

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

## REALIZACE EDUKAČNÍ ÚLOHY NA EXPERIMENTÁLNÍ STANICI PRO MODELOVÁNÍ PŘEDEPJATÝCH ŠROUBOVÝCH SPOJŮ

REALIZATION OF EDUCATIONAL PROBLEM BASED ON PRELOADED BOLTED JOINT  
APPARATUS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. TOMÁŠ ŽABA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MICHAL VAVERKA, Ph.D.

BRNO 2011





Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2010/2011

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Tomáš Žaba

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Konstrukční inženýrství (2301T037)**

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

### **Realizace edukační úlohy na experimentální stanici pro modelování předejzatých šroubových spojů**

v anglickém jazyce:

### **Realization of educational problem based on preloaded bolted joint apparatus**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem diplomové práce je analýza předejzatého šroubového spoje a kompletní vytvoření edukační úlohy.

Cíle diplomové práce:

Diplomová práce musí obsahovat:

- 1.Úvod
- 2.Přehled současného stavu poznání
- 3.Formulaci řešeného problému a jeho analýzu
- 4.Vymezení cílů práce
- 5.Návrh metodického přístupu k řešení
- 6.Analýzu a interpretaci získaných údajů
- 7.Závěr

Forma diplomové práce: průvodní zpráva, poster

Typ práce: analytická

Účel práce: edukační

Seznam odborné literatury:

J. H. Bickford, An Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints. Marcel Dekker, 1995

Vedoucí diplomové práce: Ing. Michal Vaverka, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 26.11.2010

L.S.

---

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

V této diplomové práci je realizována výuková úloha na experimentální stanici pro měření veličin v předepjatém šroubovém spoji. V rámci její přípravy byla provedena inovace stanice vedoucí ke snadnějšímu a rychlejšímu realizování předpětí. Pro studenty byla navržena edukační úloha a dále byly vytvořeny podklady do výuky. Výuková úloha konkrétně spočívá v experimentálním ověření relace mezi utahovacím momentem a vzniklým předpětím. K ověření experimentu byl vytvořen MKP model, který simuluje deformaci přírub stanice při daném předpětí. V této práci jsou dále uvedeny informace o předepjatých šroubech, metody vyvození předpětí a metody kontroly předpětí.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Experiment, předpětí, metoda konečných prvků, utahovací moment, momentový klíč, šroubový spoj, šroub, matice, problémově orientovaná výuka

## **ABSTRACT**

In the master's thesis an educational task concerning an experimental apparatus for quantity measurement in preloaded bolted joint is realised. In terms of its preparation an innovation of the apparatus leading to an easier and faster pretension realisation was implemented. The educational task for students and also teaching material were produced. The educational task itself consists in experimental confirmation of the relation between the tightening torque and the caused pretension. An FEM model simulating an apparatus flange deformation by given pretension was designed to verify the experiment. The thesis also contains information about the preloaded bolts, pretension elicitation methods and pretension control methods.

## **KEYWORDS:**

Experiment, pretension, Finite Element Method, tightening torque, torque wrench, bolted joint, bolt, nut, problem based learning

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE:**

ŽABA, T. *Realizace edukační úlohy na experimentální stanici pro modelování předepjatých šroubových spojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 68 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Vaverka, Ph.D.



## **PROHLÁŠENÍ**

---

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně za pomoci uvedené literatury a konzultací s Ing. Michalem Vavrkou, Ph.D.

V Brně dne 20.5.2011

.....  
Bc. Tomáš Žaba



## **PODĚKOVÁNÍ**

---

Děkuji Ing. Machalovi Vaverkovi, Ph.D. za odborné vedení mé diplomové práce a dále bych chtěl poděkovat svým rodičům a blízkým za podporu při studiu na vysoké škole.

**OBSAH**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ÚVOD</b>  | <b>12</b> |
| <b>1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>                                | <b>13</b> |
| 1.1 Šroubové spoje   | 13        |
| 1.2 Výroba závitů  | 15        |
| 1.3 Namáhání šroubů  | 17        |
| 1.4 Předepjaté šrouby  | 18        |
| 1.5 Vliv mazání na utahování šroubů                                      | 19        |
| 1.6 Tuhost spojovacích součástí - šroubů                                 | 19        |
| 1.7 Tuhost spojovaných součástí - přírub                                 | 20        |
| 1.8 Síly v předepjatém šroubovém spoji                                   | 21        |
| 1.9 Poddajný šroub   | 23        |
| 1.10 Vliv působíště provozní síly na předepjatý šroubový spoj            | 24        |
| 1.11 Realizace žádaného předpětí   | 25        |
| 1.11.1 Vyvození předpětí momentovým klíčem                               | 25        |
| 1.11.2 Vyvození předpětí metodou úhlu pootočení matice                   | 26        |
| 1.11.3 Vyvození předpětí pneumatickým utahovákem                         | 26        |
| 1.11.4 Vyvození předpětí elektrickým utahovákem                          | 27        |
| 1.11.5 Vyvození předpětí hydraulickým utahovákem                         | 27        |
| 1.11.6 Vyvození předpětí zahřátím šroubu                                 | 28        |
| 1.11.7 Vyvození předpětí pomocí matice Superbolt                         | 28        |
| 1.11.8 Vyvození předpětí pomocí speciálních talířových podložek          | 29        |
| 1.12 Kontrola žádaného předpětí  | 30        |
| 1.12.1 Kontrola předpětí pomocí speciálních šroubů Rotabolt a Smartbolts | 30        |
| 1.12.2 Kontrola předpětí pomocí identifikačních podložek (DTI)           | 30        |
| 1.12.3 Kontrola předpětí pomocí mikrometru                               | 31        |
| 1.12.4 Kontrola předpětí pomocí ultrazvuku                               | 31        |
| 1.13 Rozpojování těžko rozebíratelných šroubů s maticí                   | 32        |
| 1.14 Postupné předepínání více šroubů                                    | 33        |
| 1.15 Problémově orientovaná výuka (Problem Based Learning-PBL)           | 34        |
| <b>2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO ANALÝZA</b>                      | <b>36</b> |
| <b>3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE</b>   | <b>37</b> |
| <b>4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ</b>                             | <b>38</b> |
| 4.1 Popis experimentální stanice   | 38        |
| 4.2 Postup práce na stanici  | 40        |
| 4.3 Zjištění nedostatků experimentální stanice                           | 42        |
| 4.4 Návrh odstranění nedostatků experimentální stanice                   | 43        |
| <b>5 ANALÝZA A INTERPRETACE ZÍSKANÝCH ÚDAJŮ</b>                          | <b>44</b> |
| 5.1 Inovace experimentální stanice                                       | 44        |
| 5.1.1 Konstrukční úprava   | 44        |
| 5.1.2 Zpřesnění vyvozeného utahovacího momentu                           | 44        |
| 5.1.3 Zpřesnění měření deformace přírub                                  | 46        |
| 5.2 Ověření deformační konstanty numerickým výpočtem                     | 48        |
| 5.2.1 Vytvoření modelu MKP   | 48        |
| 5.2.2 Zhodnocení výsledků MKP  | 52        |
| 5.3 Experimentální měření na stanici a vyhodnocení výsledků              | 52        |
| 5.4 Návrh edukační úlohy   | 57        |



|  |           |
|--|-----------|
| 5.5 Postup práce při řešení úlohy                    | 59        |
| <b>6 ZÁVĚR</b>                                       | <b>60</b> |
| <b>7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>                     | <b>61</b> |
| <b>8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN</b> | <b>65</b> |
| <b>9 SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK</b>             | <b>66</b> |
| <b>10 SEZNAM PŘÍLOH</b>                              | <b>68</b> |

## ÚVOD

V dnešní době jsou na budoucí inženýry kladeny vysoké požadavky. Především aby byli důkladně teoreticky připraveni před svojí praxí. Na vysokých školách je za tímto účelem probíráno obrovské množství látky a studenti ji někdy špatně chápou. Moderním trendem je zaměření výuky na problémově orientovanou výuku, kde jsou studenti zapojeni i do praktických úloh. Tento trend se snaží následovat i Ústav konstruování. Má snahu, aby určitá přednášená teorie byla studentům předvedena i jinými způsoby, např. formou experimentu.

Šroubový spoj je jeden z nejrozšířenějších konstrukčních spojů. Nachází se v širokém spektru aplikací a ve všech průmyslových odvětvích. Proto je důležité, aby studenti byli seznámeni se šroubovým spojem obecně a také s předpětím ve šroubu. Předpětí v obecném šroubovém spoji vzniká při jeho utahování, kdy se šroub prodlužuje a spojované části se stlačují. Vyvozeno bývá ještě dříve, než je zavedeno provozní zatížení. Pro správný návrh předepjatého spoje existují normy, podle kterých je vhodné postupovat. Své využití nacházejí předepjaté šrouby především v konstrukcích vysoce namáhaných, únavově namáhaných, v jaderném průmyslu a jiných. Pro lepší představu, jak funguje předpětí, je vhodné mimo teoretickou část předvést i praktický experiment.

Byla zakoupena experimentální stanice pro měření předepjatých šroubů. Studenti se na ní mohou seznámit s relací mezi utahovacím momentem, vzniklým předpětím ve šroubu a účinností šroubu. Praktická část této diplomové práce se zabývá vytvořením úlohy pro studenty na této stanici a dále také její úpravou za účelem rozšíření možností měření. Je zde také výpočtový model MKP experimentální stanice, který porovnává deformaci přírub s deformací uvedenou v dodaném manuálu.

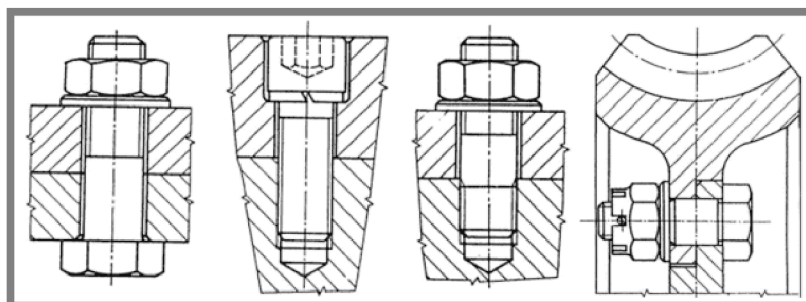
Jsou zde popsány metody vyvození předpětí ve šroubu a také metody zabývající se kontrolou vyvozeného předpětí. Na stanici byly provedeny úpravy a studenti se tak budou moci seznámit s vyvozením předpětí pomocí momentového klíče. Tento je v praxi často využíván a studentům se získané zkušenosti s ním mohou v jejich budoucí praxi hodit.

## 1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

První část této kapitoly se zabývá šrouby obecně, jejich rozdělením, pojištěním a výrobou závitu. Jelikož navržená úloha je zaměřena na vyvození předpětí a jeho měření, budou následovat informace týkající se předepjatých šroubů. Z části bude zmíněno o tuhosti šroubů a spojovaných součástech. Pak budou probírány síly v předepjatém šroubovém spoji a vliv působivé provozní síly. Detailněji jsou popsány metody vyvození předpětí a metody kontroly předpětí. Ke konci kapitoly se nachází informace, jak lehce rozpojit těžko rozebíratelný šroub s maticí a postup při předepínání více šroubů.

### 1.1 Šroubové spoje

Obecné spoje se dají rozdělit podle hlediska rozebíratelnosti a podle porušení spojovací součásti na spoje rozebíratelné (spoj lze snadno bez poškození rozebrat a opět spojit dohromady, např. pera, šrouby) a nerozebíratelné (spojovací součást se musí porušit nebo deformovat, např. nýt). Právě šroubová spojení tvoří sama o sobě jednu velkou kapitolu ve strojním inženýrství. Tato spojení převážně umožňují jednoduchou montáž a demontáž spoje. Matice i šrouby jsou normalizované a vyrábí se v sériových výrobcích, proto jsou relativně levné a snadno dostupné. V nejčastější formě se šrouby využívají jako spojovací, kdy mají za úkol spojit dvě a více součástí dohromady. Jejich využití a konstrukční řešení je rozmanité, a proto existuje větší množství jejich druhů. Patří sem například šroub s šestihrannou hlavou, šroub se zápuštnou hlavou nebo závrtný šroub. [1]



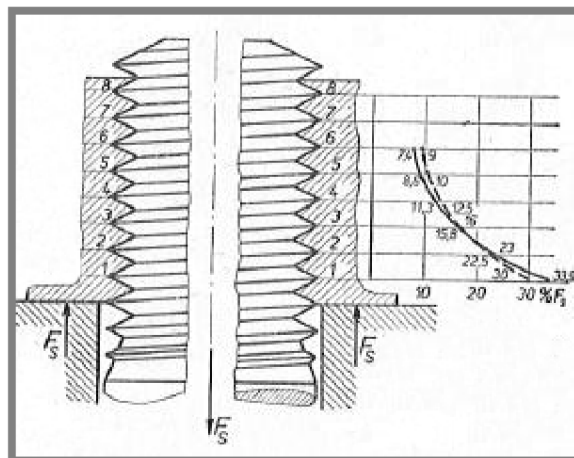
Obr. 1 Různé využití spojovacích šroubů [61]

Hojně využívány jsou také pohybové šrouby, které přeměňují otáčivý pohyb na posuvný nebo naopak. Mají zpravidla lichoběžníkový nebo oblý tvar profilu závitu a uplatňují se například jako šroubové zvedáky, lisy a vodící šrouby soustruhů. Bývají většinou vícechodé za účelem zmenšení opotřebení, zmenšení zahřívání matice a zvýšení účinnosti šroubu. Na podobném principu pracuje kuličkový šroub, i když někteří autoři ho spíše uvádějí jako mechanismus. Ten využívá snížené tření díky kuličkám, které zapříčiňují změnu třecího odporu na závitech v odpor valivý. Dále existují také šrouby pro zvláštní účely a jiné, které se dají nalézt v literatuře [1].



