek stírací ..... | $m_{ks} = 8\text{g}$  |
| pístní kroužek .....  | $m_k = 8\text{g}$   | polovina šroubu .....        | $m_s = 11,5\text{g}$  |
| ojnice bez víka ..... | $m_o = 362\text{g}$ | pánev .....                  | $m_{pa} = 15\text{g}$ |

Celková hmotnost součástí dynamicky působících na šrouby tedy je

$$m = m_p + m_c + 2 \cdot m_k + m_o + m_{bp} + m_{ks} + 2 \cdot m_s + m_{pa} = 798\text{g}.$$

Další veličiny potřebné k určení dynamických sil:

$$\lambda = \frac{r_k}{L} = \frac{39,25}{133} = 0,295 \quad , \quad \omega = 2 \cdot \pi \cdot n = 2 \cdot \pi \cdot \frac{4000}{60} = 418,9 \text{ s}^{-1},$$

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 75^2}{4} = 4417,9 \text{ mm}^2.$$

Výpočet zrychlení pístu je proveden podle literatury [3], tedy

$$a = \omega^2 \cdot r_k \cdot (\cos \alpha + \lambda \cdot \cos(2 \cdot \alpha)) .$$

a) Píst v horní úvratí na rozhraní kompresního a expanzního zdvihu

V souladu se zadáním nejsou v této poloze uvažovány setrvačné síly. Z indikátorového diagramu byl odečten maximální tlak, i když ten se nachází až za horní úvratí. Síla namáhá ojnicí tlakem a má tedy záporné znaménko. Pro tuto polohu je

$$\text{tlak ve válci} \quad p = 4,8435 \text{ MPa} ,$$

$$\text{rozdíl tlaků} \quad \Delta p = p - p_a = 4,8435 - 0,1 = 4,7435 \text{ MPa} ,$$

$$\text{a zatěžující síla} \quad F_1 = \Delta p \cdot S = 4,7435 \cdot 4417,9 = -20956 \text{ N}.$$

- b) Při poloze pístu v horní úvrati mezi výfukovým a plnicím zdvihem (pro  $\alpha = 0^\circ$ ) je
- tlak ve válci  $p = 0,0629 \text{ MPa}$  ,
- rozdíl tlaků  $\Delta p = p_a - p = 0,1 - 0,0629 = 0,0371 \text{ MPa}$  ,
- a zatěžující síla  $F_2 = \Delta p \cdot S + m \cdot \varpi^2 \cdot r_K \cdot (\cos \alpha + \lambda \cdot \cos(2 \cdot \alpha)) =$   
 $= 0,0371 \cdot 4417,9 + 0,798 \cdot 418,9^2 \cdot 0,03925 \cdot (1 + 0,295) = 7282 \text{ N}$ .

- c) Při poloze pístu v dolní úvrati na konci plnicího zdvihu (pro  $\alpha = 180^\circ$ ) je
- tlak ve válci  $p = 0,0715 \text{ MPa}$  ,
- rozdíl tlaků  $\Delta p = p_a - p = 0,1 - 0,0715 = 0,0285 \text{ MPa}$  ,
- a zatěžující síla  $F_3 = \Delta p \cdot S + m \cdot \varpi^2 \cdot r_K \cdot (\cos \alpha + \lambda \cdot \cos(2 \cdot \alpha)) =$   
 $= 0,0285 \cdot 4417,9 + 0,798 \cdot 418,9^2 \cdot 0,03925 \cdot (-1 + 0,295) = - 3750 \text{ N}$ .

## 2 Analytický výpočet

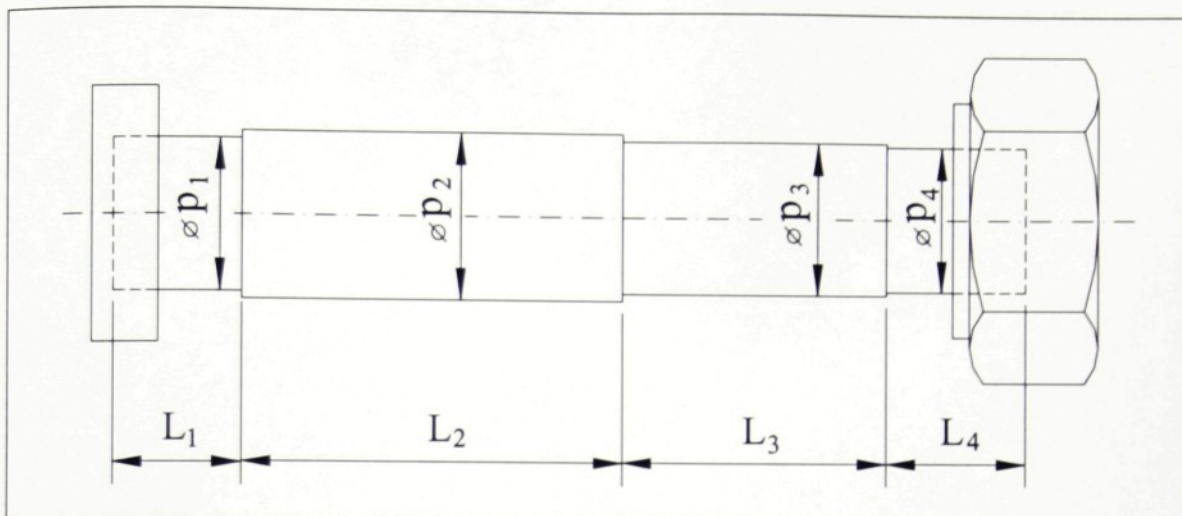
### 2.1 Tuhost šroubu a stlačované části ojnice

Pro výpočet tuhosti šroubu byl jeho tvar zjednodušen (obr.7) podle těchto bodů:

- část dříku pod hlavou šroubu, která má po délce proměnlivý průměr, byl nahrazen válcem stejné délky o průměru 8,4mm
- část dříku se závitem byla nahrazena válcem s plochou průřezu o velikosti plochy jádra závitu
- neobvyklý válcovitý tvar hlavy byl nahrazen válcem stejného průměru i délky
- jsou zanedbána všechna zaoblení

Na tuhost šroubu mají vliv také jeho hlava a matice, což je ve výpočtu zohledněno přičtením dvou třetin výšky hlavy k válci 1 a poloviny výšky matice k válci 4.





Obr.7 - náčrtek zjednodušeného tvaru šroubu

Pro výpočet tuhosti válce platí

$$c_{Si} = \frac{E \cdot S_i}{L_i}.$$

Tuhosti se sčítají jak je známo v převrácených hodnotách, takže tuhost šroubu je

$$c_s = \left( \sum_{i=1}^4 \frac{1}{c_{Si}} \right)^{-1}.$$

Ve výpočtu byly uvažovány tyto vstupní hodnoty:

modul pružnosti  $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$

střední průměr závitu M 9x1  $d_2 = 8,35 \text{ mm}$

malý průměr závitu  $d_3 = 7,773 \text{ mm}$

délky jednotlivých válců  $L_1 = 7,7 \text{ mm}$ ,  $L_2 = 23 \text{ mm}$ ,  $L_3 = 16 \text{ mm}$ ,  $L_4 = 8,4 \text{ mm}$

průměry jednotlivých válců  $p_1 = 8,4 \text{ mm}$ ,  $p_2 = 9,2 \text{ mm}$ ,  $p_3 = 8,346 \text{ mm}$  a

$$p_4 = \frac{d_2 + d_3}{2} = \frac{8,35 + 7,773}{2} = 8,0615 \text{ mm}.$$

Jelikož platí, že  $S_i = \frac{\pi \cdot p_i^2}{4}$ , hodnoty ploch průřezů jsou

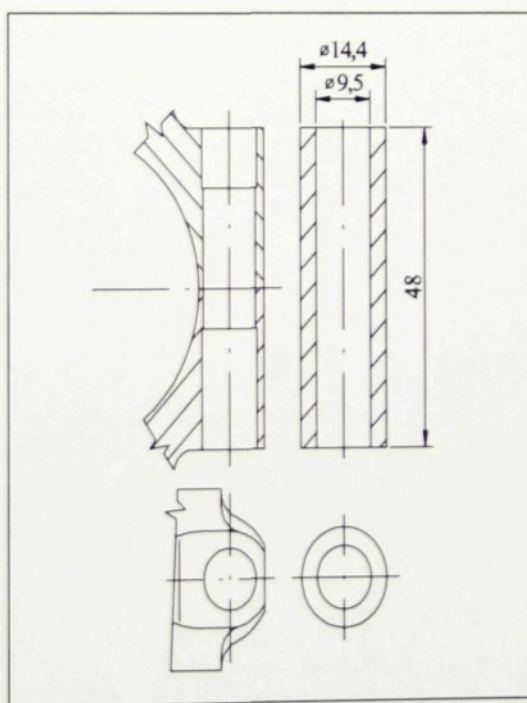
$$S_1 = 55,42 \text{ mm}^2, S_2 = 66,48 \text{ mm}^2, S_3 = 54,71 \text{ mm}^2, S_4 = 51,04 \text{ mm}^2.$$

Dosazením byla získána hodnota tuhosti šroubu  $c_s = 222937 \text{ N.mm}^{-1}$ .

Výpočet tuhosti stlačované části ojnice (dále označována jako podložka) je vzhledem k jejímu tvaru podstatně obtížnější. Podle Rótscherovy hypotézy dle literatury [1] se napětí v sevřeném tělese šíří v dvojkuželech o vrcholovém úhlu  $90^\circ$ . Složitý tvar hlavy ojnice však neumožňuje snadno vypočítat objem, který je podle této hypotézy zasažený napětím. Tvar podložky je navíc značně nesymetrický s malou hodnotou průřezu po celé délce. Výpočet touto klasickou metodou lze tedy provést jen při zjednodušení tvaru podložky a jeho výsledek je třeba považovat pouze za orientační.

Výpočet tuhosti podložky byl tedy proveden pro dutý válec. Jeho rozměry byly odhadnuty tak, aby měl velikost objemu podobnou se stlačovaným objemem podložky (obr.8). Předpokládá se, že tento válec má blízkou hodnotu podélné tuhosti jako podložka. Jeho délka je shodná s délkou podložky a jeho průměry jsou 9,5 mm a 14,4 mm. Pak platí

$$c_p^A = \frac{E \cdot S_p}{L_p} = \frac{210000 \cdot \frac{\pi \cdot (14,4^2 - 9,5^2)}{4}}{48} = 402404 \text{ N.mm}^{-1}.$$



Obr.8 - dutý válec pro výpočet tuhosti podložky

Přesnější hodnota tuhosti by mohla být i v dobách, kdy nebyla k dispozici výpočetní technika, zjištěna pokusně. Při pokusu by patrně namísto šroubu svíraly podložku čelisti a byla by měřena velikost zatěžující síly v závislosti na deformaci. Takto popsáný pokus byl proveden pomocí MKP v kap. 3.4 a byla zjištěna hodnota tuhosti podložky  $c_p^P = 683556 \text{ N.mm}^{-1}$ . Předpokládá se, že model podložky se deformuje podobně jako skutečná podložka.



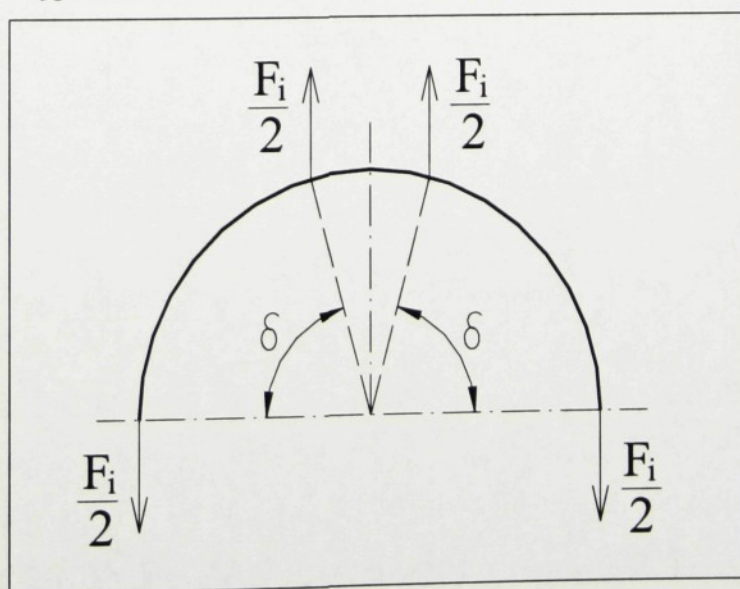
Je třeba vzít v úvahu skutečnost, že  $c_p^P$  byla zjištěna zatížením samotné podložky. Skutečný celek ojnice a zamontovaného šroubu se ale navzájem deformují (dochází k natáčení dotykových ploch - kap.1.1). Tomu však okrajové podmínky zabránily, a lze tedy předpokládat, že skutečná hodnota tuhosti podložky má nižší hodnotu než  $c_p^P$ . Proto hodnota tuhosti  $c_p$ , která byla použita k dalším výpočtům, byla vypočítána jako střední hodnota  $c_p^A$  a  $c_p^P$ , tedy

$$c_p = \frac{c_p^A + c_p^P}{2} = \frac{683556 + 402404}{2} = 542980 \text{ N.mm}^{-1}.$$

## 2.2 Napětí ve šroubu

V dostupné literatuře není uveden výpočet celku ojnicní hlavy se šroubem, který umožňuje určit také ohybové namáhání ojnicního šroubu. Při pokusu o takový výpočet by bylo nutné vypočítat deformaci hlavy ojnice dle teorie křivého prutu, což vyžaduje znalost kvadratického momentu plochy prutu. Ten je však obtížně vypočitatelný vzhledem k velmi složitému tvaru hlavy. Při zjednodušení tvaru hlavy je jeho velikost velmi nejistá, neboť je počítán pomocí třetí mocniny výšky prutu.

Podle [1] je namáhání šroubu vlivem deformace hlavy ojnice vypočítáno jako tahová síla, která zachycuje staticky neurčitý moment v dělicí rovině hlavy. Tento moment je vypočítán z podmínky minima deformační energie v křivém prutu tvaru prstence, který je zatížen dvěma silami o velikosti poloviny zatěžující síly působící v bodě daném úhlem  $\delta$  (obr.9). Pomocí tohoto úhlu lze ve výpočtu uvažovat ložiskovou vůli a její proměnlivost.



Obr.9 - poloha zatěžujících sil

Velikost úhlu  $\delta$  je udávána v rozsahu  $65^\circ \div 85^\circ$ , byla zvolena hodnota  $\delta = 75^\circ$  a do výpočtu samozřejmě dosazena v obloukové míře  $\delta = 1,309$  rad. Zatěžující síla  $F_i$  je dosazena s kladným znamínkem, protože v každém zatěžujícím případě způsobuje ve šroubu tah.

Při tahovém zatížení ojnice, kdy je křivost prutu zvětšována platí

$$M_{Pi} = \frac{F_i \cdot r_{K\dot{C}}}{\pi} \cdot \left( \frac{\pi}{2} - \sin \delta - \left( \frac{\pi}{2} - \delta \right) \cdot \cos \delta \right).$$

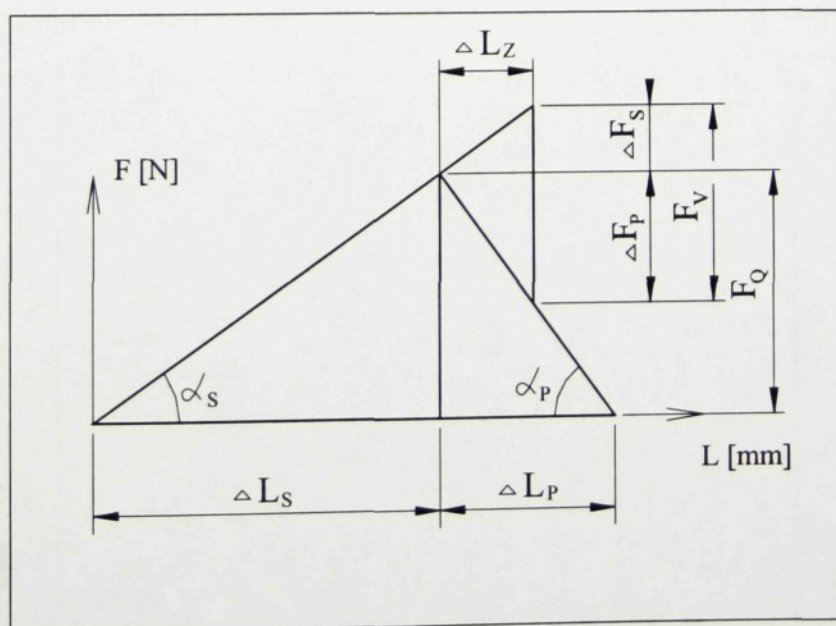
Tento moment má tendenci natáčet vůči sobě víko a ojnici kolem hrany A pro tahové zatížení a kolem hrany B pro tlakové (viz. obr.3). Pro sílu ve šroubu  $F_{Mi}$  způsobenou momentem  $M_{Pi}$  můžeme psát

$$F_{Mi} = \frac{M_{Pi}}{e_i},$$

kde  $e_i$  je vzdálenost hrany A popřípadě B od osy šroubu, podle daného smyslu zatěžující síly  $F_i$ . Celková pracovní síla namáhající šroubový spoj je pak dána vztahem

$$F_{Vi} = \frac{F_i}{2} + F_{Mi}.$$

Pro znázornění společného působení předpětí a pracovní síly ve šroubu slouží známý diagram předepnutého šroubového spoje (obr.10).



Obr.10 - diagram předepnutého šroubového spoje



Podle diagramu platí vztahy

$$F_V = \Delta F_S + \Delta F_P, \quad \operatorname{tg} \alpha_S = c_S = \frac{F_Q}{\Delta L_S}, \quad \operatorname{tg} \alpha_P = c_P = \frac{F_Q}{\Delta L_P}, \quad \Delta F_S = \Delta L_Z \cdot c_S, \quad \Delta F_P = \Delta L_Z \cdot c_P,$$

ze kterých je možné vyjádřit přírůstek síly ve šroubu při zatížení silou z ojnice jako

$$\Delta F_{Si} = F_{Vi} \cdot \frac{c_S}{c_S + c_P}.$$

Celková síla ve šroubu je

$$F_{Ci} = F_Q + \Delta F_{Si}$$

a největší napětí v průřezech šroubu v místě dělicí roviny a v místě tenzometrů pak jsou

$$\sigma_i = \frac{4 \cdot F_{Ci}}{\pi \cdot p_2^2} \quad \text{a} \quad \sigma_{\pi} = \frac{4 \cdot F_{Ci}}{\pi \cdot p_3^2}.$$

Číselné výsledky kapitoly 2.2:

Tabulka udává hodnoty sil a napětí pro všechny zatěžující případy včetně nezatíženého předepnutého stavu ( $i = 0$ ). Pro výpočet byly použity hodnoty tuhostí

$$r_{KC} = 0,024 \text{ m}, \quad c_P = 542980 \text{ N.mm}^{-1} \text{ a } c_S = 222937 \text{ N.mm}^{-1}.$$

V závorkách je uveden také rozsah příslušného napětí při působení extrémních sil předpětí

$$F_{Q\min} \text{ a } F_{Q\max}.$$

| $i$ | $M_{Pi}$ [N.m] | $e_i$ [mm] | $F_{Mi}$ [N] | $F_{Vi}$ [N] | $\Delta F_{Si}$ [N] | $F_{Ci}$ [N] | $\sigma_i$ [MPa] | $\sigma_{\pi}$ [MPa] |
|-----|----------------|------------|--------------|--------------|---------------------|--------------|------------------|----------------------|
| 0   | 0              | -          | 0            | 0            | 0                   | 23690        | 356(317-402)     | 433(385-488)         |
| 1   | 86             | 5,35       | 16075        | 5597         | 1629                | 25319        | 381(341-426)     | 463(415-518)         |
| 2   | 29,9           | 6,25       | 4784         | 8425         | 2452                | 26142        | 393(354-439)     | 478(430-533)         |
| 3   | 15,4           | 5,35       | 2879         | 1004         | 292                 | 23982        | 361(321-406)     | 438(390-494)         |

Kvůli porovnání součtu deformací šroubu a podložky při předpětí s kap.3.1 je uveden

$$\Delta L^A = \Delta L_S + \Delta L_P = \frac{F_Q}{c_S} + \frac{F_Q}{c_P} = 0,149893 \text{ mm}.$$



### 3 Výpočet pomocí MKP

#### 3.1 Výpočtový model

Model celku ojnice, zamontovaného šroubu a klikového čepu byl vytvořen v modelovacím programu IDEAS r.9. Kvůli minimalizaci počtu konečných prvků a tedy i výpočtového času bylo výhodné vytvořit model s těmito zjednodušujícími úpravami:

- namísto celé ojnice byla modelována pouze její dolní část, protože horní část ojnice nemá na napjatost ve šroubech prakticky žádný vliv
- byl vytvořen pouze čtvrtinový model, neboť při zanedbání mazací díry ložiska má model dvě roviny symetrie
- hlava ojnice nemá zaoblené hrany
- šroub a matice byly vytvořeny jako jedno těleso
- závitová část dříku byla nahrazena válcem o ploše průřezu shodné s plochou průřezu jádra závitu
- matice nemá zaoblené hrany

Pro snížení výpočtového času je dále vhodné snížit počet ploch se silovým dotykem součástí. Na těchto plochách budou totiž umístěny kontaktní prvky, které jinak lineární úlohu převádějí na nelineární. Tedy

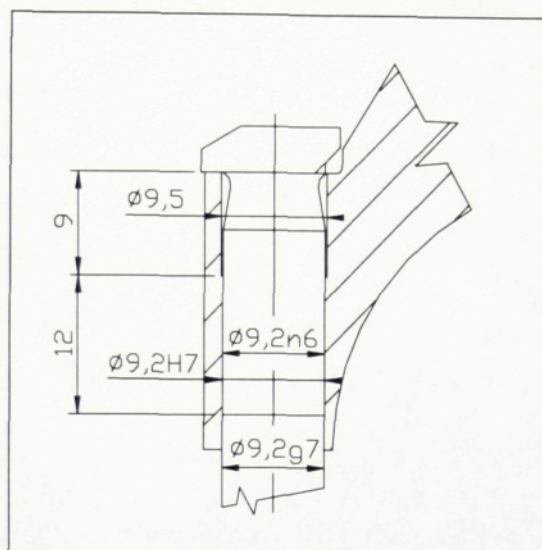
- samotná ojnice a víko ojnice byly vytvořeny jako jedno těleso, neboť díky předpětí nedochází k vzájemnému pohybu při žádném zatěžujícím případě
- model neobsahuje pánve kluzného ložiska

Za účelem vytvoření předepnutého modelu byly dřík šroubu a podložka namodelovány s rozdílnou délkou. Ansys umožňuje zadat deformační podmínku typu ztotožnění dvou ploch (viz.níže), které nejsou příliš vzdálené (záleží na hustotě sítě, orientačně do 1mm). Při řešení úlohy pak dojde ke ztotožnění dotykových ploch šroubu a podložky, tedy šroub je natahován a podložka stlačována. Rozdíl délek podložky a dříku šroubu musí být takový, aby ve šroubu působila síla předpětí  $F_Q = 23690N$  vypočítaná v kap.1.2. Proto bylo zhotoveno více modelů s různými rozdíly délek. Následným vyřešením těchto modelů, zjištěním síly působící ve šroubu a další úpravou modelu byl zjištěn dostatečně přesně rozdíl délek  $\Delta L^M = 0,16186mm$ . V tomto modelu pak byla odečtena síla předpětí  $F_Q = 23600N$ .

Pro rozdíly délek platí  $\Delta L^M \neq \Delta L^A$ , což naznačuje, že tuhost podložky zjištěná analytickým výpočtem  $c_p^A$  se neshoduje se skutečnou tuhostí podložky. Nemožnost zjištění její správné hodnoty je jednou z nevýhod analytického výpočtu.



Některé rozměry jsou na výrobních výkresech udány s tolerancí. Model zohledňuje nalisování části dříku v samotné ojnici po délce 12 mm, a pro model je tedy zapotřebí určit průměr dříku a díry podložky (obr.11). Hodnoty rozměrů mají vždy velikost střední hodnoty jejich tolerančního pole.



Obr.11 - uložení šroubu v ojnici

| rozměr na výrobním výkresu | číselné vyjádření      | střední hodnota rozměru |
|----------------------------|------------------------|-------------------------|
| 9,2 H7                     | $9,2^{+0,015}_0$       | 9,2075                  |
| 9,2 n6                     | $9,2^{+0,019}_{+0,01}$ | 9,2145                  |
| 9,2 g7                     | $9,2^{-0,005}_{-0,02}$ | 9,1875                  |

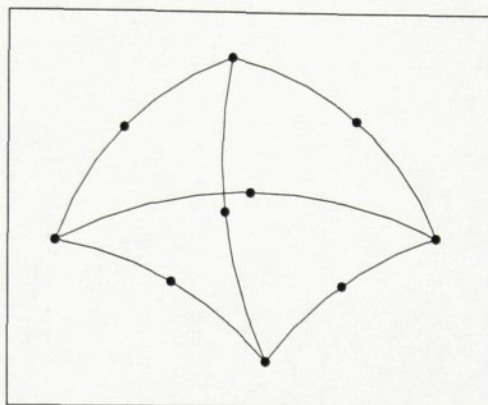
Průměr zatěžujícího čepu modelu byl zvolen o 0,1 mm menší než je průměr vývrtu samotné ojnice tzn. 47,9mm, což zhruba odpovídá uložení skutečného klikového čepu v kluzném ložisku.

### 3.2 Tvorba sítě konečných prvků

Hotový model byl pomocí formátu .igs přenesen do systému ANSYS r.8. Celý objem každé součásti je třeba vyplnit konečnými prvky. Při volbě konečného prvku je třeba uvážit, že:

- tvar šroubu a především ojnice je poměrně složitý
- objemy součástí jím budou vyplněny samočinně

Těmto podmínkám vyhovuje prvek SOLID92, který má tvar čtyřstěnu s celkovým počtem deseti uzlů. Použití prvků s parabolickými funkcemi obecně prodlužuje výpočtový čas, avšak jejich počet je při stejně přesných výsledcích výrazně nižší, než při použití lineárních prvků.



Obr.12 - prvek Solid92

I když byla síť vytvořena programem samočinně (tzv.volná síť), může uživatel Ansysu ovlivnit její hustotu určením počtu prvků na jakékoli hraně modelu. Velikosti prvků byly zadány následovně:

- 0,5 mm - na dotykových plochách podložky a šroubu tzn. pod jeho hlavou a maticí
- 0,5 mm - na dotykových plochách dříku o průměru 9,2n6 a díry podložky
- 1 mm - na ostatních hranách dříku šroubu
- 4 mm - na dotykových plochách ojnice a zatěžujícího čepu

V předchozí kap. byla zmíněna deformační podmínka typu ztotožnění dvou blízkých ploch. Ta je uskutečněna vytvořením kontaktních párů mezi uzly sítě na plochách, mezi kterými je požadován silový dotyk součástí. Vždy je třeba zvolit tzv. kontaktní plochu a tzv. cílovou plochu, přičemž je možné zadat hodnotu součinitele tření mezi těmito plochami. Dvojice ploch v modelu se silovým dotykem jsou:

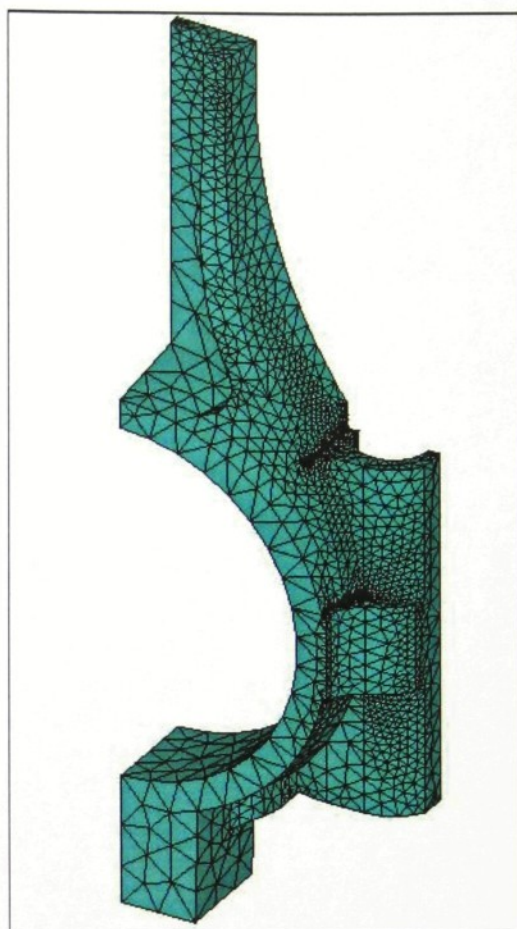
- dotykové plochy hlavy šroubu a podložky,  $f = 0,15$
- dotykové plochy matice a podložky,  $f = 0,15$
- dotykové plochy podložky a části dříku, kde je uložení s přesahem,  $f = 0,2$
- dotykové plochy ojnice a zatěžujícího čepu,  $f = 0,2$ .