Obr. 2 Kuličkový šroub [3]

K upevnění průchozích spojovacích šroubů se používají matice. Vyskytuje se opět více druhů matic. Liší se například vnějším tvarem pro uchycení u spojovacích šroubů a konstrukčním upravením u pohybových šroubů, aby bylo dosaženo pracovní funkce matice. Pro spojovací šrouby jsou rozměry matic normalizované a pojednávají o nich například české normy ČSN EN ISO 4032, ČSN 02 1411, popřípadě jsou popsány ve strojirenských tabulkách. Ocelové matice jsou podle materiálových charakteristik rozděleny do devíti pevnostních tříd. Mimo ocelových matic se používají i plastové matice, které jsou vhodné pro pohybové šrouby, protože mají velkou otěruvzdornost, tlumí dobře vibrace a rázy. Bylo provedeno několik experimentů, které poukazují na skutečnost, že největší zatížení matice přenáší první nosné závity. První nosný závit přenáší okolo 30 % osově síly a druhý nosný závit okolo 20 %. Dochází zde k plastické deformaci, a proto je doporučováno již použitou matici po demontáži znovu nepoužívat. [4, 5, 6, 7, 1] Podobných výsledků bylo dosaženo i pomocí numerického řešení metodou konečných prvků v programu Ansys. Bližší informace lze zjistit v literatuře [8].

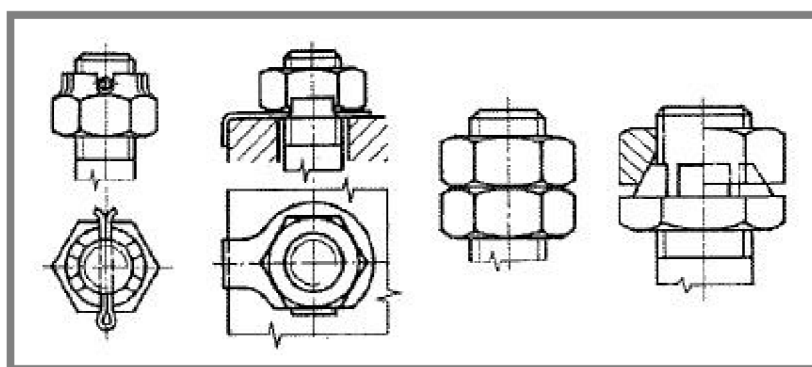


Obr. 3 Rozložení napětí na závitech matice [9]

Mezi maticí a spojované součástí, někdy taky mezi spojované součástí a hlavou šroubu, je vhodné použít podložku. Ta zajišťuje lepší rozložení tlaku mezi

spojovanou součástí a maticí (popřípadě hlavou šroubu), vyrovnává nerovnosti na dosedacích plochách, může pojistit matici před povolením a chrání povrch spojovaných součástí před opotřebením a poškozením. Jsou-li použity podložky z měkkých materiálů, pomáhají utěšňovat prostor mezi spojovanými součástmi a šroubem s maticí. Podložky jsou především vyráběny z oceli, mědi, hliníku a plastu. Jejich nejčastější povrchovou úpravou je zinkování, černění, eloxování a plastové povlakování. Plastové podložky bývají vyráběny z PA (polyamid) a při utahování se deformují. Tím pojišťují spoj, těsní ho a snižují elektrochemickou korozi mezi spojovanými kovovými součástmi a maticí se šroubem. Obdobnou funkci podložek z plastu zajišťují také polymerní tmely. Většina podložek je normalizovaná a jsou popsány ve strojírenských tabulkách a v normách jako například ČSN EN ISO 7089, ČSN 02 1740 a ČSN 02 1706. [1, 10]

U nepředepjatého šroubu s metrickým závitem a maticí nehrozí při statickém zatěžování uvolnění matice, protože šroub je samosvorný a utažením matice je vyvoláno dostatečné tření. U konstrukcí, u kterých nejsou použity předepjaté šrouby, a které jsou zatíženy vibracemi, je vhodné pojistit šroubový spoj proti samovolnému uvolnění matice. K zabránění samovolného uvolnění matice může posloužit například pružná podložka, použití dvou matic za sebou, použití korunové matice se závlačkou, Berma matice nebo pár klínových podložek NORD-LOCK aj. U předepjatých šroubů se pojištění proti samovolnému uvolnění nemusí provádět, protože je předpokládáno dostatečné utažení matice při předepínání šroubu. [1, 10]



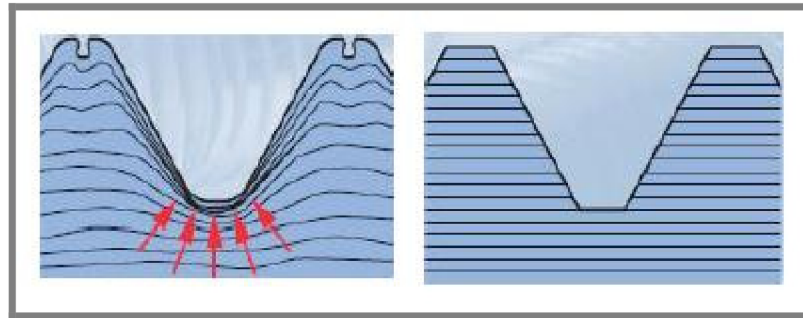
Obr. 4 Ukázka pojištění matice proti uvolnění [1]

## 1.2 Výroba závitů

Při výrobě závitu se mohou použít výrobní technologie jak s třískovým obráběním, tak s beztrískovým obráběním. Při výrobě závitu na soustruhu s třískovým obráběním vznikají přesné závity. Pro výrobu závitů menších průměrů se může využít závitníků na vnitřní závity a závitových čelistí na vnější závity. Je-li potřeba hromadná výroba, je nejlepší užít některou z technologií frézování závitů, kde se běžně dosahuje přesnosti IT 7 a parametr drsnosti Ra 3,2. Je-li vyžadována větší přesnost závitů až IT 4, například u pohybových šroubů nebo měřicích zařízení, je závit ještě broušen. Beztrískovou technologií vytváření závitů je tváření závitů, která patří k těm z nejproduktivnějších. Její velkou výhodou je průběh vláken v závitě,

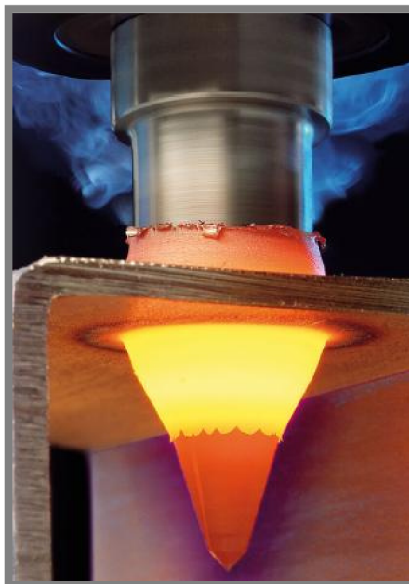


kteřá jsou neporušena a jsou pēchována. Tvāřený zāvit mā tak na rozdíl od řezaného zāvitu zvyšenu pevnost, odolnost proti otēru a ůnavē. [11, 12, 7]



Obr. 5 Rozdíl v průběhu pēchovaných a porušených vláken [11]

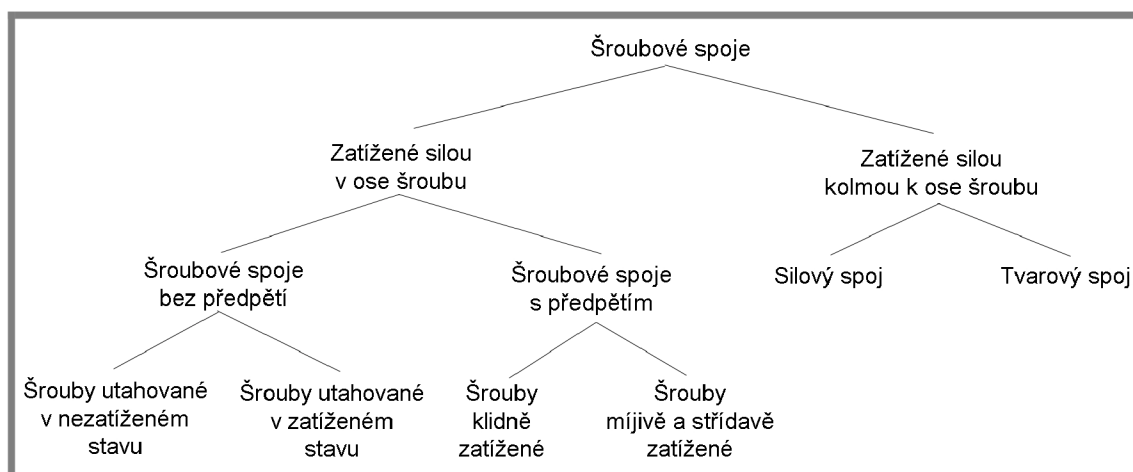
Problém s vřobou zāvitu nastāvā u tenkostēnných tēles, jako je napřříklad plech. Zde vřezaný zāvit může obsahovat pouze 1 až 2 zāvity, kvůli malē tloušťce plechu. Pro přenesení osového zatížení šroubu je to ovšem mālō. Nejčastějším řešením tohoto problému je použití nýtovací nebo navařené matice, která zvětší počet zāvitů. Vyskytují se tak ale nedostatky jako pracnost při instalaci, vzhled a spolehlivost. Moderním trendem vřoby zāvitů do tenkostēnných tēles je tvāření otvorů. V prvním kroku je díky tlaku a rotaci karbidového trnu vytvāřen otvor, kdy geometrie nástroje způsobuje olemování tvāřeného materiálu kolem vzniklého otvoru. Tento zesílený lem umoůňuje řeznému nástroji v další operaci vytvořit až 3krát více zāvitů, než v původním tenkostēnném tēlese. Je tak vytvořen šroubový spoj, který odpovídā vysokým požadavkům kvality. [13, 14]



Obr. 6 Karbidový trn [14]

### 1.3 Namáhání šroubů

Dřík šroubu je zpravidla namáhán tahem, tlakem, smykem, krutem a vzpěrem. V některých situacích je možná i kombinace zmíněných namáhání. Závity jsou namáhány pouze tlakem. Zatížení šroubu může být statické (v čase stálé) nebo dynamické (v čase proměnné). Základní rozdělení šroubů ze strojírenského hlediska podle způsobu jejich namáhání je: spoje namáhané smykem (silou kolmou k ose šroubu) a spoje namáhané tahem (silou v ose šroubu).

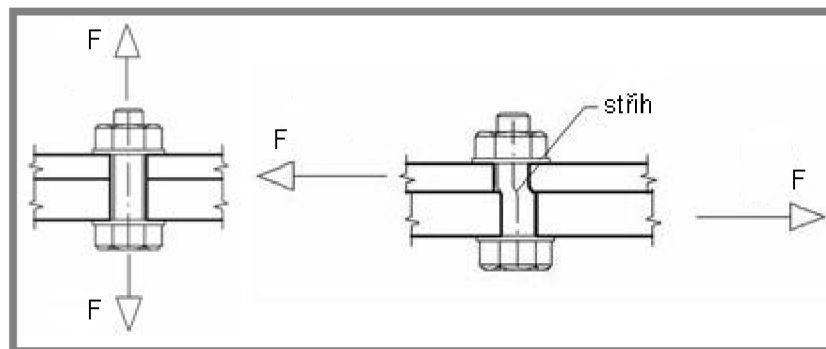


Obr. 7 Rozdělení šroubových spojů podle způsobu zatížení [15]

Při zatížení silou kolmou k ose šroubu, může být použit pouze lícovaný šroub. Smykovou sílu působící kolmo k ose šroubu, lze někdy přenést i třecími silami mezi stykovými plochami spojovaných součástí (tzv. smyková únosnost). Je k tomu využit předepjatý šroub, který díky vyvozenému předpětí vytváří tak velké třecí síly, že přenesou působící smykové zatížení. V této situaci, je-li předepjatý šroub dobře předepnut, není tento namáhán smykem, ale pouze tahovou silou, která vznikla jeho předepínáním.

Předepjatý šroub při tahovém namáhání zajišťuje především těsnost a kompaktnost spojovaných součástí. Předpětí by mělo být tak vysoké, aby při provozu, za působení provozního napětí, byla stále zaručena dostatečná silová vazba mezi spojovanými součástmi. Působí-li na šroub kombinované namáhání, pak šroub musí zajistit kompaktnost spoje a zároveň smykovou únosnost spoje. [16]

U ocelových konstrukcí ve stavebním průmyslu jsou šroubové spoje rozděleny na spoje namáhané stříhem a otláčením, třecí spoje a spoje namáhané tahem. Dále jsou podrobněji řazeny do kategorií A, B, C, D, E. Výpočty šroubových spojů ve stavebním průmyslu jsou nejčastěji polopravděpodobnostní, ale formálně jsou stejné jako ve strojném průmyslu. Detailnější popis kategorií a výpočet šroubů podle stavebního hlediska lze nalézt například v normě ČSN EN 1993-1 a nebo v literatuře [6, 17, 18].



Obr. 8 Namáhání šroubu na tah a střih [2]

### 1.4 Předepjaté šrouby

V praxi jsou častěji použity šrouby s předpětím než bez předpětí. To vzniká ve šroubu při jeho utahování, nebo při utahování matice, kdy se v určité fázi utažení začínají spojované části stlačovat a šroub se začíná prodlužovat. Tak ve šroubu vzniká osová síla, která se nazývá předpětí a bývá vyvozena ještě dříve, než je zavedeno provozní zatížení. Celý šroubový spoj bývá předem navrhnut společně s velikostí předpětí. To bývá voleno různě, podle druhu využití v praxi. Obvykle se používá součinitel sevření spoje, který udává požadovaný poměr mezi zbytkovou silou z předpětí ve spojovaných součástech a maximální provozní silou. Vzorce pro výpočet a doporučené hodnoty součinitelů sevření spoje uvádí například literatura [6] a [9]. Pro návrh předepjatých šroubů, využitelných za účelem těsnění spoje, lze využít normu ČSN EN 1591-1, která udává postup výpočtu. Obecná volba předpětí bývá různými autory doporučována rozmanitě a není jednoduchá. Například česká norma ČSN 73 1495 doporučuje volbu předpětí podle druhu materiálu použitého šroubu. Pro šrouby typu 8.8 bývá zvolena taková síla předpětí, aby její vyvozené napětí ve šroubu odpovídalo asi 56 % napětí vyvozenému při mezi pevnosti šroubu. Pro šrouby typu 10.9 může napětí od síly předpětí odpovídat přibližně 63 % napětí z meze pevnosti šroubu. Lze konstatovat, že v souhrnu po celém světě se nejčastěji předpětí používá v rozsahu dosažení 50 % až 90 % napětí vzniklém při mezi v kluzu. Po zavedení provozního zatížení nesmí být napětí ve šroubu větší než při mezi v kluzu, aby se šroub plasticky nedeformoval. [6, 19, 20]

K předepnutí šroubu slouží více metod, jako například utahení matice momentovými klíči, měřením úhlu dotažení matice nebo použitím speciálních prvků jako identifikační podložky. Po předepnutí šroubu bývá také často prováděna kontrola, jestli osová síla ve šroubu se shoduje s navrženou. Díky předpětí vzniká na dosedacích plochách spojovaných součástí potřebná silová vazba (tlak). Po správném vytvoření předpětí se konstrukční spoj při provozu chová jako celistvý útvar a je zaručen stálý vzájemný kontakt spojovaných součástí. Šroubová spojení s předpětím bývají využita za účelem zajištění těsnosti spoje při statickém i dynamickém namáhání, zvýšení spolehlivosti a životnosti spoje, zajištění smykové únosnosti díky vzniklému silovému styku aj. Předepjaté šrouby se používají především tam, kde jsou opravdu potřeba, protože jejich použití a praktické zavedení do provozu je cenově dražší než šrouby nepředepjaté. Jejich důležité opodstatnění se nachází například v konstrukcích únavově namáhaných (mosty, jeřáby), na konstrukcích

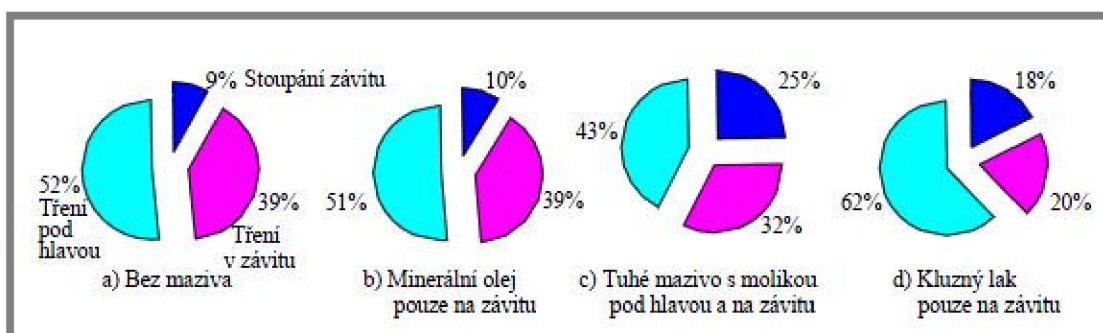


nacházející se v seismických oblastech, v jaderném průmyslu, ve spojích vysoce namáhaných aj. [6, 16, 19, 21]

### 1.5 Vliv mazání na utahování šroubů

1.5

V dnešní době jsou již dříve používané černé šrouby pro předepjaté spoje nahrazeny šrouby žárově zinkovanými. A to z toho důvodu, že při utahování nemazaného šroubu vrstva zinku na závitu částečně maže závit a pozitivně působí na utahování šroubu. Šroub se zinkuje po jeho vytvoření, zato matice je pozinkována a pak ještě vystružena. Při vyrábění šroubu i matice je již počítáno s budoucí vrstvou pokovení. Bylo zjištěno, že závislost předepínací síly a utahovacího momentu není lineární. Předepínací sílu ovlivňují následující faktory: tření v závitě, tření pod otočnou částí šroubu a spojovací součástí, úprava povrchu šroubu, podložky, matice, kolmost osy šroubu a jiné elementy. Při předepínání jakýchkoliv šroubů je doporučeno opatřit je vhodným mazivem. Správně použité mazivo prodlužuje životnost spoje a to snížením místních špiček pnutí v závitě, snížením namáhání dřívku šroubu na krut, snížením svařování materiálu za studena (tzv. zadření) aj. Někteří výrobci šroubů své šrouby již při výrobě opatřují kluzným lakem pro zvýšení spolehlivosti. Bez použití maziv se při předepínání šroubů objevuje rozptyl ve vyvozeném předpětí a v některých případech dané předpětí nejde ani vytvořit. Na závislost utahovacího momentu a vzniklé síly předpětí mají největší vliv tyto faktory: tření pod hlavou, tření v závitech a stoupání závitu. Mnozí autoři připisují těmto faktorům vliv přibližně 50 % tření pod hlavou, 40 % tření v závitech a 10 % stoupání závitu. Proto, aby se snížilo tření pod hlavou, je doporučováno použít mazivo i zde. [19, 22]



Obr. 9 Poměr faktorů závislosti utahovacího momentu a předepínací síly [19]

### 1.6 Tuhost spojovacích součástí - šroubů

1.6

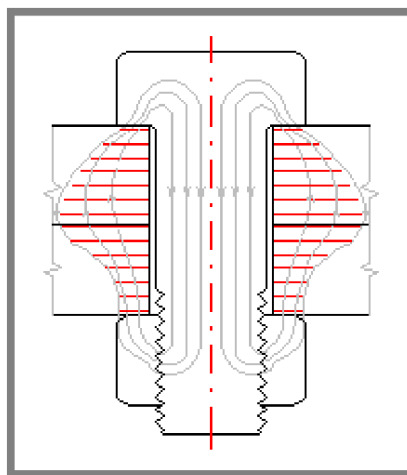
Šrouby bývají utaženy předepnuty ještě dříve, než jsou v provozu zatíženy. Šroub se většinou skládá ze tří hlavních částí: hlava šroubu, závitová část - závit a hladká válcová část - dřív. Existují i šroubové výjimky, které nemají hlavu šroubu jako například závrtný šroub. Dřív a závit mají odlišný průřez a při prodlužování šroubu vlivem předepnutí se každá část prodlouží o jinou hodnotu. Pro výpočet předepjatého šroubu je důležité znát jeho charakteristiku - tuhost  $k_s$ . Tak jako každá část šroubu (dřív a závit) má jiné prodloužení, má i jinou tuhost. Celková tuhost se musí stanovit z tuhostí dřívkové části a z tuhostí závitové části nacházejících se v sevření. Pro

výpočtový model tuhosti se může šroub nahradit sériově řazenými pružinami, kdy jedna pružina reprezentuje dřík a druhá závit. Výpočet lze nalézt v literatuře [6, 23]. Tyto výpočty však neuvažují deformaci matice a hlavy šroubu. Bylo zjištěno, že teoretický výpočet tuhosti je větší asi o 5 % než tuhosti ověřené experimentálně. [24] Pokud by bylo potřeba přesnější výsledek, existují dvě varianty zpřesnění výpočtu. Může se uvažovat s rozložením zatížení na závity matice, nebo s rozložením zatížení na závity matice a zároveň s mírnou deformací hlavy šroubu. Upravené výpočty pak lze nalézt v literatuře [24, 25, 26].

V normě ČSN EN ISO 4017 je uvedeno, že u dlouhých šroubů, které mají relativně krátkou délku závitové části v sevření, se může tato délka zanedbat a celkovou tuhost šroubu  $k_s$  stačí spočítat pouze jako tuhost dříku v sevření. Naopak, pro šrouby, které mají závit až k hlavě, může být celková tuhost šroubu  $k_s$  počítána pouze jako tuhost závitové části v sevření. [6]

### 1.7 Tuhost spojovaných součástí - přírub

Pro určení sil mezi šroubem a spojovanými součástmi u předepjatého šroubového spoje je potřeba kromě tuhosti šroubu znát také tuhost spojovaných součástí. Pro zjištění rozložení napětí ve spojovaných součástech byly použity experimenty (ultrazvuk, fotoelasticimetrie) a numerické výpočty. Bylo zjištěno, že největší napětí se nachází do délky 1,5 násobku poloměru šroubu od jeho osy a s přibývajícím vzdáleností silové napětí výrazně klesá. Tvarové rozložení napětí připomíná dutý komolý soudek. [6, 7]



Obr. 10 Rozložení napětí v předepjatém šroubu [16]

Aby se tuhost spojovaných součástí dala spočítat, tak se prvně spojované součásti zaměnily Rötcherovým tlakovým dvojkuželem, který má proměnné vrcholové úhly. Při této záměně ovšem dochází k vysoké výpočtové složitosti. Proto byl opět vytvořen nový, jednodušší výpočtový model a spojované součásti se nahradily dutým komolým dvojkuželem s neproměnným vrcholovým úhlem  $2\beta$ . Společná podstava dutého komolého dvojkužele se pro šroub s hlavou a maticí nachází přesně

v polovině svěrné délky, tedy mezi dosedací hlavou šroubu a dosedací hlavou matice. Ve většině případů je doporučován úhel  $\beta = 45^\circ$ . Bylo ale dokázáno, že při použití  $\beta = 45^\circ$  dochází k navýšení tuhosti spojovaných součástí, než ve skutečnosti mají. Je-li proto materiál spojovaných součástí z oceli, hliníku nebo litiny a je-li použita podložka, je doporučovaný úhel  $25^\circ \leq \beta \leq 33^\circ$ . Taková podmínka je obvykle pokaždé splněna, a proto se většinou volí  $\beta = 30^\circ$ . [6, 7] Teoretické komolé kužele se mohou nahradit sériově řazenými pružinami a vzorce pro výslednou tuhost lze nalézt v literatuře [6] a [23].

Byla provedena studie tuhosti spojovaných přírub v závislosti na poměru průměru šroubu  $d$  a svěrné délky  $l$ , kde se za  $\beta$  použilo  $45^\circ$ , tak jak doporučuje většina literatur a také  $30^\circ$ , jak doporučují jiní autoři. Výsledky byly dále porovnávány s výpočtem pomocí metody konečných prvků a s výpočtem, který uvažuje rozložení napětí podle Rötšcherova tlakového dvojkužele. Byly zjištěny velmi podobné výsledky pro  $\beta = 30^\circ$  a metodu konečných prvků. Především pro poměr  $d/l = 0,4$ . Proto autoři Wileman a spol. navrhli aproximační vztah a konstanty pro zjednodušený výpočet tuhosti spojovaných součástí. Odchyłka navrženého vztahu od klasického analytického výpočtu je v řádu procent. Zároveň navrhli podmínky, při kterých je aproximační vzorec použitelný. Aproximační vztah lze nalézt v literatuře [27].

## 1.8 Síly v předepjatém šroubovém spoji

Při utahování šroubového spoje (vzniká-li předpětí) se utahovaný šroub prodlužuje o  $\Delta \delta_s$  a spojované součásti, nacházející se mezi hlavou šroubu a maticí, se stlačují směrem k sobě o  $\Delta \delta_p$ . Předpokládá-li se závislost síla-deformace jako lineární, potom charakteristice šroubu odpovídá zatěžovací dráha pod úhlem  $\varphi_s$  a charakteristice spojovaných součástí (přírub) odpovídá zatěžovací dráha pod úhlem  $\varphi_p$ . Úhly  $\varphi_s$  a  $\varphi_p$  se dají určit z tuhosti šroubu a tuhosti spojovaných součástí, protože jsou to jejich tangenty. [6, 23]

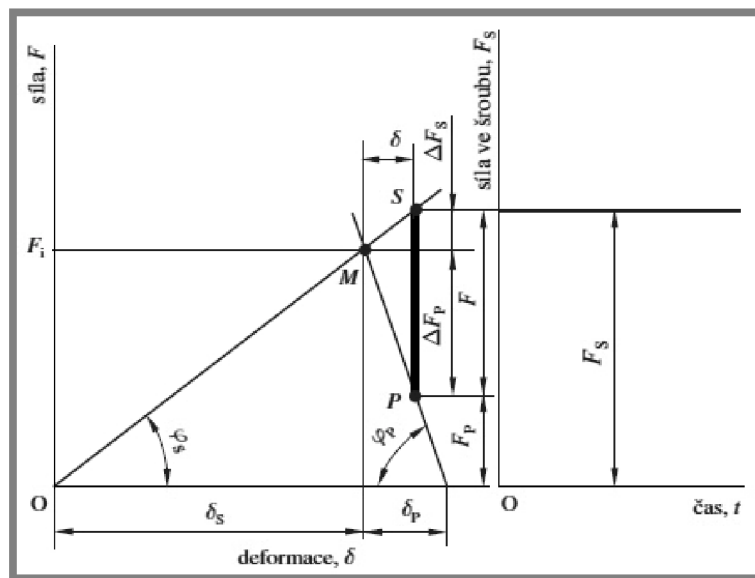
Po zavedení provozního statického zatížení vzniká síla, která je dále přičtena k síle předpětí. Ta má za následek, že šroub se dále prodlužuje o hodnotu  $\delta$  a spojované součásti jsou naopak odlehčovány o stejnou hodnotu  $\delta$ . Je zřejmé, že zde jsou jisté silové poměry mezi provozní silou, silou ve šroubu a silou ve spojovaných součástech. Silové poměry v předepjatém šroubovém spoji je potřeba znát pro jeho správné navržení a především pro pevnostní kontrolu šroubu. K vyšetření těchto silových poměrů se používá montážní a pracovní diagram předepjatého šroubového spoje. Ten vychází z části diagramu trhací zkoušky, kde bere v úvahu pouze lineární část, a kde platí Hookův zákon. Ve šroubu nesmí nastat trvalá deformace, protože by následoval pokles předpětí. [6, 9, 16]

Základ montážního a pracovního diagramu předepjatého šroubového spoje je sestaven pro známé předpětí, tuhost šroubů a tuhost spojovaných součástí. Pokud je dále známo osově provozní zatížení, lze z diagramu vyčíst rozložení silových poměrů ve spoji. [16]

Při montážním vyvození určitého předpětí  $F_i$  jsou spojované součásti stlačeny o  $\delta_p$  a šroub je prodloužen o  $\delta_s$ . V montážním a pracovním diagramu předepjatého šroubového spoje vzniká průsečík zatěžovací dráhy šroubu a posunuté zatěžovací

dráhy spojovaných součástí při daném předpětí  $F_i$  (bod  $M$ ). Při zavedení provozního napětí, například stálé tahové síly  $F$ , je šroub dále prodlužován podle své zatěžovací dráhy, až do provozního bodu  $S$  a jeho nový přírůstek prodloužení má hodnotu  $\delta$ . Provozní stálá tahová síla také odlehčuje spojované součásti a ty se rozpínají podle svojí zatěžovací dráhy, až do provozního bodu  $P$ . Jejich prodloužení je stejné jako prodloužení šroubu  $\delta$ . Shodné prodloužení  $\delta$  při provozu vychází z kompaktnosti celku šroubového spoje a z toho, že se všechny dotykové plochy spoje od sebe neoddalují. [6, 23]