Typ použitých kontaktních prvků je v Ansysu přednastaven. Kontaktní plochy byly tedy osazeny prvky CONTA174 a cílové plochy prvky TARGE170.





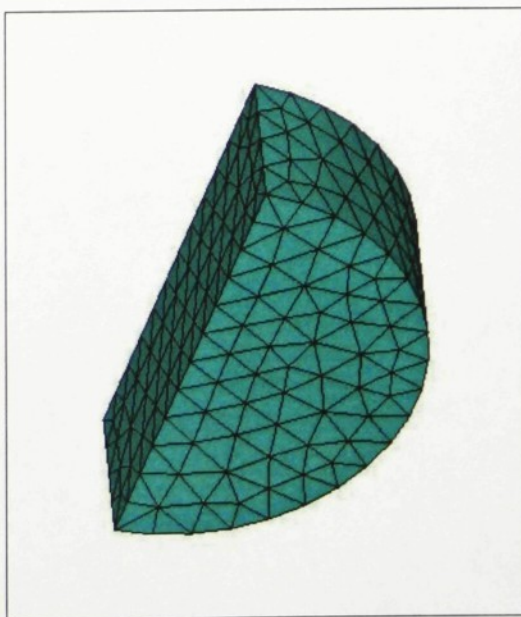
Obr.13 - síť ojnice



Obr.14 - síť ojnice



Obr.15 - síť šroubu



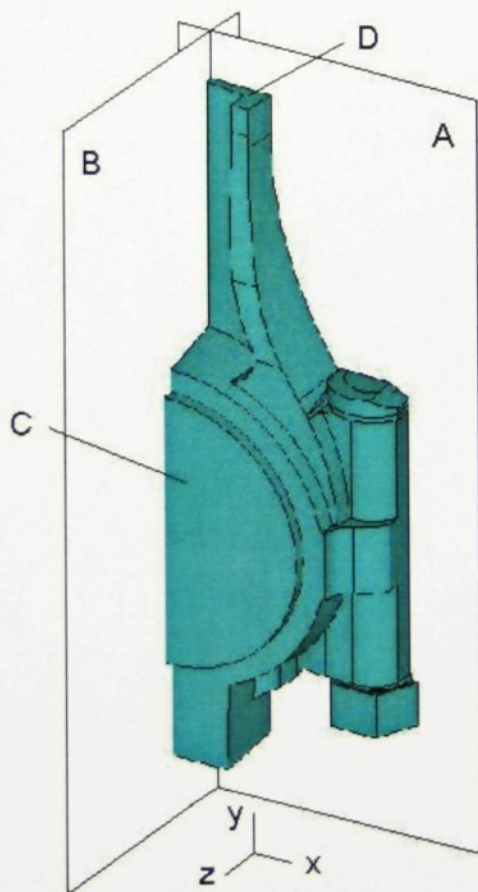
Obr.16 - síť čepu

### 3.3 Okrajové podmínky modelu

Uzly, které leží v rovinách symetrie, se mohou pohybovat pouze v těchto rovinách. To znamená, že uzlům ležícím v rovině

- B bylo zabráněno v posuvu ve směru osy  $x$
- A bylo zabráněno v posuvu ve směru osy  $z$

Uzlům v rovině C patřícím zatěžujícímu čepu bylo zabráněno v posuvu ve směru osy  $y$ , čímž byl celý model "ukotven". Tento model napodobuje nezatížený celek ojnice se zamontovaným šroubem.



Obr.17 - plochy s okrajovými podmínkami

Zatěžující síla byla do modelu vnesena deformační podmínkou pro uzly ojnice náležící rovině D. Těmto uzlům byly zadány okrajové podmínky různých velikostí ve směru osy  $y$ . Po vyřešení modelu byla následně odečítána celková síla ve všech uzlech roviny D ve směru  $y$ . Další úpravou hodnot těchto deformačních podmínek byly zjištěny jejich potřebné velikosti,



aby dostatečně přesně napodobovaly zatěžující síly podle kap. 1.3. Hodnoty sil v tabulce mají čtvrtinovou velikost, neboť byl použit čtvrtinový model.

| velikost okr. podmínky | požadovaná síla podle kap.1.3 | zatěžující síla v modelu |
|------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| -0,088                 | -5239                         | -5300                    |
| 0,08                   | 1820                          | 1857                     |
| -0,0603                | -938                          | -962                     |

S těmito okrajovými podmínkami byly modely vyřešeny a byly získány níže uvedené výsledky.

3.4 Tuhost podložky

Kvůli kap. 2.1 byla zjištěna tuhost podložky. Pro model ojnice byly použity okrajové podmínky symetrie viz.výše. K modelu byly připojeny deformační podmínky pro dotykové plochy ojnice se šroubem a maticí. Uzlům dolní dotykové plochy bylo zabráněno v posuvu do směru y. Na uzly horní plochy byla použita deformační podmínka ve směru osy y podle tabulky. Obr.18 zobrazuje deformace ve směru y pro okrajovou podmínku -0,04 mm.

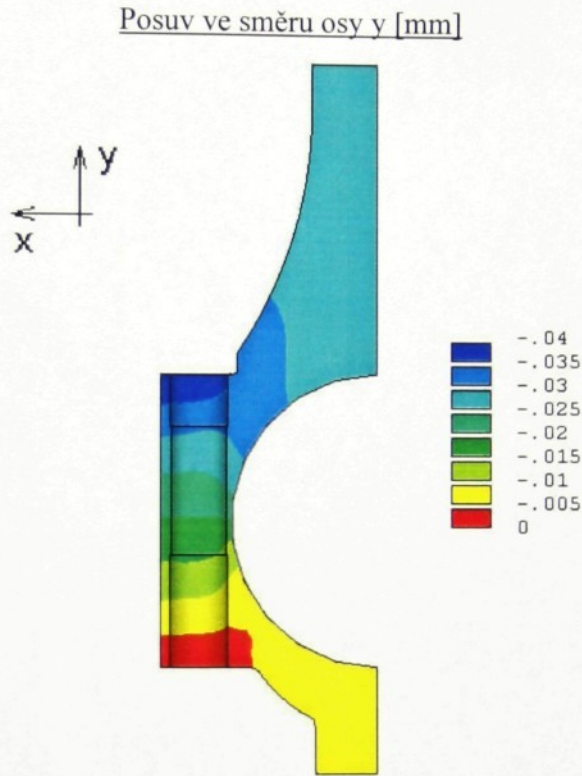
| posuv uzlů[mm] | síla[N] |
|----------------|---------|
| -0,02          | 1590    |
| -0,03          | 14458   |
| -0,04          | 34284   |
| -0,06          | 61543   |

Hodnoty sil byly zjištěny z poloviny stlačované podložky a následně byly přepočítány pro celý průřez podložky. Pro zjištění tuhosti je třeba zjistit, při jaké velikosti posuvu uzlů působí v podložce síla předpětí  $F_0 = 23690$  N. Tabulka dokládá, že tuhost podložky je nelineární. Hledaný posuv byl proto zjištěn interpolací (lineární) s využitím hodnot sil při posuvech - 0,03 a -0,04 podle vztahu

$$\frac{0,03 - 0,04}{34284 - 14458} \cdot (23690 - 14458) - 0,03 = -0,034657.$$

Tuhost pak byla spočítána jako podíl síly předpětí a uvedené deformace, tedy

$$c_p^P = \frac{23690}{0,034657} = 683556 \text{ N.mm}^{-1}.$$



Obr.18 - deformace ojnice (podložky) pro zjištění tuhosti



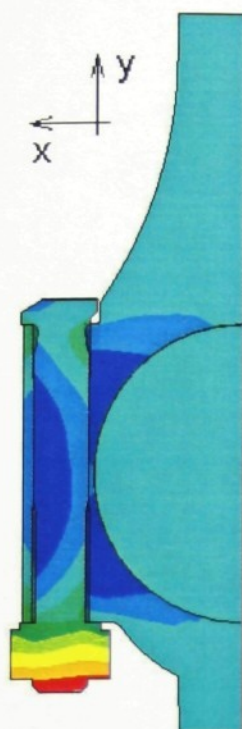
3.5 Výsledky

Při zobrazování výsledných napětí a deformací je možné nastavit libovolný rozsah zobrazované veličiny (posuvu, napětí). Při jednotlivých zatěžujících případech byly většinou zvoleny její nejmenší a největší velikosti různě, aby byl rozsah využit pro hodnotnější popis. Hodnoty napětí v některých částech ojnice a šroubu, ve kterých je není nutné zobrazit, jsou mimo zobrazovaný rozsah a mají šedou barvu. Díky tomu je pak barevně zobrazená část popsána s větším rozlišením.

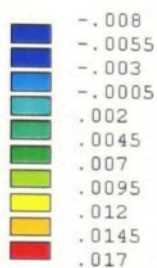
Obrázky výsledků jsou vždy seřazeny podle tohoto vzoru.

|                                                                                    |                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>předpětí<br/>tedy <math>F = 0 \text{ N}</math></p>                              | <p>zatížení podle bodu<br/>3a zadání, tedy<br/><math>F = -20956 \text{ N}</math></p> |
| <p>zatížení podle bodu<br/>3b zadání, tedy<br/><math>F = 7282 \text{ N}</math></p> | <p>zatížení podle bodu<br/>3c zadání, tedy<br/><math>F = -3750 \text{ N}</math></p>  |

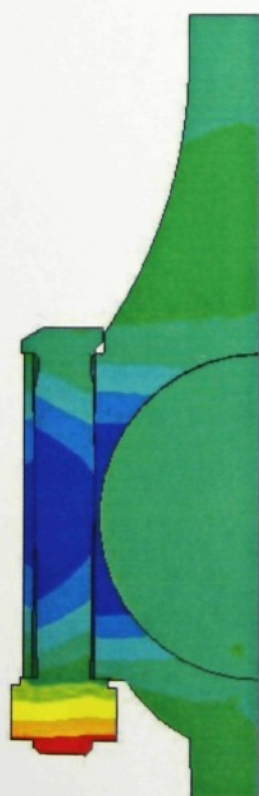
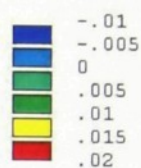
Posuv ve směru osy x [mm]



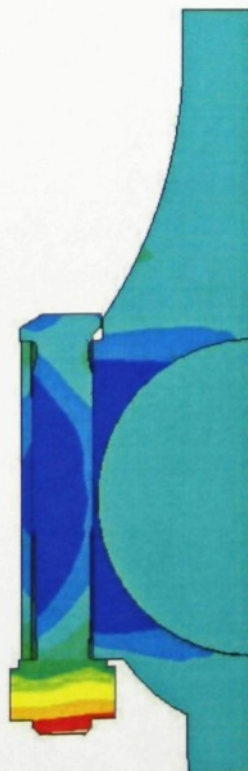
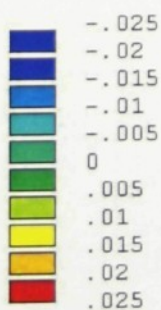
Obr.19



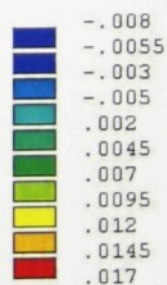
Obr.20



Obr.21



Obr.22





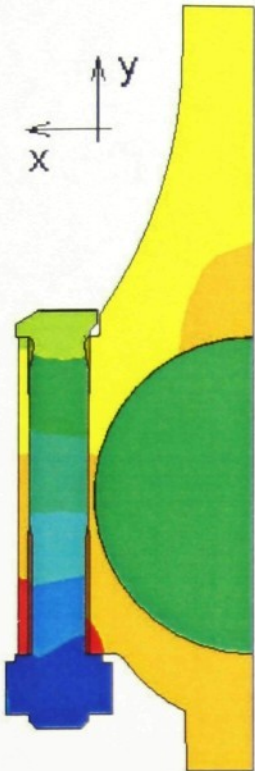
Na obrázcích je možné sledovat vzájemné deformace (natáčení dotykových ploch) šroubu a ojnice (podložky). Již při předpětí dochází k ohybu šroubu, jak již bylo předpokládáno v kap. 1.1. Je tak potvrzena správnost výběru místa pro upevnění tenzometrů pro měření největších podélných deformací v celém průřezu šroubu. Ten je podle očekávání ohýbán nejvíce při tahovém zatížení. Naopak nejmenší průhyb nastává při menším tlakovém zatížení (obr.22). Avšak i v tomto případě (i ve všech ostatních) je šroub namáhán ohybovým momentem shodného smyslu jako při předpětí. Z obrázků je dále zřejmé, že část dříku šroubu ve víku ojnice se ohýbá více než část dříku v samotné ojnici. Příčinou je samozřejmě skutečnost, že tato část dříku má menší průměr. Menší ohyb části dříku v samotné ojnici je zřejmě ovlivněn i jeho nalisováním, které částečně brání ohybovým deformacím.

Tabulka udává přibližné hodnoty rozdílů posuvů části dříku v místě dělicí roviny a části dříku v blízkosti matice.

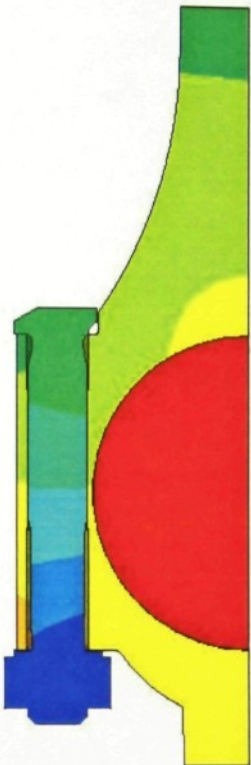
| zatěžující případ $i$ | rozdíl posuvů [ $\mu\text{m}$ ] |
|-----------------------|---------------------------------|
| 0                     | 7,5                             |
| 1                     | 10                              |
| 2                     | 25                              |
| 3                     | 7,5                             |

V kap. 1.1 bylo předpokládáno, že při tlakovém zatížení se bude křivost prutu (viz. kap. 2.2) zmenšovat, protože na něj tlakově působí zatěžující čep. Avšak díky masivním žebrům dříku ojnice (např. obr.17) dochází k přenosu tlakové síly i na ty části ojnice, které jsou označovány jako podložky. Podle obr.24 se podložky ve směru  $y$  posouvají více, než část ojnice, která se dotýká zatěžujícího čepu. Oproti očekávání je tedy průhyb šroubu při předpětí menší, než při větším tlakovém zatížení ( $i=1$ ).

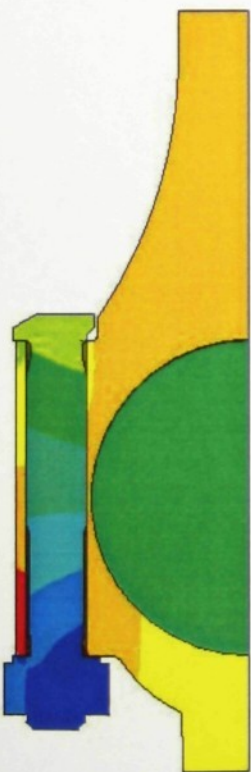
Posuv ve směru osy y [mm]



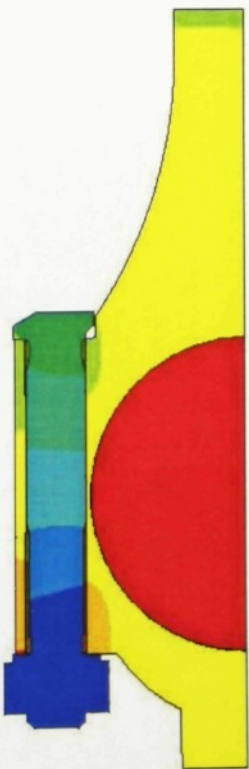
Obr.23



Obr.24



Obr.25



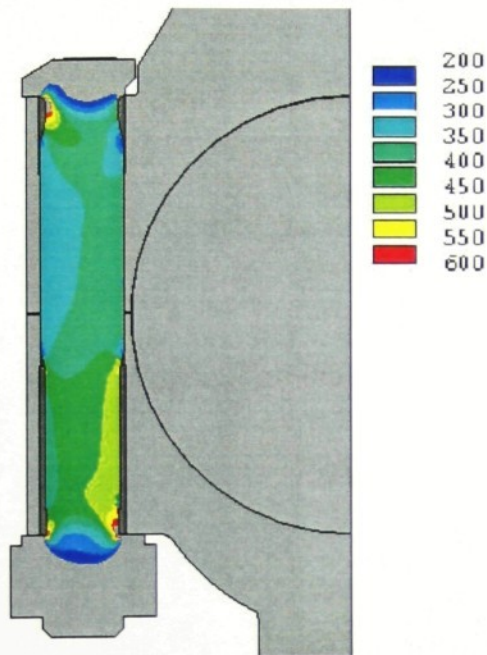
Obr.26



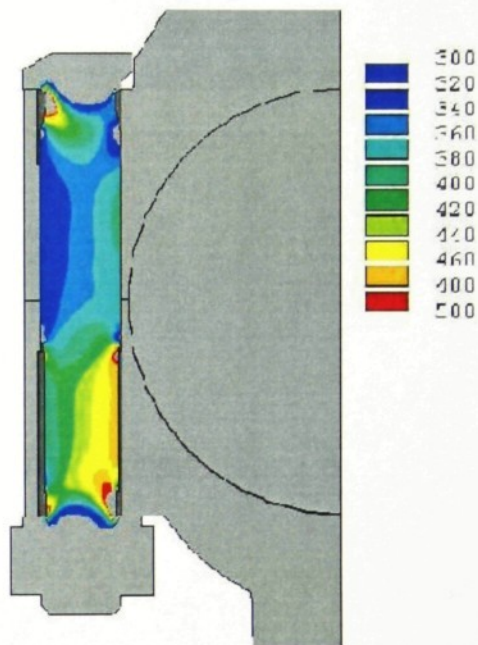
Deformace v podélném směru jsou řádově vyšší než v předchozím případě. Obrázek 23 opět ukazuje, že při předpětí šroubu dojde k deformaci hlavy ojnice a tím i k posunu roviny D (obr.17) o přibližně 0,03 mm. Dostatečně přesné odečtení hodnot podélných deformací šroubu není při tomto rozsahu dost dobře možné. Lze spíše sledovat pohyb celého šroubu vzhledem ke klikovému čepu při jednotlivých zatíženích.

Obrázek 23 předepnutého modelu dokazuje, že vnější část podložky je stlačována více než její vnitřní část, jak bylo očekáváno v kap. 1.1.

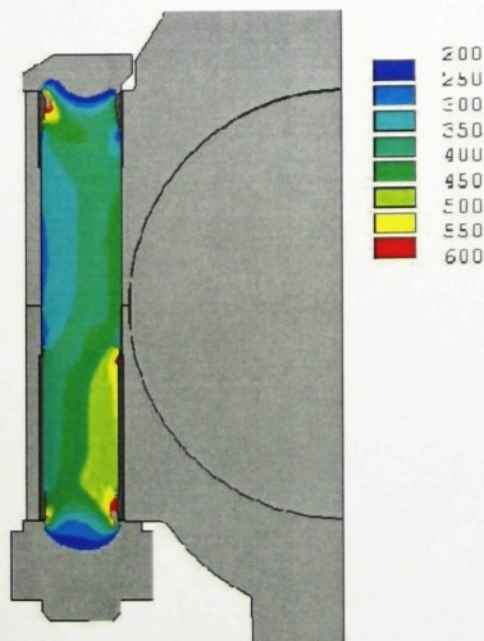
Napětí ve šroubu ve směru osy y [MPa]



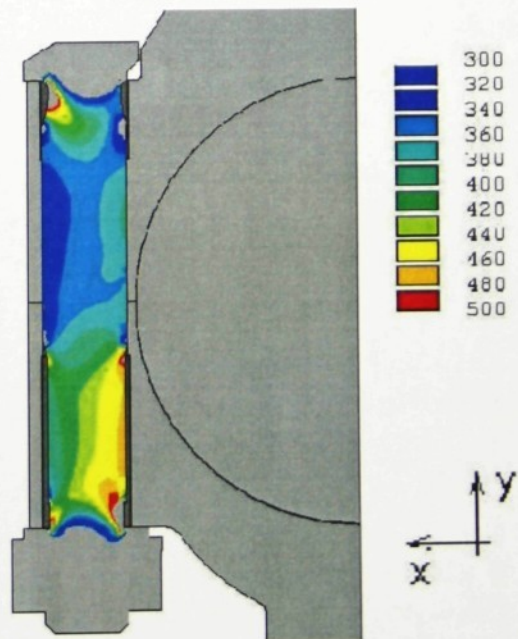
Obr.27



Obr.28



Obr.29



Obr.30



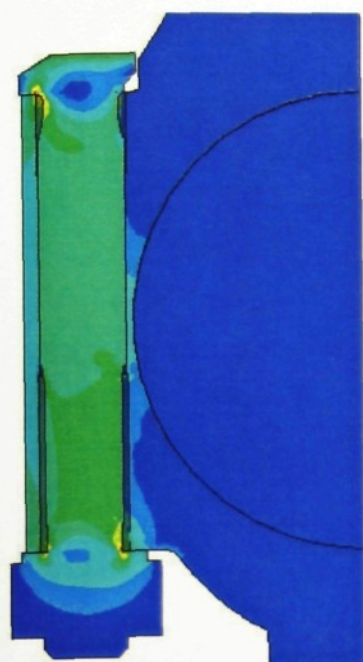
Pro zobrazení tohoto napětí byl jeho rozsah zvolen tak, aby pokrýval celý dřík šroubu. S využitím těchto výsledků byly získány hodnoty napětí v místě dělicí roviny, které jsou požadovány v zadání diplomové práce. Díky ohybu šroubu má podélné napětí vždy největší velikost ve vláknech, které je nejbližší od klikového čepu.

Tabulka udává hodnoty největšího podélného napětí v místě dělicí roviny.

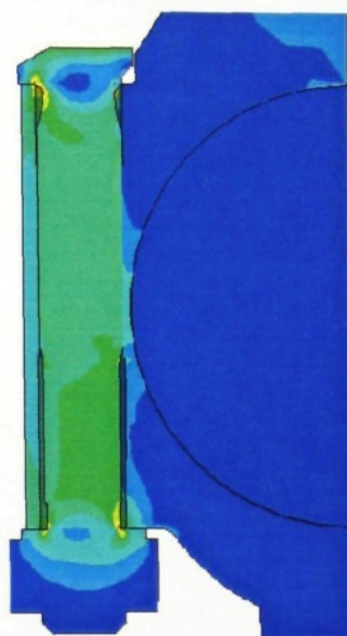
| zatěžující případ $i$ | $\sigma_i$ [MPa] |
|-----------------------|------------------|
| 0                     | 375              |
| 1                     | 385              |
| 2                     | 425              |
| 3                     | 370              |

Největší napětí 425 MPa bylo podle očekávání odečteno při tahovém zatížení. Na obrázcích je možné dobře sledovat proměnlivost podélného napětí při změně průřezu šroubu v jednotlivých zatěžujících případech.

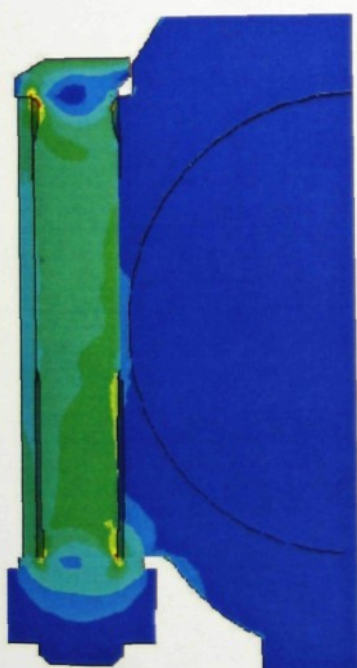
Napětí ve šroubu podle Misesovy hypotézy [MPa]



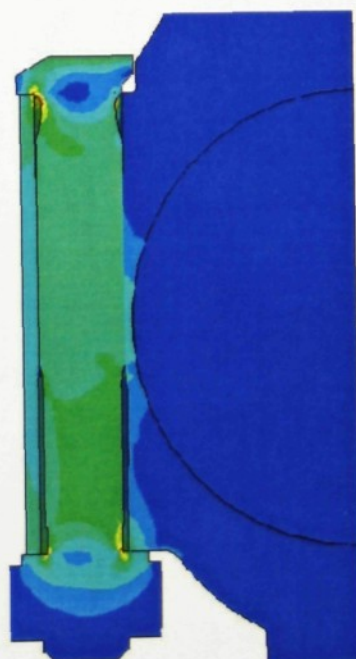
Obr.31



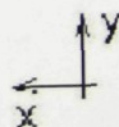
Obr.32



Obr.33



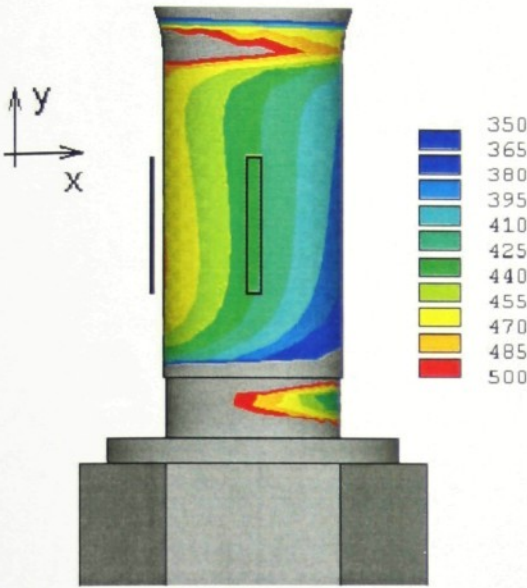
Obr.34



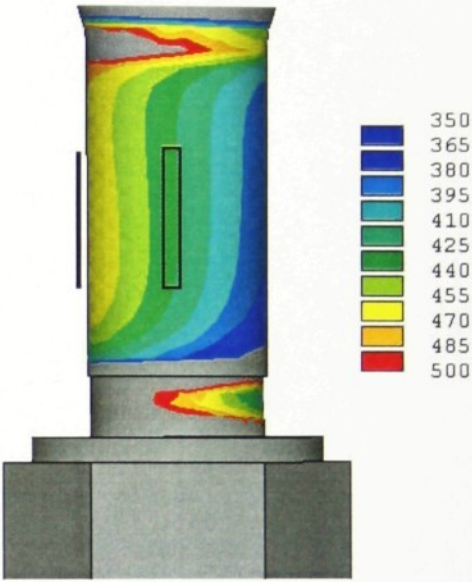


Pro určení nejvíce namáhaných míst ve šroubu je využito výsledků napětí podle Misesovy hypotézy. Proto byl zvolen rozsah, který pokrývá celý šroub. Především napjatost v okolí matice a hlavy šroubu již nelze dobře popsat pomocí napětí v podélném směru, protože v těchto místech dochází ke zhušťování napětí. Při tomto rozsahu jsou obrázky výsledků dosti podobné, ale lze opět říci, že dřík šroubu je nejvíce namáhán při tahovém zatížení. Největší hodnoty napětí ve šroubu jsou v místě pod jeho hlavou a v místě dotyku šroubu s prvním závitem matice, kde má velikost přibližně 800 MPa. Určení těchto nejvíce zatížených míst potvrzují i praktické zkušenosti. Dojde-li totiž k porušení ojnicního šroubu, děje se tak únavovým lomem právě v místě dotyku šroubu s prvním závitem matice.

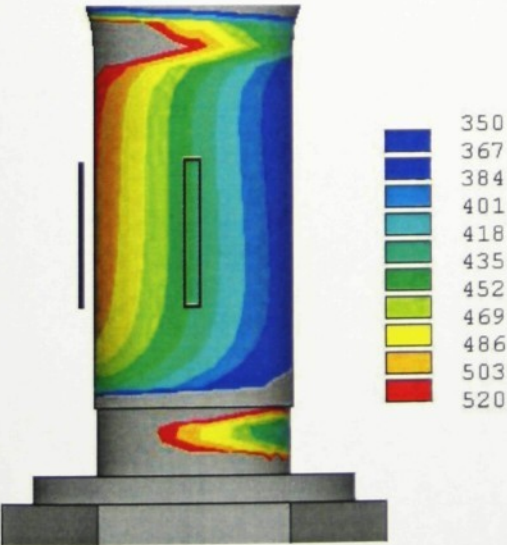
Napětí ve šroubu ve směru osy y v měřeném místě [MPa]



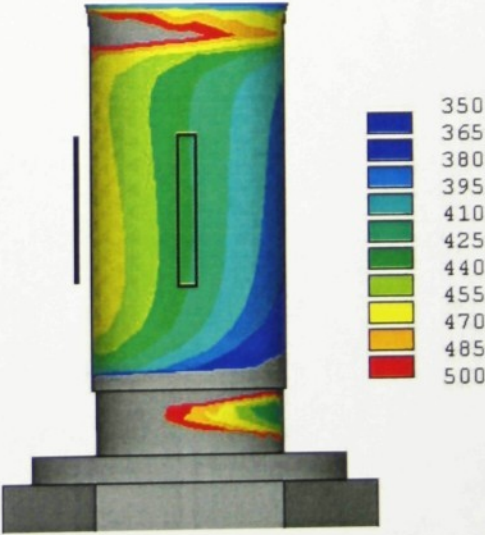
Obr.35



Obr.36



Obr.37



Obr.38



Aby mohly být porovnány výsledky měření a MKP, jsou uvedeny také výsledky podélného napětí s větším rozlišením. Rozsah byl zvolen tak, aby byla zobrazena právě jen ta část dřívku, kde jsou upevněny tenzometry. Tato místa jsou na obrázcích vyznačena.