Z montážního a pracovního diagramu je zřejmé, že provozní síla  $F$  je rozdělena mezi předepjatý šroub a spojované součásti. Původní síla ve šroubu ( $F_i$ ) je za provozu navýšena o část provozní síly  $\Delta F_s$  a naopak původní síla ve spojovaných součástech ( $F_i$ ) je snížena o  $\Delta F_p$ . [6]



Obr. 11 Montážní a pracovní diagram předepjatého šroubového spoje při zatížení stálou provozní silou [6]

Tuhostní konstanta spoje:

$$C = \frac{k_s}{k_s + k_p}$$

Část provozní síly  $F$  přitěžující šroub:

$$\Delta F_s = \frac{k_s F}{k_s + k_p} = CF$$

Část provozní síly  $F$  odlehčující spojované součásti:

$$\Delta F_p = F - \Delta F_s = (1 - C)F$$

Celková síla ve šroubu v provozním stavu:

$$F_s = F_i + \Delta F_s = F_i + CF$$

Celková síla ve spojovaných součástech v provozním stavu:

$$F_p = F_i - \Delta F_p = F_i - (1 - C)F$$

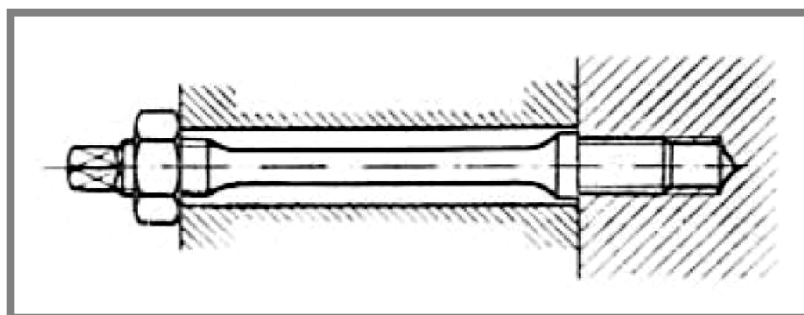
V běžné strojní praxi nejsou předepjaté šrouby zatěžovány pouze stálou statickou silou, ale také silou dynamickou. To znamená, že při provozu je zatížení nestálé. Zatěžující síla, působící na předepjatý šroub, kolísá v určitých mezích. Podle druhu kolísání zatěžující síly v čase můžeme rozeznat více druhů zatěžování (například zatěžování s konstantní velikostí, mívivý cyklus v tahu, souměrný střídavý cyklus, pulsující cyklus v tahu). Montážní a pracovní diagram předepjatého šroubového spoje pro dynamické namáhání funguje na obdobném principu jako při stálé provozní síle.

### 1.9 Poddajný šroub

1.9

Má-li předepínaný šroub větší tuhost než spojované součásti, tak jeho zatěžovací dráha v diagramu je strmější a spojované součásti, nebo-li příruby, jsou poddajnější. Do šroubu je pak přenášena větší část provozní síly (popřípadě amplitudy) a je více namáhán než kdyby byl poddajnější. V praxi se většinou konstruuje předepjatý šroubový spoj s tuhými přírubami a poddajným šroubem. Výsledkem pak může být, že příruby přenášejí až přes 80 % provozního zatížení. Je tedy vhodné zkonstruovat šroubový spoj s co největším poměrem tuhostí šroubů a spojovaných přírub. [6]

Snížení tuhosti šroubu lze provést změnou materiálu šroubu, kdy se změní modul pružnosti v tahu  $E$  a nebo také použitím poddajných nenormalizovaných šroubů. Ke snížení tuhosti vede také zeslabení dříku nebo vyvrtání šroubu. Autor Niemann G. doporučuje vyvrtání okolo 70 % z velkého průměru šroubu. [28] Pro snížení tuhosti pomocí zeslabeného dříku je pro větší šrouby z kvalitnějšího materiálu doporučován průměr dříku v rozmezí 70 % až 90 % z jeho původního průměru. [29] Je-li ke snížení tuhosti zeslaben dřík šroubu, je také snížena jeho statická únosnost. Při požadavku, aby se statická únosnost moc nezmenšila, je doporučována plocha průřezu zeslabeného dříku 90 % z její původní hodnoty, což odpovídá přibližně 95 % z původního průměru dříku. [30]

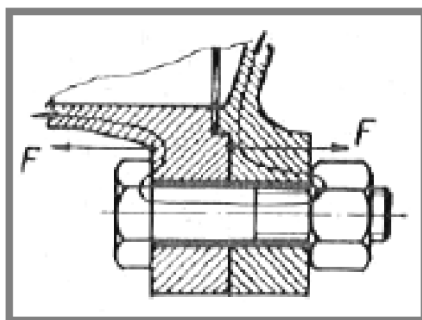


Obr. 12 Poddajný šroub se zeslabeným dříkem [9]



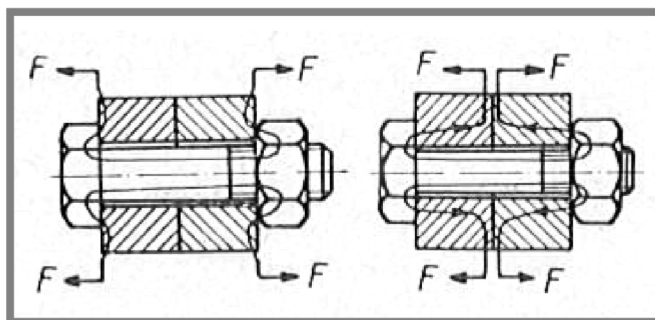
### 1.10 Vliv působíště provozní síly na předepjatý šroubový spoj

Bylo provedeno několik experimentů, které poukazují na skutečnost, že na síly v předepjatém šroubovém spoji má také vliv působíště osově provozní síly. Ve výpočtech silových poměrů a v montážním a pracovním diagramu uvedeném výše, bylo považováno působíště osově provozní síly přímo pod hlavou šroubu a pod maticí. Předepjatý šroub je tedy při provozu dále prodlužován a stlačené příruby jsou odlehčovány. V praxi se často objevují případy, kdy působíště osově provozní síly neleží přímo pod hlavou šroubu a pod maticí, ale například přímo ve stykových plochách spojovaných přírub. V takovém případě se při provozu předepjatý šroub dále prodlužuje, ale spojované příruby jsou ještě více stlačovány. [9]



Obr. 13 Rozdílné působíště provozní síly [9]

Bylo zjištěno, že v takových případech se mění tuhost šroubu, která se zvětšuje, i tuhost spojovaných součástí, která se zmenšuje proti stavu, kdy ještě není zavedena provozní síla. Ve skutečnosti se mohou objevit i případy, kdy působíště osově provozní síly ve spojovaných součástech je různé pro každou její část. Tedy v jedné polovině spojované součástí může být působíště osově provozní síly pod hlavou šroubu a ve druhé přímo ve stykové ploše spojovaných přírub. Výsledné silové poměry v předepjatém šroubovém spoji jsou tedy ovlivněny i tímto faktorem. Kombinací poloh působíště osově provozní síly může být neskutečné množství a jejich přesné zjištění je náročné, a někdy i zcela intuitivní. [9]



Obr. 14 Různé polohy působíště provozních sil [9]

Faktor zavedení provozní síly, uvažující různé působíště provozní osově síly, pomáhá řešit tento problém a vychází ze směrnice VDI 2230, která byla vydána Asociací německých inženýrů (Verein Deutscher Ingenieure). Jedná se o směrnici,

kteřá představuje jeden z nejucelenějších postupů pro navrhování a kontrolu šroubových spojů. Vyskytují se v ní základní doporučené hodnoty utahovacích momentů a velikosti předpětí, uvažující rozptyl součinitele tření, průměr šroubu a druh materiálu šroubu. Dále se zde nachází podrobnější informace, které berou v úvahu možný rozptyl vyvozeného předpětí v závislosti na druhu použité utahovací metody. Směrnice VDI 2230 také uvažuje možnou ztrátu předpětí tzv. sedáním spoje, která vzniká po utažení šroubu díky účinku plastické deformace. Tzv. sedání spoje je mimo jiné zapříčiněno otlacením závitů matice, šroubu a dotykových ploch spojovaných součástí, kdy se deformují vrcholky nerovností na povrchu. Takové deformace mohou zapříčinit při provozu postupný pokles předpětí a následnou nekompaktnost šroubového spoje. Podle VDI 2230 se může přibližná ztráta předpětí určit na základě průměru použitého šroubu, velikosti svěrné délky, tuhosti šroubu a tuhosti spojovaných součástí. [6]

---

**1.11**

### **1.11 Realizace žádaného předpětí**

V dřívější době se předpětí ve šroubovém spoji realizovalo obyčejnými šroubovými klíči, pouze podle zkušenosti a pocitu montéra. Pro větší šrouby bylo dokonce používáno různých trubkových nástavců a je zřejmé, že vyvozené předpětí muselo značně kolísat. V dnešní době existuje více metod, přesnějších i méně přesných, pro vyvození žádaného předpětí s minimálním rozpětím. [9]

---

**1.11.1**

#### **1.11.1 Vyvození předpětí momentovým klíčem**

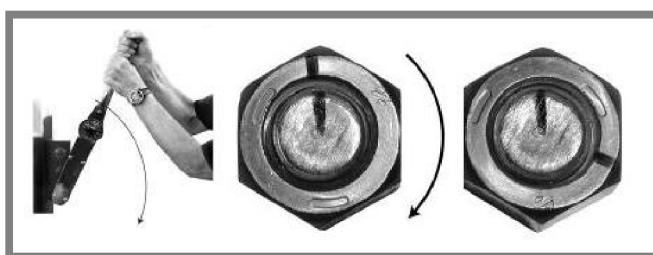
Momentový klíč je obyčejný utahovací klíč, který je vybaven mechanismem s nastavitelným utahovacím momentem v daném rozsahu. Je-li při utahování dosaženo nastaveného momentu, klíč automaticky vypne a nedovolí další utahování, nebo ho pouze indikuje zvukovým signálem. Volba vhodného utahovacího momentu je závislá na potřebném předpětí a je zjistitelná z normy ČSN 73 1495, nebo se dá vypočítat analyticky - viz kapitola 5.3. Tento způsob vyvození předpětí je považován za méně přesný, protože při utahovacím momentu hraje velkou roli rozptyl součinitele tření na závitech, pod hlavou šroubů a maticí. Někteří autoři pro zpřesnění této metody doporučují nepoužívat ploché podložky. A to kvůli možné změně koeficientu tření při utahování, kdy se může pohybovat i samotná podložka. Doporučují používat šrouby již s podložkou z jednoho kusu a také matici s podložkou z jednoho kusu. Přesnost vyvozeného předpětí danou metodou se pohybuje okolo 25 %. [31, 32]



Obr. 15 Momentový klíč [33]

### 1.11.2 Vyvození předpětí metodou úhlu pootočení matice

Využívat tuto metodu k vyvození předpětí je vhodné pouze pro spoje, které jsou zatíženy staticky a je-li dosednutí třecích ploch po utažení prvotním momentem bezchybné. Při utahování je v prvním kroku šroub předepnut menším utahovacím momentem. Poloha dřívku šroubu vůči matici je poznačena například fixou, nebo jinou metodou označení. Nyní se pro dosažení žádaného předpětí matice otočí o určitý úhel, který lze vyčíst z doporučujících literatur nebo z normy ČSN 73 1495. Nevýhodou této metody je potřebná preciznost při utahování matice o daný úhel. Bývá taky doporučeno nespolehat se na předepsané hodnoty úhlů pootočení matice a pokud je to možné, tak velikosti úhlu stanovit experimentálně pro každý rozdílný spoj. Přesnost vyvozeného předpětí danou metodou se pohybuje okolo 15 %. [31, 34, 35]



Obr. 16 Schéma metody úhlu pootočení matice [34]

### 1.11.3 Vyvození předpětí pneumatickým utahovákem

Při využití pneumatických utahováků je potřeba znát utahovací moment, který má být vyvozen. Viz vyvození předpětí momentovými klíči. Je vhodný pro větší průměry šroubů a pro vyvození větších utahovacích momentů. Musí být k němu připojena pneumatická jednotka, která dodává dostatečný stlačený vzduch do pneumatického utahováku. Ten je dále vybaven opěrným ramenem, které slouží k zajištění polohy utahováku při samotném utahování, aby nedocházelo k prokluzu. Výrobci uvádí, že přesnost vyvození daného předpětí je okolo 5 %. Velikost utahovacího momentu se liší dle použitého zařízení, ale lze vyvodit momenty i větší než 40 000 Nm. Utahováky mohou sloužit jak k utahování, tak i k povolování. Existují také vakuové utahováky, které se vyznačují vysokou rychlostí dosažení daného utahovacího momentu. [36, 37, 32]



Obr. 17 Pneumatický utahovák [37]



#### 1.11.4 Vyvození předpětí elektrickým utahovákem

Při utahování elektrickým utahovákem je opět potřeba zadat požadovaný utahovací moment, aby bylo vyvozeno dané předpětí. Není potřeba žádná přídatná jednotka, protože zařízení pracuje na elektrickém mechanismu, tedy stačí mu dodat pouze elektrickou energii. Nastavení utahovacího momentu je pohodlné, jelikož většina elektrických utahováků je vybavena digitálním nastavením požadovaného momentu přímo na používaném zařízení. Výrobci udávají, že velikost utahovacího momentu může dosahovat stejných hodnot jako u pneumatických utahováků a dokonce s větší přesností vyvození předpětí, která se pohybuje do 3 %. Zároveň garantují nulový přenos vibrací do ruky při utahování nebo povolování. [37]



Obr. 18 Elektrický utahovák [37]

#### 1.11.5 Vyvození předpětí hydraulickým utahovákem

Hydraulické utahováky se používají pro největší šrouby, kde je potřeba vyvodit velké upínací síly. Je použit hydraulický agregát, který dodává tlak do upínací hlavy, s využitím média jako voda nebo olej. Moment pro utažení může dosahovat až hodnot 75 000 Nm. Přesnost vyvozeného předpětí danou metodou se pohybuje v rozmezí 1 % až 10 %. Existují také tzv. hydraulické podvodní utahováky, které slouží k vyvození předpětí na šroubech nacházejících se pod hladinou vody. Tyto utahováky jsou konstrukčně upraveny tak, aby odolávaly korozi a vysokým tlakům působící pod vodní hladinou. [38]



Obr. 19 Hydraulický utahovák [39]

### 1.11.6 Vyvození předpětí zahřátím šroubu

Při této metodě je využito tepelné roztažnosti šroubu. Šroub je ve spoji zahříván a tím se prodlužuje. Po jeho zahřátí je matice pouze lehce dotažena. Při chladnutí, kdy se šroub zkracuje, mu k návratu do původní délky brání spojovaný materiál a použitá matice. Vzniká tedy v jeho ose předpětí. Teoretické potřebné zahřátí a prodloužení šroubu lze vypočítat z rovnic, které lze najít například v literatuře [9]. Při předepínání dlouhých kotevních šroubů se využívá zvláštního plášťového ohřátí. Kolem šroubu je vytvořen plášť a do vzniklé mezery mezi ním a šroubem proudí horká voda. Dříve pro předepínání šroubů jejich tepelným zahřátím byl používán ohřev plamenem a topné elektrické těleso, které se vsunovalo do dutiny šroubů zvlášť upravených pro tyto účely. V dnešní době se nejvíce používá elektrického indukčního zahřátí. Jeho podstata vychází z rychlé změny magnetického pole a vlivu vířivých proudů. Vyvolané účinky trou molekuly a vzniká teplo, které prodlužuje šroub. Ideální místo pro koncentraci teplotní roztažnosti je v dřívku uprostřed šroubu. Orientační čas pro předepnutí jednoho šroubu elektrickým indukčním zahřátím je přibližně 5 minut. Ostatní metody to zvládnou okolo 45 minut. Vyvození předpětí zahřátím šroubu se většinou používá u šroubů těch největších průměrů. [9, 31, 40].