Tabulka udává hodnoty napětí v místech upevněných tenzometrů, pro všechny zatěžující případy.

| zatěžující případ $i$ | tahové napětí [MPa] | největší napětí [MPa] |
|-----------------------|---------------------|-----------------------|
| 0                     | 430                 | 465                   |
| 1                     | 428                 | 465                   |
| 2                     | 435                 | 495                   |
| 3                     | 426                 | 465                   |

Největší hodnotu napětí o velikosti 495 MPa lze opět nalézt při tahovém zatížení. Při tlakových zatíženích ( $i=1, 3$ ) byly odečteny stejné velikosti napětí, což může být způsobeno výše popsanou deformací prstence samotné ojnice, která (oproti předpětí) ohybově namáhá více část dřívku šroubu patřící samotné ojnici.

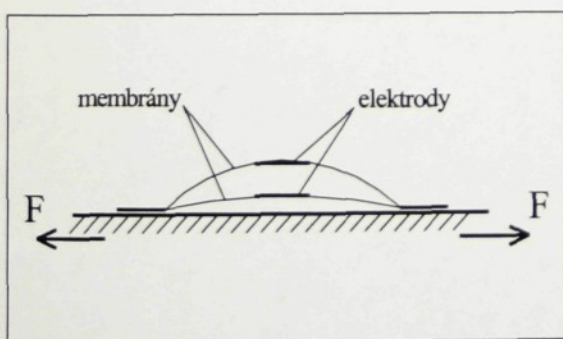
## 4 Experimentální ověření výsledků

### 4.1 Volba způsobu měření napětí

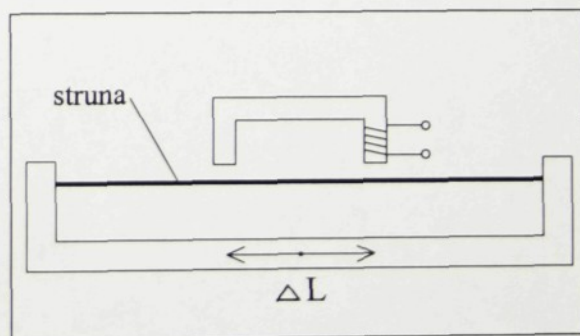
Přímé měření mechanického napětí prakticky není možné. Avšak podle Hookova zákona je závislé na deformaci, kterou lze měřit mnoha způsoby. Výběr z metod jejího měření je omezen skutečností, že měřený povrch není přístupný a také prostor pro senzor je relativně malý (štěrbina má tloušťku přibližně 0,5mm). Za těchto podmínek lze prakticky měřit pouze pomocí tenzometrů. Nejpoužívanější typy tenzometrů jsou:

- Kapacitní tenzometrické senzory - pracují na principu změny napětí při změně vzdálenosti elektrod. Elektrody mohou být např. umístěny na dvou membránách, které jsou upevněny na měřený povrch (obr.39). Jeho deformací pak dochází k vzájemnému pohybu elektrod.
- Strunové tenzometry - principem měření je závislost vlastní frekvence struny na síle, která ji napíná. Oba konce struny jsou upevněny na měřený povrch (obr.40). Struna je buzena proudovým impulsem a následně je měřena její odezva, potažmo její vlastní frekvence. Tento tenzometr se používá pouze pro měření velkých objektů.
- Senzory s metastabilními magnetickými slitinami - principem je závislost feromagnetických parametrů na mechanickém napětí.
- Odporové tenzometry - viz. níže.

S ohledem na výše uvedené podmínky měření a možnosti HDL v Liberci byl vybrán odporový tenzometr.



Obr.39 - kapacitní tenzometr



Obr.40 - strunový tenzometr

### 4.2 Měření odporovými tenzometry

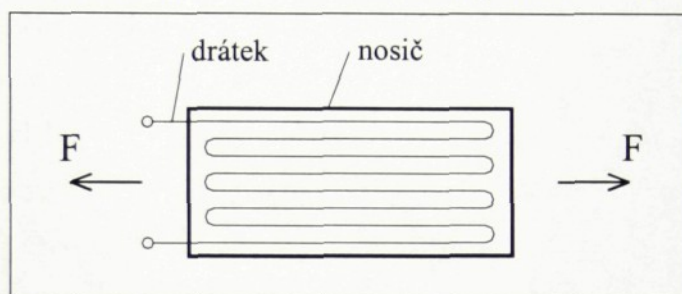
Princip měření lze dobře popsat na drátkovém, kovovém tenzometru. Je tvořen nosičem, na kterém je přilepen drátek (obr.41). Tenzometr je pevně přilepen na měřený povrch a orientován do směru, ve kterém chceme měřit deformaci. Při deformaci měřeného povrchu



mění drátek svou délkou a tedy i svůj průřez. Odpor drátu o délce  $L_D$ , ploše průřezu  $S_D$  a rezistivitě  $\rho$  je vyjádřen vztahem

$$R = \frac{L_D}{S_D} \cdot \rho.$$

Při natahování drátku tedy jeho odpor roste a naopak. Deformace tenzometru zapojeného do vhodného el. obvodu se pak projeví změnou úbytku el. napětí na tenzometru.



Obr.41 - drátkový tenzometr

Vlastnosti odporových tenzometrů se liší především v závislosti na materiálu, ze kterého jsou vyrobeny. Používají se kovové tenzometry a polovodičové. Kovové lze dále podle konstrukčního provedení rozdělit na drátkové, foliové a vrstevné. Výhodou kovových tenzometrů je lineární závislost změny odporu na deformaci. Pro získání průběhu mechanického napětí pak stačí vynásobit naměřený signál (el. napětí) konstantou. Výhodou polovodičových je až o dva řády větší citlivost. Tu vyjadřuje konstanta tenzometru

$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon},$$

která má pro polovodičový hodnotu např.  $K = 100$  a pro kovový vždy přibližně  $K = 2$ .

Pro větší citlivost byl zvolen polovodičový tenzometr. Závislost jeho odporu na deformaci (poměrném prodloužení  $\varepsilon$ ) je u něho výrazně nelineární. Podle [7] platí

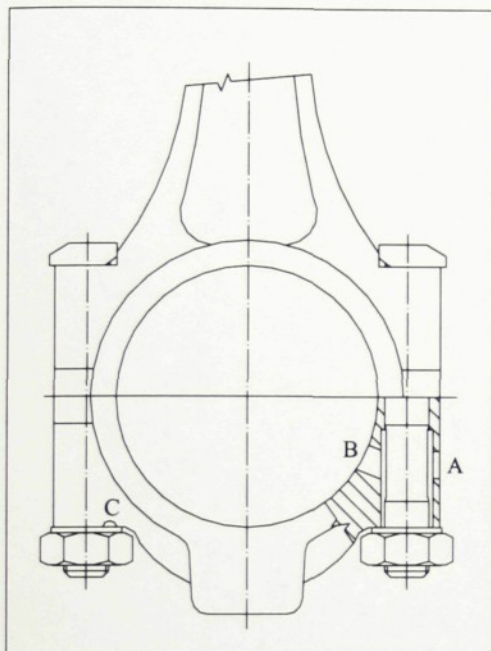
$$\frac{\Delta R}{R} = C_1 \cdot \varepsilon + C_2 \cdot \varepsilon^2 + C_3 \cdot \varepsilon^3 + \dots,$$

přičemž z řady na pravé straně rovnice se zpravidla uvažují jen první dva členy.

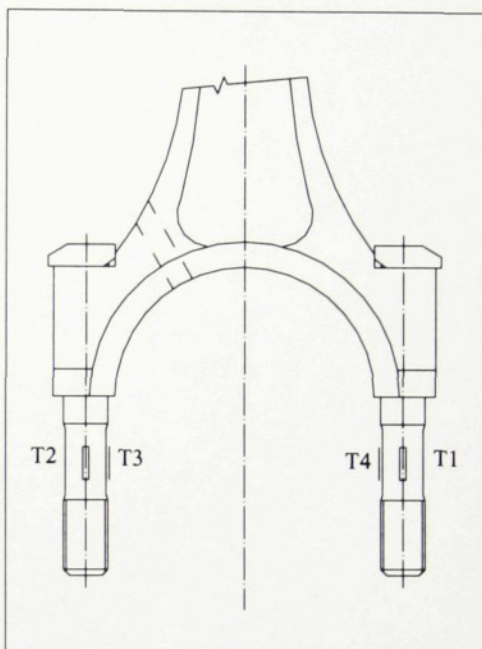
### 4.3 Instalace tenzometrů

V prvé řadě bylo třeba rozhodnout, jakým způsobem budou vyvedeny vodiče tenzometrů z uzavřeného prostoru. Jedním ze způsobů je vyvrtání otvoru do víka ojnice v místě A nebo B podle obr.42. Tato varianta byla zavrhnuta hned z několika důvodů. Jednak by otvor musel

mít průměr přibližně 5mm, aby jím vůbec mohly být protaženy vodiče. Taková úprava by ale mohla významně ovlivnit tuhost podložky. Ale hlavním důvodem je obtížná montáž. Vyvedení vodičů otvorem při nasazování hlavy ojnice bez jejich poškození je velmi nepravděpodobné. Vodiče tenzometrů jsou totiž poměrně křehké a snadno dojde k jejich zlomení.



Obr.42 - úprava ojnice pro vodiče tenzometrů

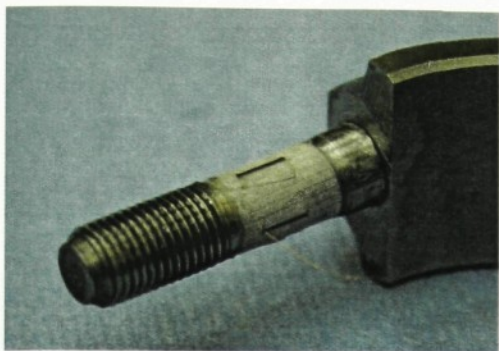


Obr.43 - umístění tenzometrů

Další možností je vyvedení vodičů pod maticí přiměřeně velkou drážkou na víku ojnice (místo C na obr.42, obr.46). Tato varianta už umožňuje smontovatelnost a je tedy použita v této diplomové práci. Při tomto konstrukčním uspořádání je možné měřit jeden šroub nejvíce dvěma tenzometry, protože jejich vodiče se nesmí dotýkat.

Na každý šroub byl nalepen jeden tenzometr, který leží v neutrální rovině ohybu a měří tedy pouze deformace způsobené tahem (T1, T2). Druhý je přilepen na obou šroubech v místě nejbližším od klikového čepu (obr.44). Měří tedy největší podélné deformace z celého průřezu šroubu viz. kap. 1.1 (T3,T4).





Obr.44 - přilepené tenzometry

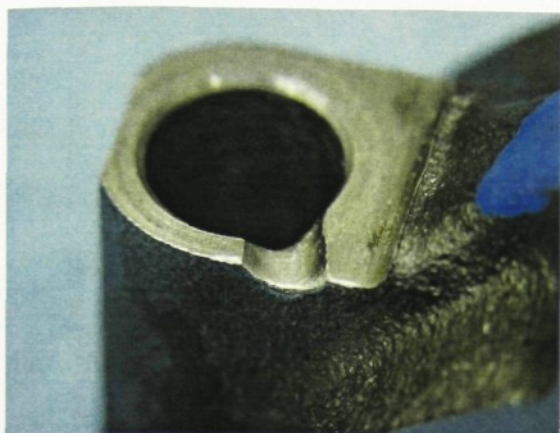


Obr.45 - upevněné vodiče tenzometrů

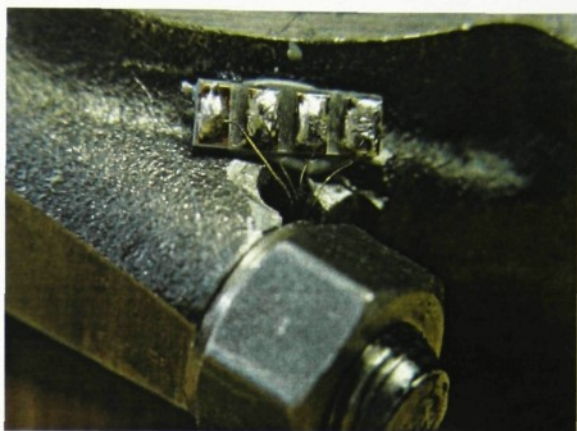
Samotná instalace tenzometrů na povrch měřené součásti vyžaduje zkušenosti a velkou pečlivost. Tenzometr se vždy uchopuje pouze pinzetou, protože už pouhý dotyk rukou ho znehodnocuje. Postup byl následující. Povrch šroubu v místě měření byl nejprve vyleštěn velmi jemným smirkovým papírem a poté odmaštěn technickým benzinem. Na šroub byl nalepen cigaretový papírek a na něj posléze i tenzometr (obr.44). Úlohou cigaretového papírku je elektricky izolovat tenzometr od šroubu. Jako izolace se obvykle používají laky nebo nátěry, avšak v praxi se stává, že první izolační nátěr je rozpuštěn nátěrem lepidla pro uchycení tenzometru. Pak může dojít ke kontaktu s měřeným povrchem. Měření s použitím cigaretového papírku se v HDL v Liberci osvědčilo a jeho použití by tedy nemělo mít významný vliv na přesnost měření. Pro izolování vodičů tenzometrů byly dřív šroubu a díra ojnice natřeny barvou Hammerite. Dále bylo třeba zajistit, aby při nasazení víka ojnice nebyly vodiče poškozeny. Byly proto zapuštěny do druhého nátěru šroubu (obr.45). Po montáži víka byla na ojnici přilepena svorkovnice a na ní naletovány vodiče tenzometrů (obr.47). Jednotlivé kroky lze provádět až po zaschnutí předchozího nátěru. Instalace proto bývá dokončena většinou po několika dnech, v tomto případě po týdnu.

Celá příprava experimentu se podařila až na druhý pokus. Drážka pro vyvedení vodičů nebyla dostatečně hluboká (obr.46) a proto se nepodařilo připájet vodiče ke svorkovnici. Po zvětšení drážky (obr.47) se již připájení podařilo.





Obr.46 - původní drážka



Obr.47 - drážka po prohloubení

Pro měření byly použity polovodičové tenzometry AP120-6-12, které jsou nejcitlivější z běžně používaných v HDL v Liberci. Cigaretový papírek i tenzometry byly přilepeny lepidlem Cyanofix od firmy Soudal.