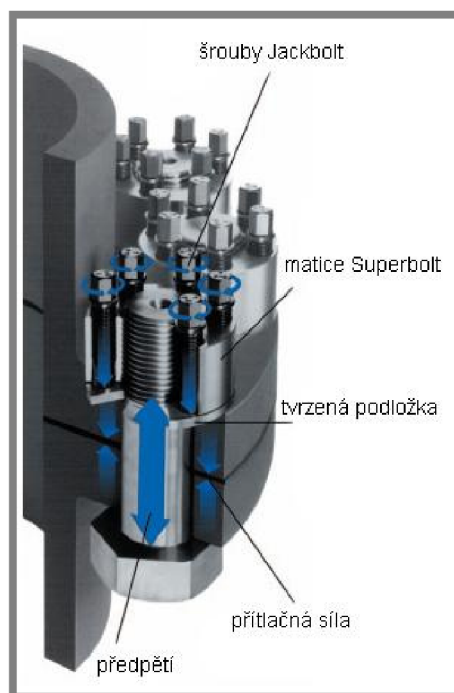


Obr. 20 Vyvození předpětí elektrickým indukčním zahřátím šroubu [41]

### 1.11.7 Vyvození předpětí pomocí matice Superbolt

Předepínací matice Superbolt slouží k vyvození vysokého předpětí za pomoci pouhých ručních momentových klíčů. Základ matice tvoří klasický normalizovaný závit, který může být našroubován na klasické šrouby, závrtné šrouby, závitové tyče aj. Matice je volně zašroubována na šroub. Mezi ní a spojovanými součástmi je umístěna tvrzená podložka kvůli ochraně. V prostoru po obvodu matice jsou umístěny tzv. Jackbolt šrouby, které mají nízký součinitel tření v závitě. Při jejich utahování se opírají o tvrzenou podložku a ve šroubu vzniká předpětí. Matice Superbolt zajišťují jednoduché vyvození předpětí i v málo přístupných místech. Mohou být využity i při teplotách  $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Další výhodou tohoto předepínacího systému je, že vzniklé zatížení matice je rovnoměrně rozloženo po všech jejích závitech. Odpadá tak problém, kdy v klasické matici přenáší největší zatížení její první tři závity. Svoje uplatnění nachází v širokém spektru

průmyslových odvětví, jako například u turbín, jeřábů a lodí. Přesnost vyvozeného předpětí danou metodou se pohybuje okolo 5 %. [32, 42]



Obr. 21 Matice Superbolt [42]

### 1.11.8 Vyvození předpětí pomocí speciálních talířových podložek

1.11.8

Jedná se o speciální podložky, které mají kónický tvar a svým vzhledem připomínají talíř. Umístít se mohou pod hlavu šroubu i pod matici. Při utahování se zmenšuje jejich výška, elasticky se deformují, tlačí na hlavu šroubu nebo matici a tím zároveň vyvozují předpětí ve šroubu. Může jich být použito více na jednu nebo i samostatně. Fungují na stejném principu, jako kdyby byly použity pružiny. Jejich využití je vhodné pro kratší šrouby, staticky a méně dynamicky namáhané. Jsou normalizované v normě DIN 2093 a při jejich úplném stlačení mají předepsanou sílu, kterou vyvozují ve šroubu. [34, 43, 44]



Obr. 22 Talířové podložky v neutaženém a utaženém stavu [34]

## 1.12 Kontrola žádaného předpětí

Po vyvození požadovaného předpětí je vhodné mít jistotu, jestli bylo opravdu dosaženo dané hodnoty. K ověření je vhodné používat speciální prvky nebo postupy, které většinou vycházejí z měření prodloužení šroubu. Ze zjištěného prodloužení lze totiž docela přesně indikovat vzniklé předpětí ve šroubu.

### 1.12.1 Kontrola předpětí pomocí speciálních šroubů Rotabolt a Smartbolts

Tyto speciální šrouby pracují na podobném principu. Vevnitř je zabudován mechanismus, který měří přímo prodloužení šroubu při jeho utahování. Šroub Rotabolt má na jednom svém konci výběžek z vnitřního mechanismu, který lze v nepředepjatém stavu lehce otáčet pouhým prstem. Je-li při utahování matice dosaženo požadovaného předpětí, na které je šroub navržen, vnitřní mechanismus šroubu toto indikuje zablokováním volně otáčejícího se výběžku. Obsluha tedy pouhým dotykem na vyčnívající výběžek zjišťuje, zda je ve šroubu dosaženo žádaného předpětí. U šroubu Smartbolts je vnitřní podobný mechanismus, který jako indikaci dosaženého předpětí používá změnu barvy senzoru na hlavě šroubu. Je zde použita speciální kapalina, která v nezátíženém stavu má červenou barvu a při vyvozování předpětí jí plynule mění až na černou. K tomuto šroubu je dodán také vzorník barev, který podle druhu barvy kapaliny určuje vzniklé předpětí ve šroubu. U šroubů Smartbolts je dosahovaná přesnost vyvození předpětí v rozmezí 2 % až 5 %. [45, 46]



Obr. 23 Rotabolt (vlevo) a Smartbolts (vpravo) [45, 46]

### 1.12.2 Kontrola předpětí pomocí identifikačních podložek (DTI)

Jedná se o speciálně upravené podložky, které mají na jedné mezikruhové ploše vyčnívající výstupky. Umísťují se pod hlavu šroubu nebo pod matici. Při utahování matice nebo šroubu se vyčnívající výstupky z podložky plasticky deformují a zmenšuje se prostor mezi DTI podložkou a kontaktní součástí (matice nebo hlava šroubu). Tento zmenšující se prostor je měřitelný plechovou měrkou, aby bylo identifikováno potřebné předpětí. Deformující se výstupky nezapřičinují vzniklé předpětí, ale pouze ho signalizují svou deformací nezávisle na utahovacím momentu. Každá DTI podložka zaručuje minimální hodnotu vzniklého předpětí při jejím úplném stlačení. Existují i Squirter DTI podložky, které v dutině vyčnívajících výběžků mají silikonovou náplň. Při řádném dotažení je tento silikon žlábkou vytlačen ven a identifikuje dosažené minimální předpětí ve šroubu. DTI podložky dokáží identifikovat dané předpětí s přesností okolo 10 %. [47, 48]





Obr. 24 Squirter DTI podložky [49]

1.12.3

### 1.12.3 Kontrola předpětí pomocí mikrometru

Ke změření vyvozeného předpětí lze použít i mikrometr. Podstata spočívá ve změření prodloužení šroubu a vypočítání vzniklého předpětí. Tato metoda může být využita pouze tehdy, je-li umožněn přístup mikrometru k oběma koncům šroubu po jeho instalaci. V praxi se může stát, že konce šroubů nebudou přesně nad sebou. Proto je vhodné po vyvození předpětí provést více měření v různých bodech po obvodu šroubu. [34]



Obr. 25 Měření délky šroubu mikrometrem [34]

1.12.4

### 1.12.4 Kontrola předpětí pomocí ultrazvuku

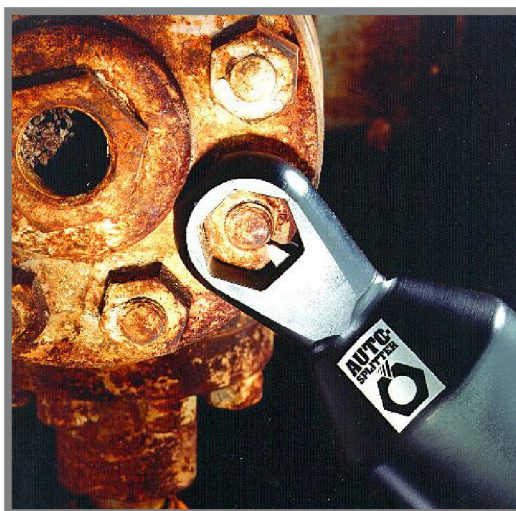
Při měření předpětí pomocí ultrazvuku je na jednu stranu šroubu v nezátíženém a potom v zatíženém stavu přiložen senzor. Ten vysílá ultrazvukové vlny, které prochází materiálem a na konci šroubu jsou odraženy zpět do senzoru. Automaticky je změřen čas návratu ultrazvukové vlny a je porovnán s časem návratu, kdy byl šroub v nezátíženém stavu. Zařízení dokáže změřit délku šroubu, jeho prodloužení, vypočítat předpětí šroubu a vygenerovat zprávu. Informace jsou zobrazeny na displeji řídicí jednotky. Ta může být propojena s počítačem pro zálohování dat, nahrání nových materiálových charakteristik apod. Pro lepší výsledky je doporučeno, aby na hlavě šroubu a na plošce dřívkové části, byla vybroušena plocha, která zajistí lepší reflexi ultrazvukového signálu. Zařízení dokáže změřit předpětí s přesností okolo 1 %. [32, 37]



Obr. 26 Ultrazvuková kontrola předpětí [38]

### 1.13 Rozpojování těžko rozebíratelných šroubů s maticí

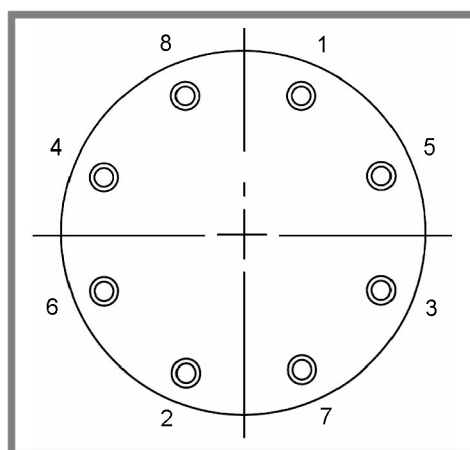
Při rozebírání šroubového spojení nejde matice v některých případech jednoduše povolit. Tvoří se šroubem kompaktní celek, a to například díky korozi nebo plastické deformaci. V běžné praxi používají k povolení těchto spojů montéři různé trubkové nástavce na klíče, kladiva, brusky, oddělování plamenem a jiné pomůcky. Moderním trendem na trhu je nástroj Nut Splitter, který je určen právě k oddělení matice od šroubu. Univerzální nástrčná hlava se nasadí na matici a hydraulicky poháněný hrot ji rozstříhne, bez toho, aniž by porušil šroub nebo závit. Tato zařízení jsou vyráběna jako ruční nebo plně automatická. Nevznikají žádné hluky a ruce obsluhy jsou chráněny, protože se vůbec nevyskytují v místě stříhání matice. Matice M50 je přestříhnutá touto metodou do 30 sekund. [50]



Obr. 27 Nut Splitter [50]

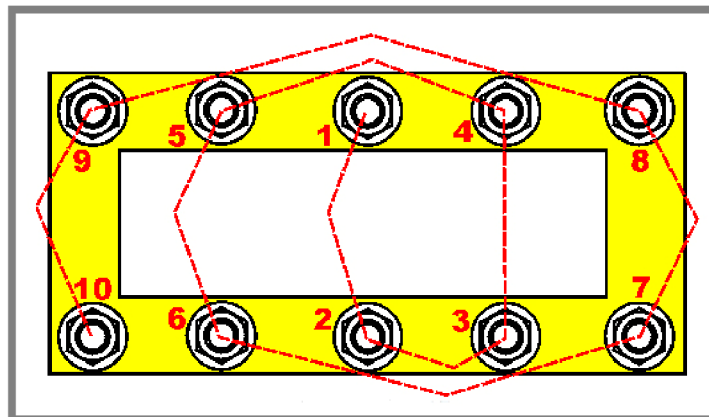
### 1.14 Postupné předepínání více šroubů

Bylo provedeno mnoho experimentů, které zkoumaly vliv utahování více šroubů na vzniklé předpětí. Bylo zjištěno, že utahování ve zcela nahodilém pořadí je nevyhovující. Je-li použit potřebný utahovací moment pro vyvození daného předpětí, tak po nahodilém utažení více šroubů se objevuje pokles žádaného předpětí v řádu desítek procent. Proto je doporučena metodika, podle které je vhodné se při předepínání více šroubů řídit. Například pro šrouby, nacházející se v kruhové rozteči, je vhodné používat tzv. křížové pravidlo. To znamená utáhnout první šrouby do kříže a po té křížově pokračovat na neutažených šroubech. Aby bylo dosaženo ještě přesnějších hodnot, je vhodné utahovat šrouby ve více krocích. Například první utáhnout všechny šrouby křížovým způsobem na 30 % žádaného utahovacího momentu, dále všechny znovu na 70 % a až ve třetím kroku na finálních navržených 100 % utahovacího momentu. Některé literatury uvádí, že je vhodné po utažení na 100 % požadovaného utahovacího momentu tento krok ještě preventivně zopakovat. [21, 51]



Obr. 28 Postup křížového utahování [51]

Vyskytují se i šroubové spoje v rozmístění, které připomínají obdélníkový vzor. Jsou-li tyto šrouby předepínány, je vhodné začít s utahováním u vnitřního šroubu a dále pokračovat ve spirálovitém tvaru až po poslední okrajový šroub. Pro zpřesnění vyvozeného předpětí je opět možno provést postupné utahování, kdy šrouby jsou předepnuty na 30 %, 70 %, 100 % a preventivně ještě jedenkrát na 100 % potřebného utahovacího momentu. [31]



Obr. 29 Postup utahování u obdélníkového vzoru [31]

Pokud je to možné, je nejlepší utahovat všechny šrouby naráz. Pro větší průměry šroubů se k tomu dá využít hydraulických utahováků, pokud je dostatek místa na utahovací přístroje. Pokud není dostatek místa, mohou se využít hydraulické matice. Jsou to matice, které po utažení zůstávají součástí spoje. Díky vhodnému hydraulickému systému mohou být utahovány všechny naráz.



Obr. 30 Hydraulické matice [37]

### 1.15 Problémově orientovaná výuka (Problem Based Learning-PBL)

Jedná se o poměrně novou moderní výukovou metodu, rozšířenou zejména v zahraničí. V České republice je teprve jen pár škol, které ji mají zařazenou nebo se chystají ji zařadit do svého programu. Přechází se od instruktivní výuky ke konstruktivní se zaměřením na aktivní přístup studentů, kteří pracují ve skupinách a spíše pasivní postoj učitele. Ten pouze podá základní informace o řešeném problému, dohlíží a podněcuje chod vyučování. Studenti pak sami ve svojí skupině řeší reálný problém, konzultují možnosti a vyvozují závěry do přesně stanoveného termínu. Nedílnou součástí této metody je samostudium a shánění potřebných podkladů a studií, které vedou k řešení jejich problematiky. Studenti jsou tak lépe připravováni na týmovou spolupráci v budoucím zaměstnání a zároveň jsou



rozvíjeny jejich „měkké“ dovednosti. V podstatě nejde o memorování látky jak tomu je u běžné výuky, kdy studenti jsou seznámeni s teorií a až po té jim je představen problém. Při využití PBL je před studenty první položen problém a ti se pak seznamují s teorií problematiky. [52, 53, 54]

Ústav konstruování zavádí problémově orientovanou výuku do svého programu vyučování. Na trhu existuje více firem (např. Cussons, Armfield, Tecquipment, G.U.N.T.), které prodávají experimentální stanice zaměřující se na tribologii, termomechaniku, mechaniku a jiné vědní obory. Je snaha seznámit studenty s předpětím ve šroubu, a tak byla zakoupena experimentální stanice pro měření předepjatých šroubů od firmy G.U.N.T. Na trhu se nachází experimentální stanice pro šroubové spoje, které například měří účinnost šroubu, ale nebyla nalezena žádná jiná stanice pro studijní účely, která by se zabývala předepjatým šroubem. [55,56, 57]

## **2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO ANALÝZA**

Ústav konstruování na Fakultě strojního inženýrství v Brně se snaží následovat moderní trendy ve výuce. To znamená, že daná teoretická látka by měla být studentům předvedena i prakticky. Pro lepší pochopení probírané problematiky by studenti měli být zapojeni do experimentální výuky, kde si prakticky upevní nebo rozšíří své získané teoretické znalosti. Postupně je budována výuková laboratoř, kde se nachází více experimentálních stanic. Vize do budoucna je taková, že pro každou stanici by měla být připravena kompletní edukační úloha s podklady, aby studenti mohli samostatně pracovat. Jejich výsledky by pak měly prezentovat protokoly, rešerše a jiné výstupní zprávy.

Ve výuce jsou studenti i mimo jinou problematiku seznamováni s teorií spojů a také i s předepjatými šrouby. Za účelem přiblížení této problematiky studentům byla zakoupena experimentální stanice pro měření předepjatých šroubů od německé firmy G.U.N.T. Tato měřicí stanice byla dodána bez jakékoliv připravené edukační úlohy. Příložen byl pouze instrukční manuál, který seznamuje s použitelnými funkcemi. Stanice tedy zatím nemůže být zapojena do experimentální výuky. Je potřeba v první řadě navrhnout a zrealizovat praktickou úlohu na této stanici a vytvořit pro ni příslušné podklady.

Dále je nutno promyslet, do kterého předmětu bude úloha zařazena. V úvahu přichází předmět Konstruování strojů – strojní součásti, který je vyučován ve třetím ročníku. Studenti jsou zde seznámeni s předepjatými šrouby. Jedná se o bakalářské studium a tak se objevuje problém s velkým počtem studentů, kteří by museli pracovat v mnoha lidech na jedné experimentální stanici. V úvahu také přichází zařazení této experimentální úlohy do navazujícího magisterského studia v oboru Konstrukční inženýrství. Zde je vyučován předmět Ocelové konstrukce, kde se rovněž probírá problematika šroubových spojů. Počet studentů je zde již pouze kolem dvaceti a v hodině by mohli studenti pracovat například ve 4 skupinách.

Měření na stanici však není dostatečně přesné, jelikož jsou zde použity analogové úchylkoměry. Dále se nemohou měřit jiné průměry šroubů než M8 a utahování šroubů navrženým způsobem je značně nepohodlné a zdlouhavé.

### 3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

3

---

Cílem této diplomové práce je vytvoření kompletní edukační úlohy na experimentální stanici TM 320 pro měření předepjatých šroubů a její zařazení do výuky. Vytvořená úloha by měla sloužit k praktickému seznámení studentů s možnostmi měření předpětí ve šroubu a k poznání vzájemné relace mezi utahovacím momentem, vzniklým předpětím a účinností šroubu.

#### **Splnění hlavního cíle obnáší:**

Rozšíření stanice z hlediska využitelnosti více průměrů šroubů.

Upravení stanice za účelem jednoduššího ovládní a zpřesnění měření vyvozeného předpětí.

Odměření závislosti výstupních hodnot ze stanice.

Ověření deformace na stanici s deformací vypočtenou na modelu MKP.

Odzkoušení realizovatelnosti navržené úlohy.

Vytvoření podkladů pro výuku (návody, prezentace, poster).

Navržení předmětu, do kterého bude experimentální stanice zařazena.

## 4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ

Před samotným započítáním práce bude vhodné prostudovat manuál k experimentální stanici. Autor se s ní teoreticky seznámí a zjistí možnost jejího plného využití. Po získání teoretických zkušeností se bude moci přistoupit ke stanici prakticky. Provede se na ní měření a pokusí se zjistit její případné nedostatky. Budou-li nějaké odhaleny, navrhnou se jejich možná řešení, která se zrealizují. V manuálu je uvedena deformační konstanta, podle které deformace přírub 1 mm odpovídá předpětí ve šroubu 20 000 N. Tuto deformační konstantu bude vhodné zkontrolovat numerickým výpočtem MKP. Na stanici bude provedeno měření závislosti předpětí na utahovacím momentu a odměřené hodnoty se zkontrolují s teoretickým výpočtem. Teprve po těchto krocích bude navržena edukační úloha pro studenty. Aby byla navržená úloha realizovatelná, provede se její praktické vyzkoušení na experimentální stanici a zpracují se výsledky.

Bylo by vhodné, aby navržená úloha byla zařazena do výuky, kde je probírána problematika předepjatých šroubů. Teoreticky přichází v úvahu její zařazení do bakalářského programu v předmětu Konstruování strojů – strojní součásti. Zde je ale větší počet studentů, kteří jsou rozděleni do skupin přibližně po 25 lidech. Současně probíhá více cvičení a vlivem časového uspořádání výuky by se všichni nemohli na experimentální stanici vystřídat. Vhodnější by bylo zařadit tuto edukační úlohu do magisterského programu na Ústavu konstruování. Zde je pouze jedna skupina, ve které je asi jen 20 studentů, a tak by se již všichni během jednoho cvičení na stanici prostrídat mohli. Úlohu by bylo vhodné zařadit do předmětu Ocelové konstrukce, neboť je zde také probírána problematika šroubových spojů.

Na začátku cvičení vyučující seznámí studenty s experimentální stanicí a s postupem práce. Studenti se rozdělí do skupin po pěti a následně jim vyučující předá zadání úlohy. V laboratoři již studenti pracují samostatně pod dozorem vyučujícího, který dbá na bezpečnost a popřípadě ještě odpovídá na kladené dotazy. Každý student samostatně vypracuje protokol z měření se závěrem, který odevzdá vyučujícímu v dohodnutém termínu.

Na začátku této kapitoly bude popsána experimentální stanice a bude vysvětleno, jak se na ní pracuje. Dále bude navazovat zjištění jejích nedostatků s návrhem na jejich odstranění.

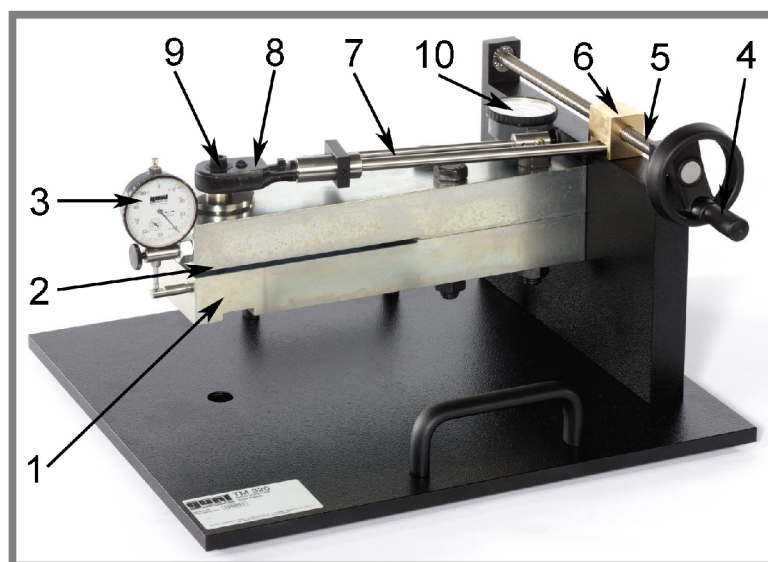
---

### 4.1 Popis experimentální stanice

Experimentální stanice TM 320 slouží k měření závislosti mezi utahovacím momentem a vzniklou silou předpětí ve šroubu. Váží 35 kg a její rozměry jsou 400 x 400 x 340 mm. Toto zařízení slouží pro edukační účely a bylo navrženo pro experimentální výuku, kdy studenti pracují v malých skupinách. Stanice byla zakoupena od německé firmy G.U.N.T. a jednotlivé části byly označeny číslem na obrázcích 31, 32, 34, 36 a 37.

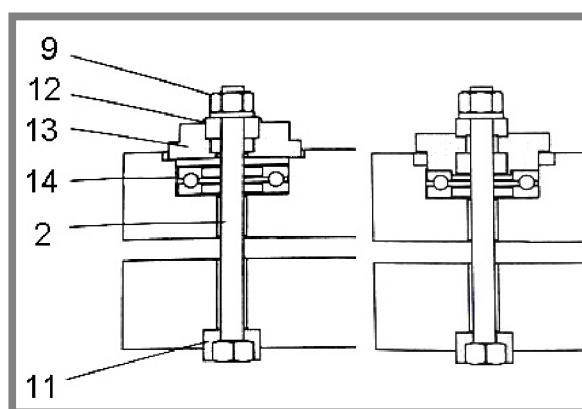
Hlavní částí zařízení jsou dvě příruby (1), které jsou z jedné strany pevně přichyceny k základní stěně. K sobě jsou na jedné polovině upevněny pomocí čtyř šroubů, které mají zaručit stálý vzájemný kontakt mezi sebou. Mezi přírubami na druhé polovině se nachází mezera. Ta umožňuje vzájemnou deformaci přírub směrem k sobě a to vlivem utahování testovaného šroubu (2). Vzniklá deformace je měřena analogovým úchytkoměrem (3) a díky konstantě 20 kN/1 mm odpovídá vzniklému předpětí ve šroubu. Klička (4) je přichycena na pohybovém trapézovém šroubu (5), který je

uložen ve valivých ložiskách. Na trapézovém šroubu je zároveň umístěn pohyblivý jezdec (6). Do něj je vložen jeden konec utahovacího ramene (7), které je na svém druhém konci zakončeno hlavicí (8). Tato hlavice slouží k uchycení matice (9) testované šroubu a zároveň umožňuje díky západce otáčení v jednom nebo obou směrech. Uťahovací rameno je vybaveno analogovým úchylkoměrem (10), který měří jeho elastickou deformaci a díky konstantě 10 Nm/1 mm určuje momentální utahovací moment.



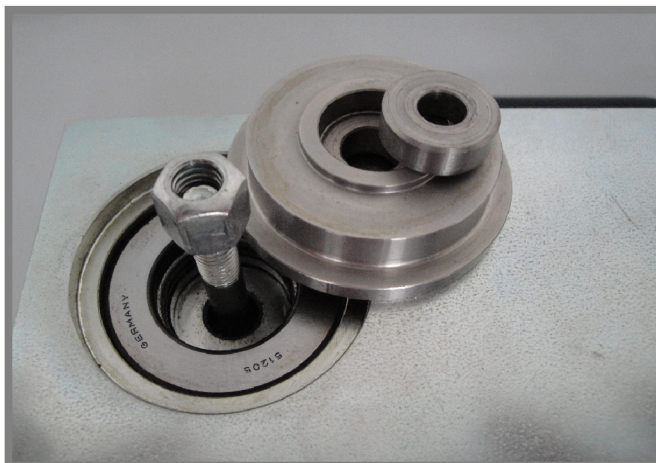
Obr. 31 Experimentální stanice TM 320 [55]

Pojistka (11) slouží k zabránění protáčení šroubu při jeho utahování. Je nasunuta na hlavu šroubu a umístěna ve spodní drážce v dolním rameni příruby. Pod utahovanou maticí se nachází vložka (12), která je vložena do víčka (13). To může být umístěno do horní příruby dvojím způsobem. Buď je zcela v kontaktu s přírubou jako celistvý útvar, nebo je vloženo naopak a s přírubou není vůbec v kontaktu. Víčko je vloženo na ložisko (14) a při takovémto uspořádání se s utahovanou maticí otáčí na ložisku a nepůsobí zde tření pod hlavou matice (dále označováno jako bez tření).