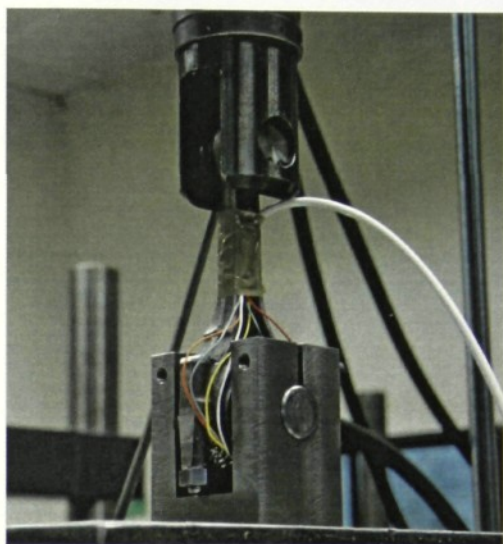
#### 4.4 Měření na trhacím stroji

Zatěžující síla byla v ojnici vyvozena trhacím strojem INOVA FU250. Pohyb jeho pístu je řízen počítačem nebo ručně (tzn. tlačítkem). Řídící veličinou může být síla nebo posuv, v tomto případě byla přirozeně zvolena síla. Poloha byla měřena snímačem polohy LVDT, který je součástí trhačky. Pro měření síly byl do zatěžovaného řetězce součástí (nad horní vidlici) přidán siloměr GTM 50kN (obr.50), který je cejchovaný Českým metrologickým institutem. Ojnice je v trhacím stroji uchycena tak, aby mohlo být co nejděleji napodobováno namáhání ojnice při pracovním režimu spalovacího motoru. Uchycení bylo tedy provedeno pomocí dvou vidlic, přičemž na ose dolní vidlice byl nasazen zatěžující čep (obr.48). Mimo něj byly všechny použité součásti k dispozici z jiných experimentů, a nebylo je tedy třeba vyrobit.

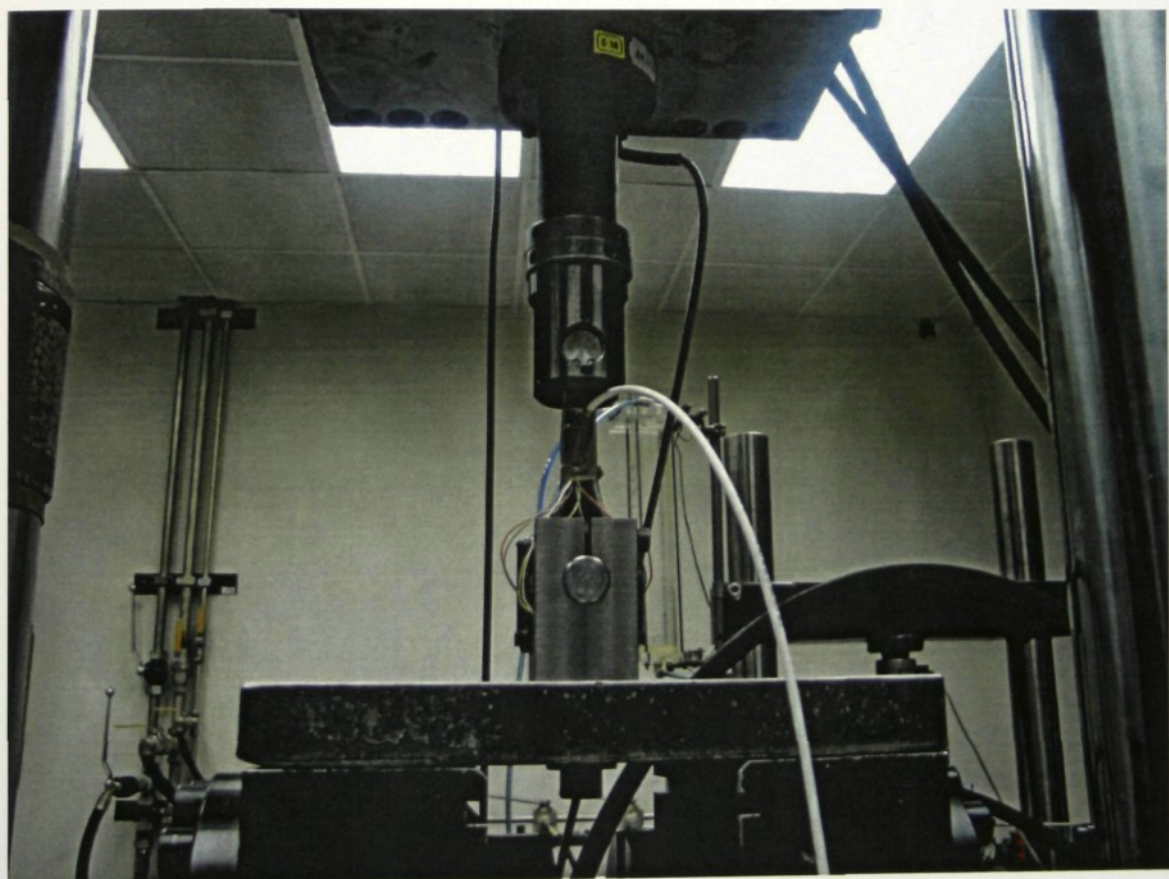




Obr.48 - zatěžující čep



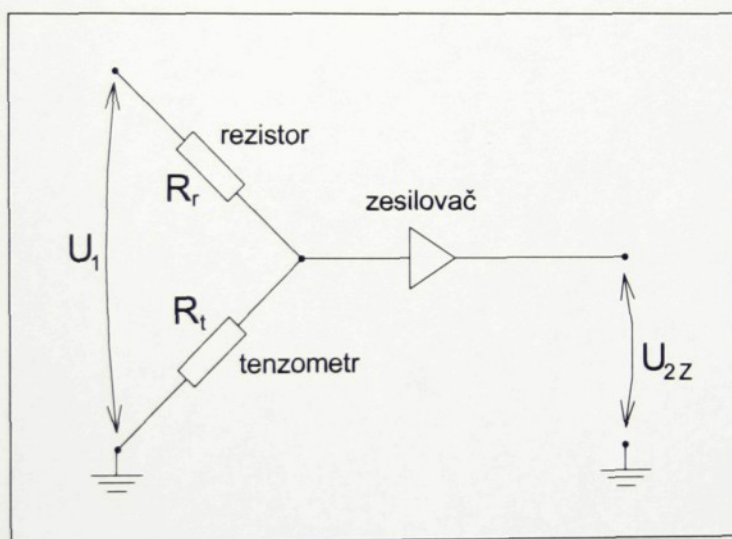
Obr.49 - uchycení ojnice



Obr.50 - uchycení ojnice v trhacím stroji

#### 4.5 Výpočet mechanického napětí z elektrického signálu

Při měření byly zaznamenány signály snímače polohy, siloměru a napětí tenzometrů. Počítačový program tedy přímo zapisuje hodnoty síly [N] a polohy [mm], ale mechanické napětí je nutné vypočítat z elektrického napětí na tenzometrech. Elektrické zapojení tenzometrů lze pro názornost zjednodušit podle schématu (obr.51). Obvod pro každý tenzometr je zapojen jako dělič napětí. Skládá se z rezistoru o odporu  $R_r$ , tenzometru o odporu  $R_t$  a zesilovače o zesílení  $z$ . Obvod je napájen napětím  $U_1$  a výstupem je měřené zesílené napětí  $U_{2z}$ . Elektrický obvod není tepelně kompenzován, protože měřené součásti se před měřením i při něm nacházely v místnosti o stálé teplotě.



Obr.51 - Elektrický obvod

Podle obr.51 platí

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{R_t}{R_t + R_r} \quad \text{přičemž} \quad U_2 = \frac{U_{2z}}{z}.$$

Z tohoto vzorce je vyjádřen odpor tenzometru vztahem

$$R_t = R_r \cdot \frac{U_2}{U_1 - U_2}.$$

Nezatížený tenzometr má odpor  $R_{t0}$ , takže změna odporu zatíženého tenzometru  $\Delta R_t$  je

$$\Delta R_t = R_t - R_{t0}.$$

Podle vztahu pro polovodičové tenzometry (kap.4.2) lze poměrné prodloužení  $\varepsilon$  vypočítat z kvadratické rovnice



$$\frac{\Delta R_t}{R_t} = C_1 \cdot \varepsilon + C_2 \cdot \varepsilon^2,$$

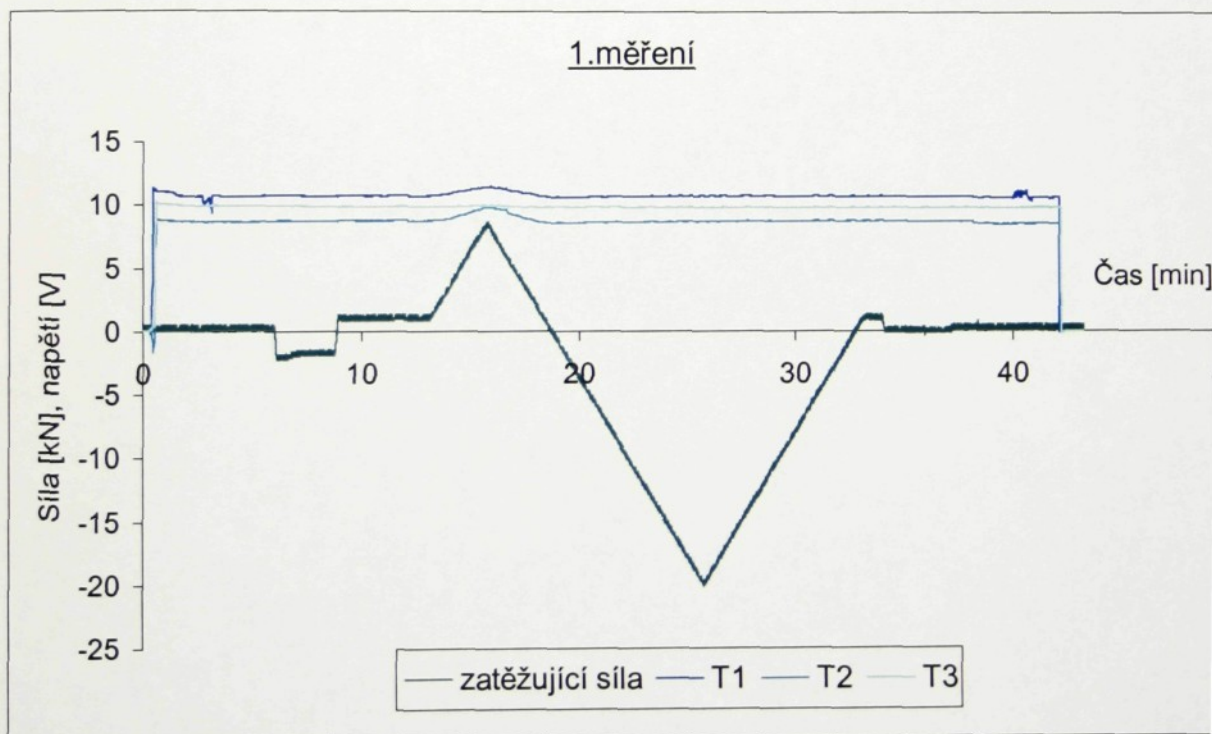
neboť konstanty  $C_1$  a  $C_2$  udává výrobce tenzometrů.

Mechanické napětí je následně získáno z Hookova vztahu

$$\sigma = E \cdot \varepsilon.$$

Skutečný obvod je samozřejmě složitější, především za účelem snížení šumu měřených elektrických signálů.

Nedopatřením se bohužel stalo, že zatěžující čep byl vyroben s průměrem 48mm namísto požadovaného průměru 47,9mm. Měření se proto muselo opakovat. Naměřené průběhy signálů prvního měření (s čepem většího průměru) jsou uvedeny také a je na nich popsán průběh měření.



1. signály začaly být snímány ještě před utažením matic (tenzometry byly nezatížené)
2. matice byly utaženy, čily ve šroubech vzniklo předpětí
3. trhačka začala působit menší silou (-2kN), aby mohla být zapojena silová zpětná vazba
4. ukončení přípravy měření

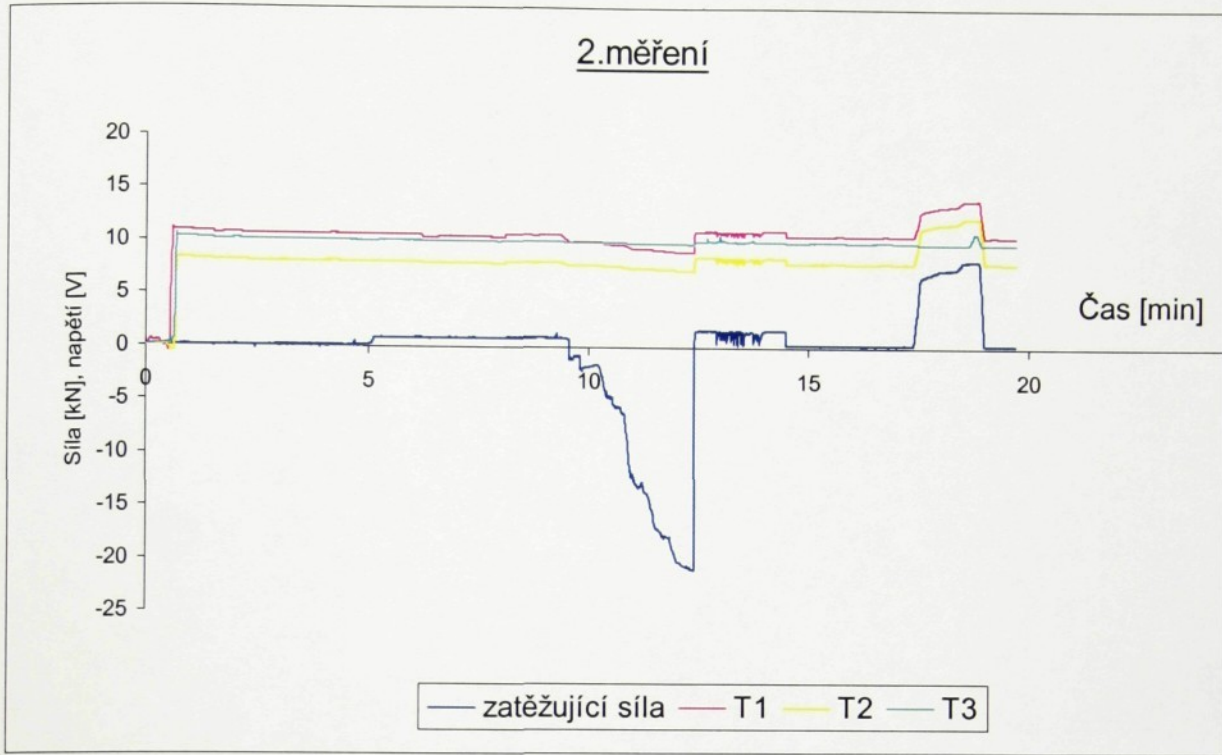
5. trhačka začala působit silou podle přednastaveného trojúhelníkového průběhu síly, aby bylo dosaženo obou extrémních hodnot podle kap. 1.3
6. ojnice byla vyňata z trhačky a byly povoleny šrouby

Postup a záznam prvního měření jsou uváděny hlavně proto, aby dokumentovaly stejné hodnoty napětí tenzometrů před a po měření. Často se totiž stává, že se tato napětí liší. Bývá to způsobeno teplotními změnami v průběhu měření, vznikem nevratných přetvoření v měřených součástech, změnou polohy jednotlivých součástí v průběhu měření (součásti na sebe jinak "dosednou"), apod.. Před začátkem měření byly tenzometry napájeny po dobu několika desítek minut el. proudem, aby se zahřály na provozní teplotu. Shoda hodnot napětí před a po měření dokazuje, že při měření zřejmě nedošlo k významné změně teploty tenzometrů (nevznikla chyba měření vlivem změny teploty), neboť polovodičové tenzometry reagují (mění svůj odpor) na změnu teploty poměrně citlivě.

Při prvním měření tahového zatížení snímaly tenzometry menší deformace než při druhém, a při tlakovém zatížení nesnímaly prakticky žádné. Bylo to samozřejmě způsobeno skutečností, že zatěžující čep uložený bez vůle bránil deformaci hlavy ojnice.

Pro druhé měření již byl průměr zatěžujícího čepu snížen na hodnotu 47,9 mm. Čep byl nyní v ojnici uložen s vůlí. Z toho důvodu nebyla síla řízena počítačem, neboť nemohla být zapojena silová zpětná vazba. Při jejím použití by mohlo dojít k rozkmitání čelistí trhačky a poškození ojnice. Síla byla proto nastavována ručně, což dokazuje průběh signálů druhého měření. Po vyjmutí ojnice z trhačky došlo k dotyku vodičů tenzometrů (zkratu), a nemohly být proto porovnány hodnoty napětí před a po měření.





Při požadovaných hodnotách zatěžující síly byly zjištěny příslušné hodnoty napětí tenzometrů  $U_{2z}$ . Pro zvýšení citlivosti byla přirozeně nastavena nulová hodnota tohoto napětí až při napájení obvodu napětím  $U_1$ , a proto je nutné přičíst k  $U_{2z}$  ještě napětí nezátížených tenzometrů

$$U_{20} = U_1 \cdot \frac{R_{t0}}{R_{t0} + R_r} = 2,5 \cdot \frac{119,6}{119,6 + 120} = 1,248 \text{ V.}$$

Vstupní hodnoty pro výpočet jsou

$$U_1 = 2,5 \text{ V, } z = 100, R_r = 120\Omega, R_{t0} = 119,6\Omega, C_1 = 124,2, C_2 = 4530.$$

Tabulka udává hodnoty napětí při předepsaných zatěžujících případech a při předpětí. Tenzometr T4 byl při montáži poškozen a proto není uveden v tabulce.

| zatěžující<br>případ $i$ | T1           |                     | T2           |                     | T3           |                     |
|--------------------------|--------------|---------------------|--------------|---------------------|--------------|---------------------|
|                          | $U_{2z}$ [V] | $\sigma_{Ti}$ [MPa] | $U_{2z}$ [V] | $\sigma_{Ti}$ [MPa] | $U_{2z}$ [V] | $\sigma_{Ti}$ [MPa] |
| 0                        | 10,83        | 330                 | 8,22         | 254                 | 10,04        | 307                 |
| 1                        | 8,88         | 273                 | 7,17         | 223                 | 9,64         | 295                 |
| 2                        | 13,36        | 405                 | 11,71        | 356                 | 10,48        | 320                 |
| 3                        | 9,82         | 300                 | 7,63         | 236                 | 9,81         | 300                 |

Ačkoli oba tenzometry T1 a T2 měřily podélné deformace v neutrální rovině ohybu, jsou hodnoty tenzometru T2 menší. Vysvětlením je patrně skutečnost, že T2 měřil prodloužení šroubu patřícího polovině ojnice, ve které je mazací díra kluzného ložiska (obr. 43). Šrouby mohly být též montovány s trochu odlišným utahovacím momentem, i když byl použit momentový klíč. Pro porovnání výsledků budou využity hodnoty napětí tenzometru T1, protože model mazací díru neobsahuje. Průběh 2.měření dokládá, že signál tenzometru T3 příliš nesledoval (oproti T1 a T2) křivku zatěžující síly při tahovém zatížení. Z toho lze usuzovat, že výsledky jeho měření nejsou příliš důvěryhodné a jeho hodnoty proto nebudou porovnány.

5 Porovnání výsledků

Výsledky MKP byly považovány za nej přesnější, a vůči nim jsou tedy porovnávány hodnoty analytického výpočtu i měření.

Hodnoty největšího napětí v místě dělicí roviny:

| zatěžující případ<br><i>i</i> | analytické řešení |              | MKP              |
|-------------------------------|-------------------|--------------|------------------|
|                               | $\sigma_i$ [MPa]  | odchylka [%] | $\sigma_i$ [MPa] |
| 0                             | 356               | -5,07        | 375              |
| 1                             | 381               | -1,04        | 385              |
| 2                             | 393               | -7,53        | 425              |
| 3                             | 361               | -2,43        | 370              |

Hodnoty napětí v místě tenzometrů ležících v neutrální rovině ohybu:

| zatěžující případ<br><i>i</i> | výsledky měření      |              | MKP                  |
|-------------------------------|----------------------|--------------|----------------------|
|                               | $\sigma_{\pi}$ [MPa] | odchylka [%] | $\sigma_{\pi}$ [MPa] |
| 0                             | 330                  | -23,26       | 430                  |
| 1                             | 273                  | -36,22       | 428                  |
| 2                             | 405                  | -6,9         | 435                  |
| 3                             | 300                  | -29,58       | 426                  |



Analytický výpočet má několik nedostatků:

- Vypočítaná hodnota síly předpětí závisí na volbě součinitelů tření, jejichž hodnoty lze pouze odhadnout
- Tuhost stlačované podložky nelze přesně zjistit, protože při jejím výpočtu lze obtížně zahrnout vliv vzájemné deformace se šroubem.
- Z důvodu náročnosti výpočtu deformace hlavy ojnice není uvažováno ohybové namáhání šroubu a jeho zatěžující účinky jsou nahrazeny tahovou silou.
- Tato síla ve šroubu zachycující ohybový moment v hlavě ojnice napjatost ve šroubu vždy zvětšuje. Analytický výpočet tedy nezvažuje smysl momentu, a tedy zda zvětšuje či zmenšuje křivost šroubu vzniklou předpětím.
- Neumožňuje zahrnout vliv nalisování části dříku, které má zřejmě vliv na jeho ohýbání.

Přes všechny nepřesnosti analytického výpočtu se jeho výsledky výborně shodují s výsledky MKP. Vzhledem k nedostatkům této metody nelze vyloučit, že jde pouze o náhodnou shodu. Při výpočtu napětí v celku ojnicního šroubu s ojnicí jiných tvarů by zřejmě podobnost výsledků nemusela být tak blízká.

Při porovnávání výsledků MKP a měření si čtenář může povšimnout jejich rozporu při tlakovém zatížení ojnice. Hodnoty napětí zjištěné MKP jsou pro předpětí a tlaková zatížení přibližně shodná, avšak průběh měření ukazuje, že při tlakovém zatížení dochází ke snižování hodnoty podélného napětí v měřeném místě. Příčinou může být příliš velké zjednodušení modelu MKP, který zanedbal zaoblení dříku ojnice a zaoblení mezi dříkem a hlavou ojnice. Touto úpravou tvaru byla snížena tuhost hlavy ojnice a také byl změněn poměr tuhostí žeber dříku ojnice vůči střední části průřezu dříku ve prospěch žeber. Model ojnice pro MKP pak více přenáší tlakovou sílu do podložek (křivost prstence se tedy zvětšuje) než do místa dotyku se zatěžujícím čepem, čímž je zvětšováno ohybové namáhání šroubu.

Ve skutečné ojnici se ale patrně, díky větší tuhosti její hlavy, přenáší tlaková síla především do dotykového místa se zatěžujícím čepem. Tlakové působení čepu pak křivost prutu zmenšuje, čímž se snižuje i ohybové namáhání šroubů vzniklé předpětím.

Rozdíl změřené hodnoty největšího napětí ( $T_1$ ) při větším tlakovém zatížení oproti předpětí je 57 MPa, což vzhledem k hodnotě předpětí je přibližně 17%. Lze předpokládat, že podobně byly ovlivněny i zjištěné hodnoty napětí při tahovém zatížení. Menší tuhost hlavy

ojnice patrně způsobila větší ohybové namáhání šroubů, a tedy získaný výsledek MKP je zřejmě vyšší než by byl u modelu ojnice se zaobleními.

Výsledky experimentálního měření mohou být zatíženy chybou z následujících příčin:

- Tenzometr není dokonale připevněn, a proto se může deformovat méně, než měřený povrch.
- Naměřené hodnoty elektrického napětí mohly být ovlivněny prvky elektrického obvodu. Např. již malá odchylka velikosti odporu rezistoru od jeho jmenovité hodnoty se výrazně projeví na výsledné hodnotě mechanického napětí.



## Závěr

V diplomové práci byly určeny napjatost a deformace ojničního šroubu při všech zadaných zatěžujících případech. Úloha byla vyřešena užitím metody konečných prvků, která podává přehled o napjatosti a deformacích ojničního šroubu. Získané výsledky byly ověřeny experimentálním měřením, které potvrdilo především výsledky při působení tahové zatěžující síly. Porovnání výsledků při tlakovém zatížení naznačilo, že hodnoty napětí určené MKP mohly být ovlivněny zjednodušeným tvarem ojnice. Nelze však říci, že výsledky diplomové práce tak byly znehodnoceny. Prokázalo se totiž, že šroub je nejvíce namáhán při tahovém zatížení, při němž se výsledky MKP poměrně dobře shodují se změřenými hodnotami napětí.

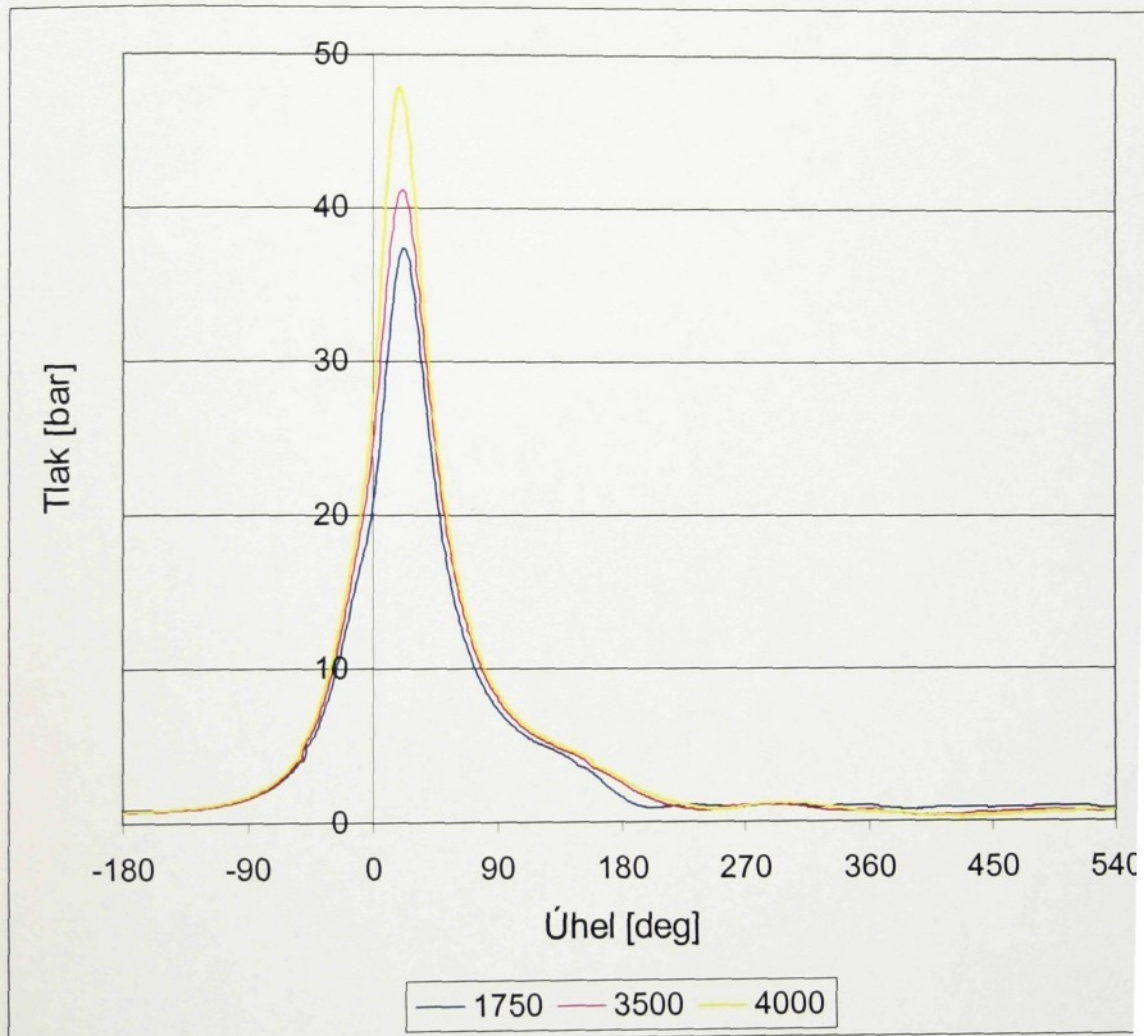
## Literatura

- [1] Hadrbolec J., Krejčíř O., Ulrych E.: Vybrané stati z částí strojových, učební texty vysokých škol, SNTL, Praha, 1963
- [2] Leinveber J., Řasa J., Vávra P.: Strojnické tabulky, Scientia, 1999
- [3] Honců J.: Vybrané statě z částí a mechanismů strojů, TU v Liberci, Liberec 2004
- [4] Bolek A., Kochman J. a kol.: Části strojů, Technický průvodce 6, 1.svazek, SNTL, Praha 1989
- [5] Kochman J.: Části strojů I, ČSAV, Praha 1959
- [6] Pešík L.: Části strojů, TU v Liberci, Liberec 2001
- [7] Miláček S.: Měření a vyhodnocování mechanických veličin, Vydavatelství ČVUT, Praha 2001
- [8] Ďaďo S., Kreidl M.: Senzory a měřicí obvody, Vydavatelství ČVUT, Praha 1996