Obr. 32 Schéma a popis uložení šroubu [58]

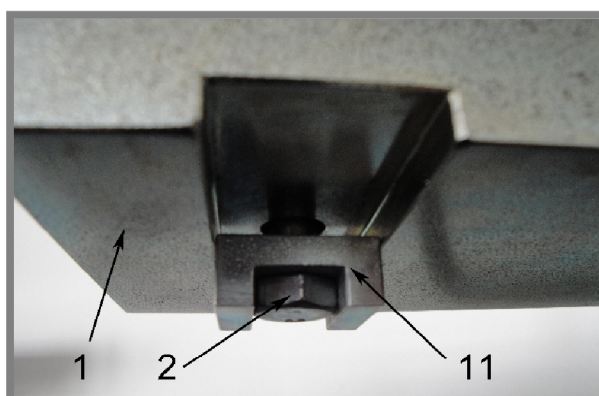




Obr. 33 Pohled na uložení šroubu

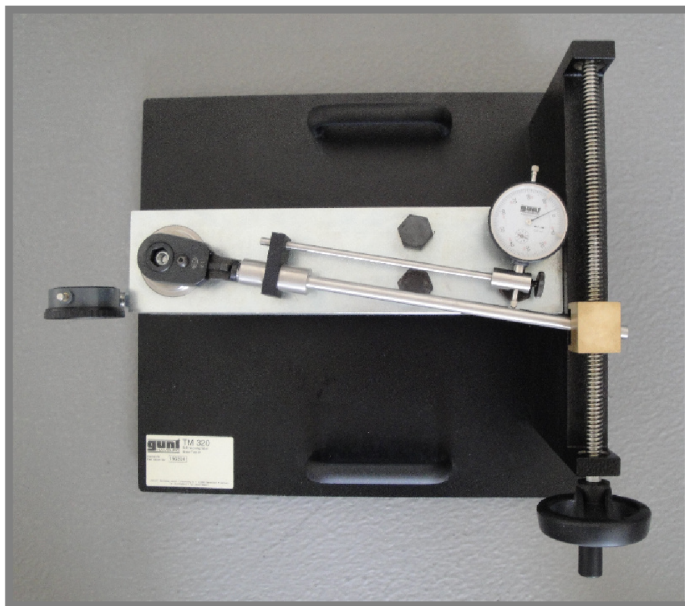
## 4.2 Postup práce na stanici

Na testovaný šroub (2) se nasune pojistka (11) proti otáčení a hlava šroubu se do ní zaklesne. Pojistka se šroubovou hlavou je umístěna do drážky, která se nachází ze spodní strany dolní příruby (1). Dřík šroubu je prostrčen připraveným otvorem a závitová část vyčnívá z vrchní příruby.



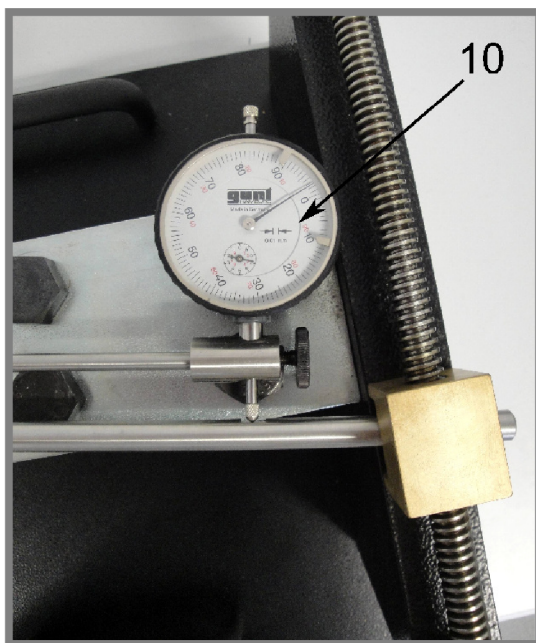
Obr. 34 Pojistka proti protáčení šroubu

Víčko (13) se umístí do horní příruby. Je-li umístěno největším průměrem směrem dolů, zajišťuje dosednutí do otvoru v přírubě a při experimentu představuje nepohyblivou část příruby. Pokud je umístěno jeho menším průměrem směrem dolů, tak zapadá do valivého ložiska (14) a zcela se vyhýbá kontaktu s přírubou. V takovémto umístění se při utahování matice víčko otáčí díky styku s ložiskem. Na šroub (2) se nasadí vložka (12), která zapadá do otvoru ve víčku (13) a to při obou polohách jeho umístění. Nyní může být ručně našroubována matice (9) šroubu až na doraz k vložce (12). Na hlavicí utahovacího ramene (8) se zkontroluje poloha západky, aby umožňovala směr pohybu matice při jejím utahování. Volný konec utahovacího ramene (7) se vloží do jezdcy (6) na pohybovém šroubu (5) a druhá strana s hlavicí (8) se nasadí na utahovanou matici (9). Vynulují se oba dva analogové úchylkoměry (3, 10).



Obr. 35 Experimentální stanice TM 320

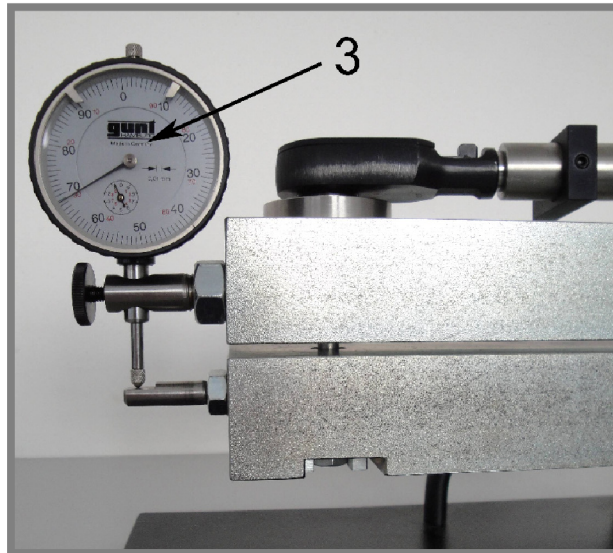
Nyní se s citem může začít točit s kličkou (4). Ta svůj otáčivý pohyb přenáší na pohybový šroub (5). Zde se v jezdcí (6) přeměňuje pohyb točivý na pohyb posuvný. Vlivem přímočarého pohybu jezdce je pohybováno s utahovacím ramenem (7), které se elasticky deformuje. Tato elastická deformace je zaznamenána analogovým úchylkoměrem (10) nacházejícím se na utahovacím rameni (7). Ten je vybaven stupnicí po 0,01 mm a ručička úchylkoměru se vlivem průhybu ramene dává do pohybu. Po odečtení velikosti elastické deformace může být díky převodové konstantě určen vzniklý moment.



Obr. 36 Měřič utahovacího momentu



Při utahování matice (9) se šroub (2) prodlužuje a příruby (1) nacházející se v sevření se stlačují. Elastická deformace přírub je měřena analogovým úchylkoměrem (3), který se nachází na jejich koncích. Je vybaven stupnicí po 0,01 mm a díky převodové konstantě může být určeno vzniklé předpětí ve šroubu.



Obr. 37 Měřič deformace přírub

### 4.3 Zjištění nedostatku experimentální stanice

Před samotným návrhem prací byla vyzkoušena funkčnost stanice. Před tím na ní nebyla prováděna žádná činnost. Bylo tedy předpokládáno, že dovezená stanice je ve výborném stavu a je vhodná k okamžitému použití.

První zjištěný nedostatek se týkal práce s analogovými úchylkoměry (3, 10). Při jejich nulování se musí otáčet s celým ciferníkem, a to až do té doby, než je nulová hodnota na ciferníku pootočená na momentální polohu ručičky. Při více pokusech o vynulování byl zjištěn nedostatek, že při pohybu ciferníku nastává i malá deformace mezi měřícími body úchylkoměru, která je ručičkou zaznamenána. Tedy i při samotném nulování úchylkoměrů se měřící ručička pohybuje, někdy i kmitá. Je tedy obtížné dotočit nulovou hodnotu na ciferníku do polohy ručičky při klidu. V některých případech se i po skončení nulování ručička nevrací na své původní místo.

Při utahování šroubu (2) s využitím navrhnutého utahovacího ramene (7) byly zjištěny další nedostatky. S točením kličkou (4) se po pohybovém šroubu (5) pohybuje jezdec (6), který má značnou vůli. Při jeho pohybu vibruje a vydává nepříjemné zvuky. Navíc vzniklé vibrace jsou přenášeny do utahovacího ramene (7) a projevují se i na rozkmitu ručičky úchylkoměru (10) měřícího deformaci utahovacího ramene. Pohybový šroub (5) je krátký, a tak na jedno přejetí jezdcem ze strany na stranu je dovolen posun utahovacího ramene (7) přibližně do 45°. Pro vytvoření počátečního předpětí 3 kN na šroubu M8 je zapotřebí, aby se jezdec přibližně 5krát posunul z jedné krajní polohy do druhé. K tomu je třeba, aby se kličkou (4) otočilo přibližně 370krát. Je zřejmé, že práce s takovýmto zařízením je

nepraktická a pro obsluhu velmi nepohodlná. Pro vyvození větších předpětí tedy roste náročnost na čas a zvyšuje se únava obsluhy vlivem točení klíčkou.

Další nevýhodou měřicí stanice je, že umožňuje provádět experimenty pouze na šroubech o průměru M8. Spodní pojistka (11), která brání protáčení hlavy šroubu při jeho utahování, je přizpůsobena pouze pro hlavu šroubu M8. Větší hlava by se do ní nevešla a menší by se v ní při utahování protáčela. I hlavice (8) utahovacího ramene (7) je přizpůsobena pouze pro matici (9) na šroub o průměru M8.

#### **4.4 Návrh odstranění nedostatků experimentální stanice**

4.4

---

Aby práce na stanici byla pohodlnější a rychlejší, bylo by vhodné provést úpravu utahovací části. Může se provést konstrukční úprava pohybového šroubu tak, aby byl delší. Potom by se na jedno přejetí jezdcem ze strany na stranu dosáhlo většího úhlu utažení testovaného šroubu. Mohl by se také vyrobit nový pohybový šroub s větším stoupáním, a tím by se urychlil posun jezdce při otáčení klíčkou. Zamezit vibracím a nepříjemnému zvuku při utahování by se dalo dosáhnout vyrobením nového jezdce s menšími vůlemi. Všechny tyto možnosti by zrychlily a usnadnily práci na stanici, ale ne v očekávané míře. Nejlepším řešením tohoto problému je vybavení stanice momentovým klíčem. Práce s ním bude rychlá a pohodlná. Nastavení utahovacího momentu bude přesné a studenti se také seznámí v praxi s hodně rozšířeným nástrojem.

Při řešení problému s analogovým úchylkoměrem, který měří deformaci přírub a zároveň předpětí ve šroubu, přicházelo v úvahu více variant. Ke změření předpětí ve šroubu by se mohlo využít tenzometrie nebo ultrazvuku. Vybavení stanice touto technikou bylo po zjištění cenových nabídek zamítnuto. V úvahu přicházel také mikrometr pro měření prodloužení šroubu a následné určení předpětí. Tato možnost byla také zamítnuta, protože by se s ním na stanici špatně měřila vzdálenost mezi hlavou šroubu a koncem šroubu. Nejvhodnější možností je zakoupení digitálního úchylkoměru, který nahradí analogový. Odpadnou tak problémy s jeho nulováním a odečítáním hodnot. Předpětí tedy bude stále měřeno pomocí deformace přírub (posuv rovnoběžný s osou šroubu) a deformační konstanty za využití digitálního úchylkoměru.

U návrhu upravení stanice za účelem využitelnosti více průměrů šroubů přicházely v úvahu dvě možnosti. Buď stanici upravit tak, aby mohly být měřeny větší průměry šroubů, nebo menší průměry šroubů. Pro využitelnost větších průměrů šroubů by do stanice musel být proveden větší konstrukční zásah. K tomu by pak byly vyvozovány větší utahovací momenty a větší síly předpětí. Ty by mohly stanici poškodit. Bylo tedy rozhodnuto upravit stanici pro měření menších průměrů šroubů M6. Zde budou použity menší utahovací momenty a síly předpětí, které stanici zaručeně nepoškodí.

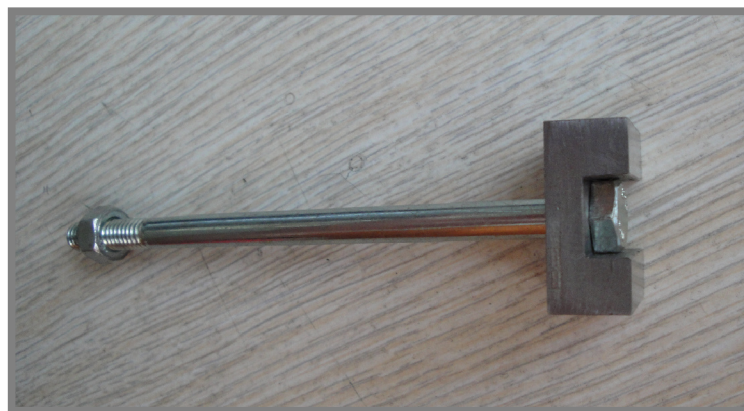
## 5 ANALÝZA A INTERPRETACE ZÍSKANÝCH ÚDAJŮ

Před přistoupením k hodnocení výsledků byla na začátku této kapitoly popsána inovace experimentální stanice, která byla provedena na základě návrhu metodického přístupu k řešení. Jsou zde také uvedeny bezpečnostní předpisy pro momentový klíč a údržba a oprava digitálního úchylkoměru. Tyto pokyny nejsou přiloženy v přílohách, protože je vhodnější, aby všechny informace týkající se daného zařízení byly pohromadě. Dále je zde popsán postup vytváření modelu stanice metodou konečných prvků a zhodnocení numerických výsledků. Ke konci kapitoly se nachází provedené experimentální měření na stanici a návrh edukační úlohy pro studenty.

### 5.1 Inovace experimentální stanice

#### 5.1.1 Konstrukční úprava

Aby na stanici mimo šrouby M8 bylo možné měřit i šrouby M6, bylo potřeba vyrobit novou pojistku, která svými rozměry bude pasovat na hlavu menšího šroubu. Potřebné rozměry byly odměřeny posuvným měřítkem a rozměry šroubu byly získány ze strojírenských tabulek. Byl vytvořen výkres součástky, který se nachází v přílohách diplomové práce (příloha č.3). Součástka byla následně vyrobena ve školní dílně. Dále byl zakoupen šroub M6 s délkou 100 mm včetně matice. Ten svými rozměry pasuje do stanice a díky nové pojistce umožňuje provádět experiment i na menším průměru šroubu, než pro jaký byla stanice navržena.