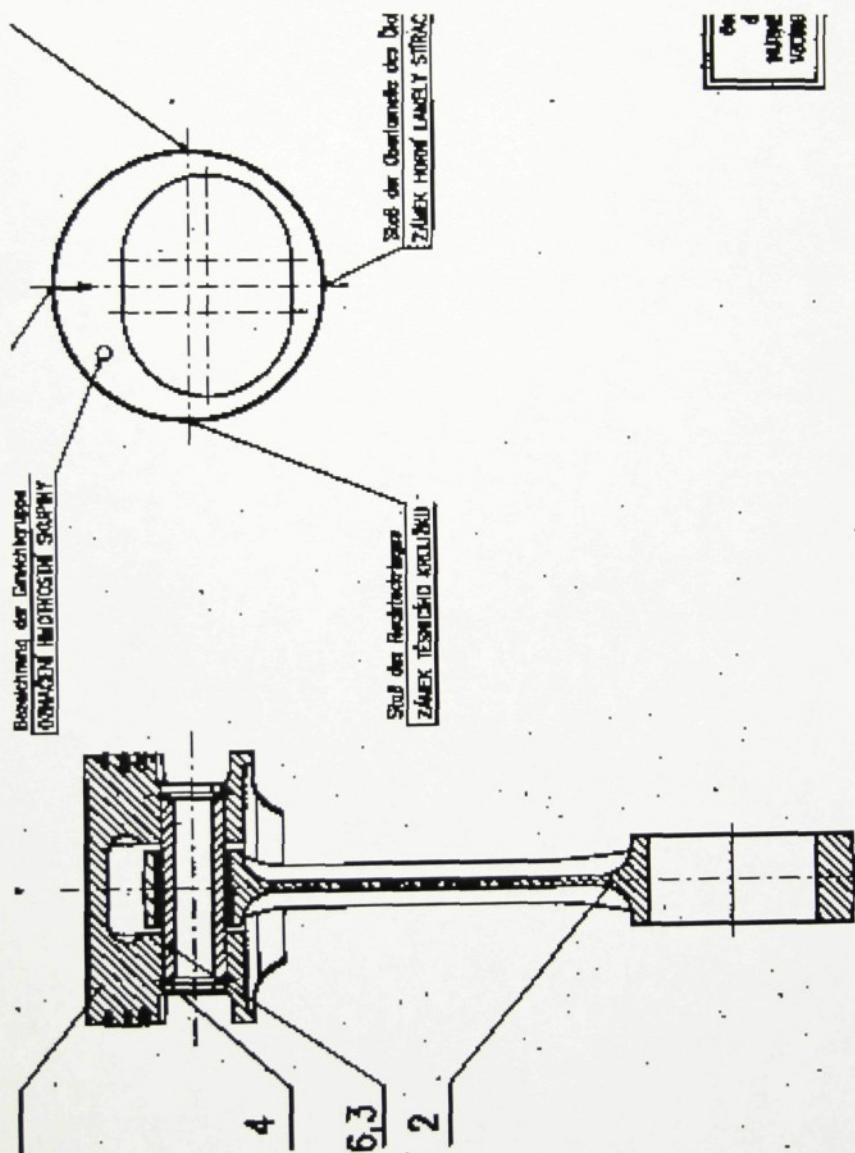


## Přílohy

### 1. příloha - rozvinutý indikátorový diagram

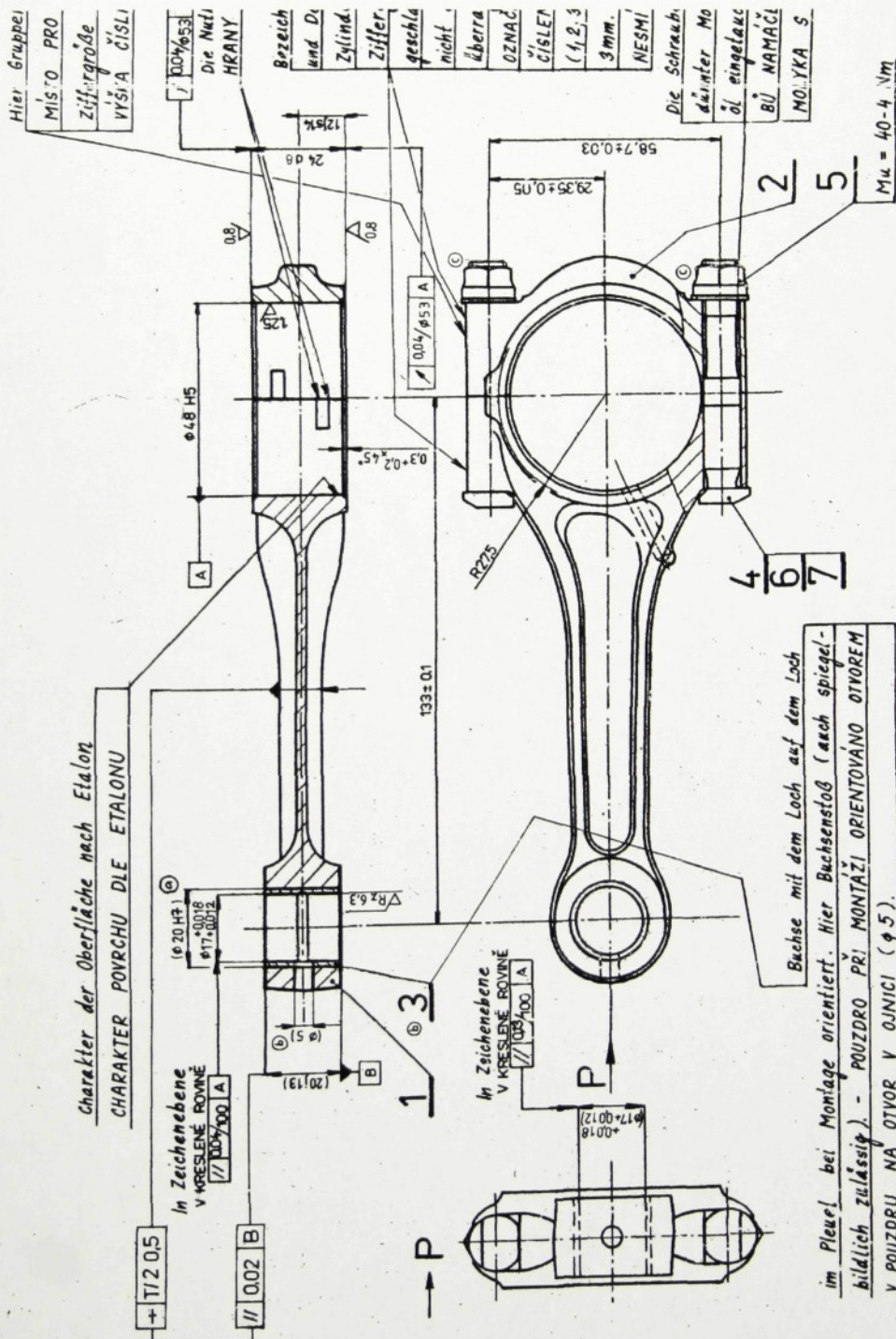


**2.příloha - výřez z výkresu sestavy úplného smontovaného pístu s pístním  
čepem a úplnou ojnicí**

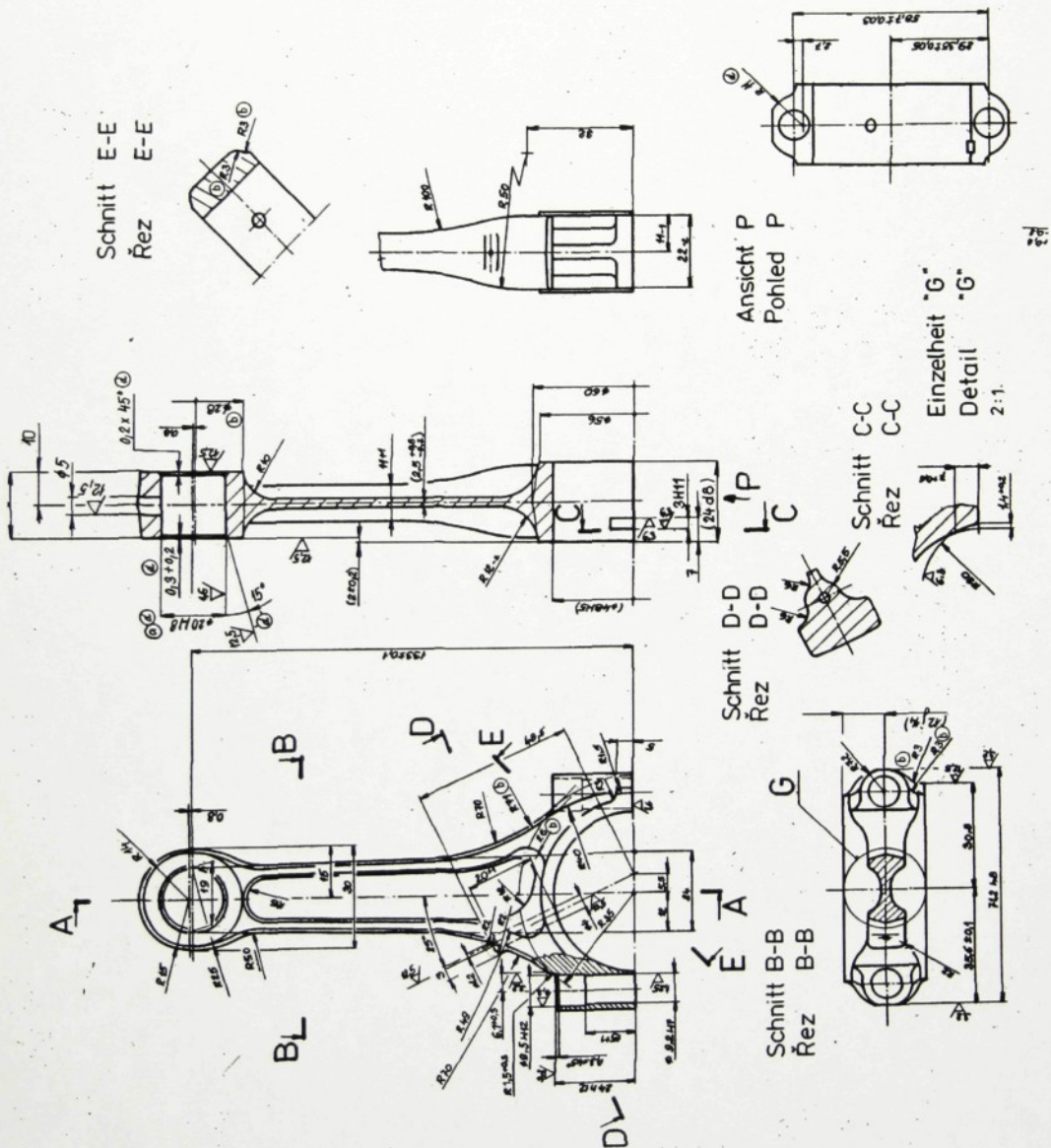




### 3.příloha – výřez z výkresu úplné ojnice



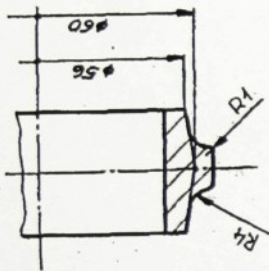
**4.příloha – výřez z výrobního výkresu ojnice**



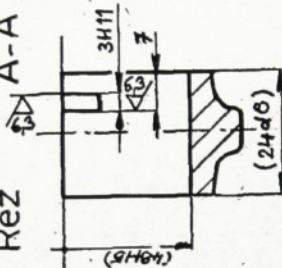


5.příloha – výřez z výrobního výkresu víka ojnice

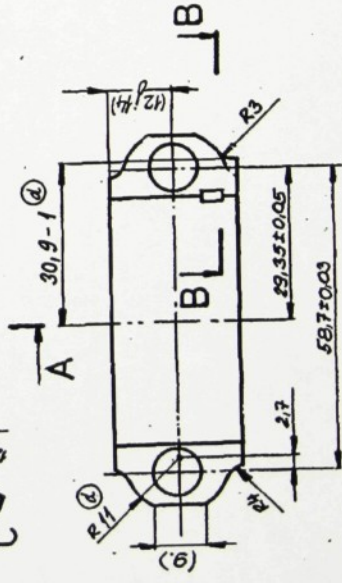
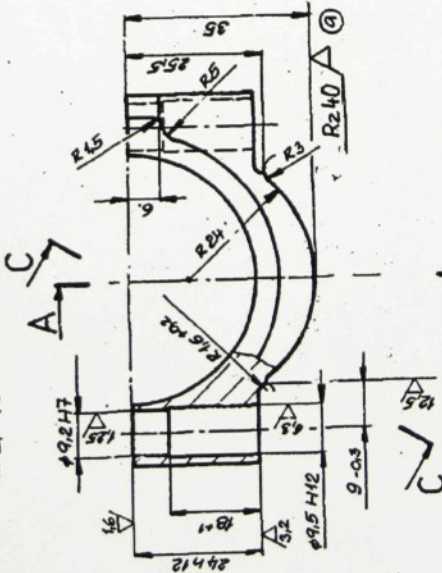
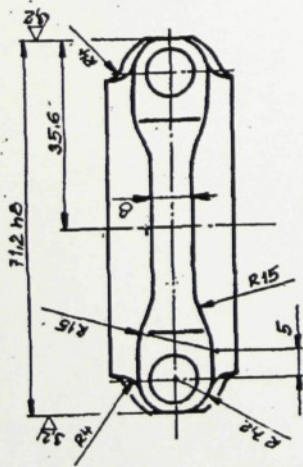
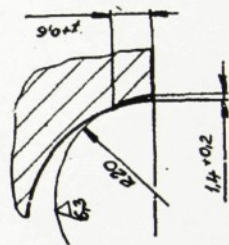
Řez C-C



Schnitt A-A  
Řez A-A



Schnitt B-B  
Řez B-B



druck für Verdrehsi  
m Pressen zulässig  
SK PRO POJIŠTĚNÍ  
OTI POOTOČENÍ PŘI  
OVÁNÍ PŘÍPUSTNÝ

|      |  |
|------|--|
| MIXI |  |
|------|--|

Platz für Bezeichnung des Herstellers

Schrift konkay

MÍSTO PRO OZNAČENÍ VÝROBCE

PLSMO VYDUŤE