Obr. 38 Vyrobená pojistka proti protáčení se šroubem M6

#### 5.1.2 Zpřesnění vyvozeného utahovacího momentu

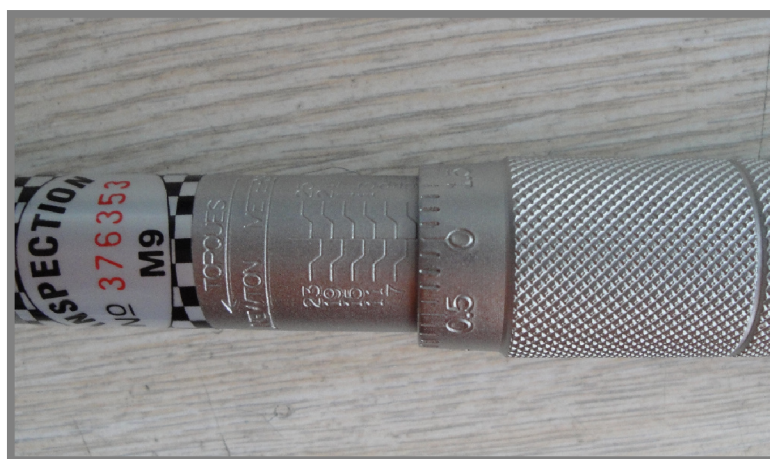
Za účelem zjednodušení a zrychlení vyvozeného utahovacího momentu byl zakoupen momentový klíč. Ten je vhodný pro vyvození utahovacího momentu 5 Nm až 25 Nm. Takovýto rozsah byl zvolen záměrně, aby momentový klíč mohl být použit pro šrouby M8 a M6. Dále byly pořízeny 2 nástrčné hlavice, které pasují na momentový klíč a současně i na matice šroubů M8 a M6. Tyto hlavice rozšiřují možnost momentového klíče při experimentu tak, aby mohl být využitelný pro utahování i těchto matic.





Obr. 39 Momentový klíč s nástrčnými hlavicemi

Na těle momentového klíče jsou základní hodnoty utahovacího momentu v rozmezí 5 Nm až 25 Nm se stupnicí po 2 Nm. Na otočné rukojeti je podrobnější stupnice, která slouží pro nastavení mezihodnot. Její hodnoty jsou od 0 do 0 a tento úsek je dále rozdělen na 20 dílků. To znamená, že pokud je s rukojetí otočeno od 0 do 0 (o 180°), stoupne hodnota utahovacího momentu o 2 Nm. Pro nastavení momentu (z hlavní stupnice) se otáčí rukojetí až do té polohy, kdy hodnota 0 na stupnici rukojeti dosáhne požadované hodnoty rysky na hlavní stupnici těla klíče. Dále je možno pokračovat v otáčení s rukojetí pro nastavení mezihodnot. Přesnost dosažení nastaveného utahovacího momentu je  $\pm 4\%$ .



Obr. 40 Stupnice momentového klíče

Před otáčením s rukojetí je potřeba povolit aretační šroub, který se nachází na spodní straně rukojeti a dovoluje její otáčivý pohyb. Po nastavení požadované hodnoty utahovacího momentu se aretační šroub utáhne a otočná rukojeť se tak stává nepohyblivou. Nyní je klíč připraven k utahování stálým a rovnoměrným tahem. Je-li při utahování dosaženo přednastaveného momentu, tak klíč vydá jasné cvaknutí a je potřeba přestat s utahováním.



Obr. 41 Aretační šroub

**Bezpečnostní předpisy pro momentový klíč:**

Momentový klíč by neměl být používán k jiným účelům, než pro které je určen. Jedná se o měřicí přístroj, a proto by s ním mělo být zacházeno opatrně. Je zcela nevhodné nasazovat různé prodloužení na rukojeť. Mohlo by dojít k poškození a ke zkreslení vyvozeného momentu. Přístroj by měl být udržován od zdrojů tepla, chráněn před slunečním zářením a nikdy by neměl být vystaven teplotě vyšší než 70 °C. Je-li momentový klíč vystaven teplotním výkyvům, potom by před utahováním měl být ponechán přibližně 30 minut v teplotní stabilitě. Je vhodné ho nenechávat v blízkosti leptavých látek, rozpouštědel a nezacházet s ním ve vlhkém nebo zaprášeném prostředí. Není-li klíč používán, je vhodné aby byl nastaven na nejnižší hodnotu. Zabrání se tak zbytečnému napínání vnitřní pružiny. Otočná rukojeť by neměla být povolována pod nejmenší hodnotu utahovacího momentu na stupnici. Mohlo by dojít k poškození přístroje. [59]

---

**5.1.3 Zpřesnění měření deformace přírub**

Místo analogového úchylkoměru, který měří deformaci příruby, byl zakoupen digitální úchylkoměr značky SCHUT. Díky němu odpadnou problémy při nulování, odečítání hodnot a měření se zpřesní.



Obr. 42 Digitální úchylkoměr

Digitální úchylkoměr se zapíná a vypíná stisknutím tlačítka ON/OFF. Tlačítko in/mm slouží k nastavení jednotek měření v palcích/milimetrech. Opětovné zmáčknutí tlačítka přepíná do obráceného režimu. Hodnoty na displeji se nulují stiskem tlačítka ZERO. Vynulování lze provádět v jakékoli poloze. Tlačítko ABC/INC slouží ke změně režimu mezi absolutním a přírůstkovým měřením. Tlačítko TOL slouží k nastavení tolerančních polí, která nebudou využívána. Při jeho nechtěném zmáčknutí se na displeji rozsvítí trojúhelník. Ke zrušení této funkce se 3krát zmáčkne tlačítko TOL. [60]

Tab. 1 Technické data digitálního úchylkoměru [60]

|                      |                 |
|----------------------|-----------------|
| Měřicí rozsah        | 0 mm až 12,5 mm |
| Rozlišitelnost       | 0,01 mm         |
| Přesnost             | 0,02 mm         |
| Opakovatelnost       | 0,01 mm         |
| Napájení             | 1x baterie SR44 |
| Max. měřicí rychlost | 1,5 m/s         |
| Provozní teplota     | 0 až 40 °C      |

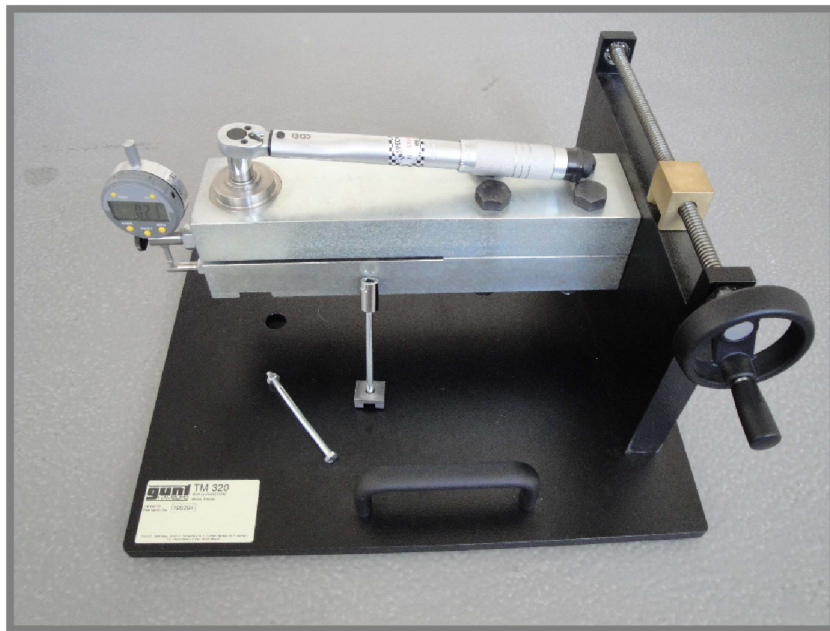
### **Údržba a oprava digitálního úchylkoměru**

Digitální úchylkoměr by měl být udržován v čistém a suchém stavu. Tekutina by jej mohla poškodit. K čištění není vhodné používat organická rozpouštědla. Má-li být přístroj označen, nesmí se použít elektrická jehla. Výměna baterií by měla probíhat při vypnutém měřidle s ohledem na zachování správné polaroty. Objeví-li se po výměně baterie na displeji nesprávné znaky, měla by být baterie vytažena a po 30 sekundách opět vložena do měřiče. [60]

Tab. 2 Problémy digitálního úchylkoměru a jejich odstranění [60]

| <b>problém</b>                        | <b>odstranění</b>   |
|---------------------------------------|---|
| Blikající displej.                    | Baterie je vybitá, nahradit ji za novou.  |
| Při pohybu jezdcem displej nereaguje. | Nastala chyba ve vyhodnocovacím obvodu. Vytáhnout baterii a po 30 s ji znovu vložit do přístroje.           |
| Displej nic nezobrazuje.              | Baterie může být vybitá, nebo může mít špatný kontakt. Znovu vložit baterii, popřípadě ji vyměnit za novou. |





Obr. 43 Upravená experimentální stanice

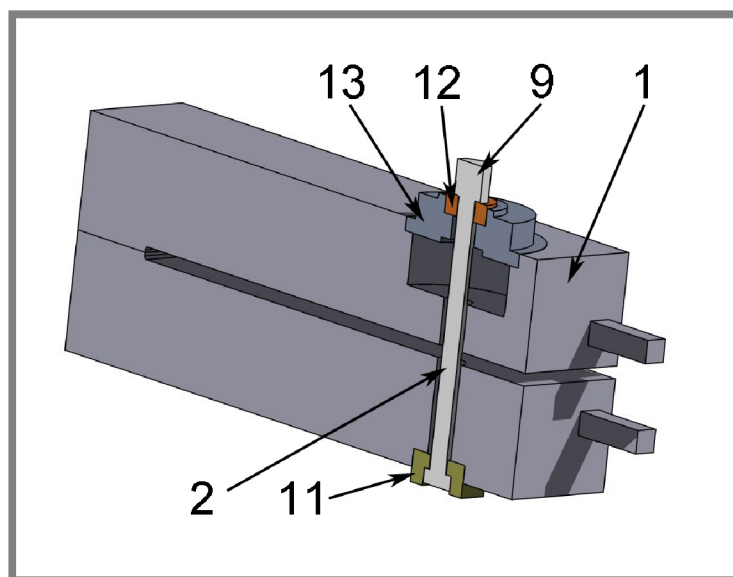
## 5.2 Ověření deformační konstanty numerickým výpočtem

Bylo rozhodnuto, že se ověří deformační konstanta z manuálu numerickým výpočtem MKP. Podnětem k tomuto kroku bylo, že v minulosti firma G.U.N.T. uvedla konstantu k jinému zařízení a ta byla špatná. Tato skutečnost byla zjištěna až při řešení jiné diplomové práce. Bylo by tedy vhodné zkontrolovat deformační konstantu přírub a zjistit, jestli přibližně odpovídá s numerickým výpočtem.

### 5.2.1 Vytvoření modelu MKP

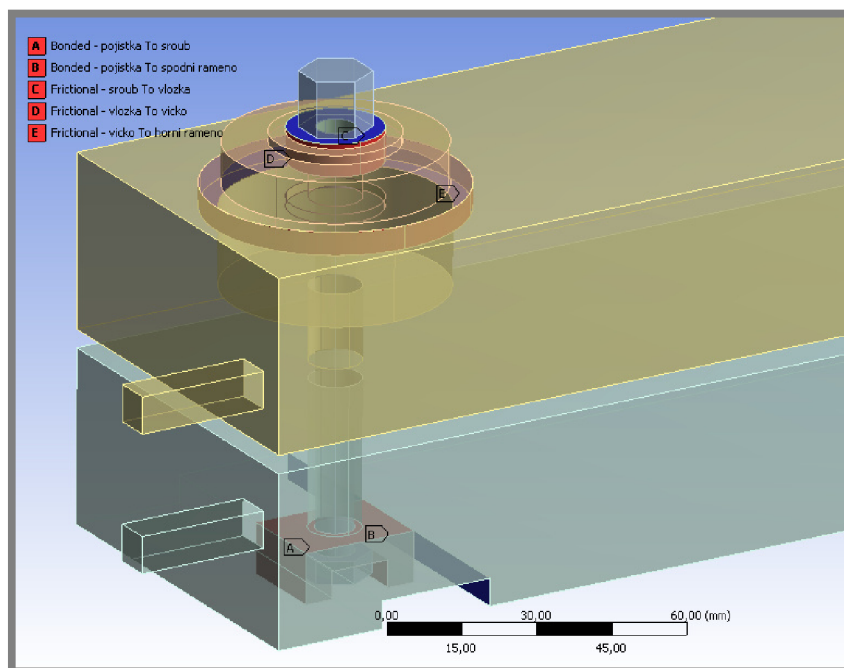
K vytvoření modelu MKP byl použit software Ansys Workbench 12.1 a pro vytvoření vstupní geometrie byl použit software Autodesk Inventor 2008. K odměření rozměrů stanice potřebných pro modelování bylo použito posuvné měřítko. Bylo vytvořeno celkem 6 digitálních součástí. Dolní a horní příruba (1), pojistka (11) proti otáčení šroubu, víčko (13), vložka (12). Šroub (2) s maticí (9) byly vytvořeny jako jedna součást dohromady. Modely obsahují zjednodušení, která by měla šetřit potřebný počet prvků a uzlů při výpočtu MKP, a tím i potřebný čas k výpočtu. Závit na šroubu a v matici nebyl modelován, protože nás na výstupu bude zajímat deformace přírub v místě úchylkoměru (3) a ne deformace a tlaky v závitě. Navíc by modelování závitu na šroubu a v matici přinášelo komplikace při sestavování výpočtového modelu. Nebylo také modelováno ložisko (14), protože vytvořený model vychází z umístění, kdy je víčko (13) vloženo do příruby bez kontaktu s daným ložiskem. Konec přírub (1) v jejich vetknutí nebyl modelován až do konce a na druhé straně byly vysunuty celistvé výčnělky, které přesně končí v měřících bodech úchylkoměru (3). Zanedbána byla i zkosení a zaoblení, kde by byla zbytečně zjemněna síť prvků. Všechny zmíněné součásti byly vymodelovány samostatně a uloženy jako formát .ipt. Dále byly pomocí vazeb poskládány do sestavy stanice a uloženy jako formát .iam. Aby software Ansys Workbench dokázal

pracovat s vytvořenou geometrií, musel se soubor uložit ještě ve formátu .igs, který už může být načten.



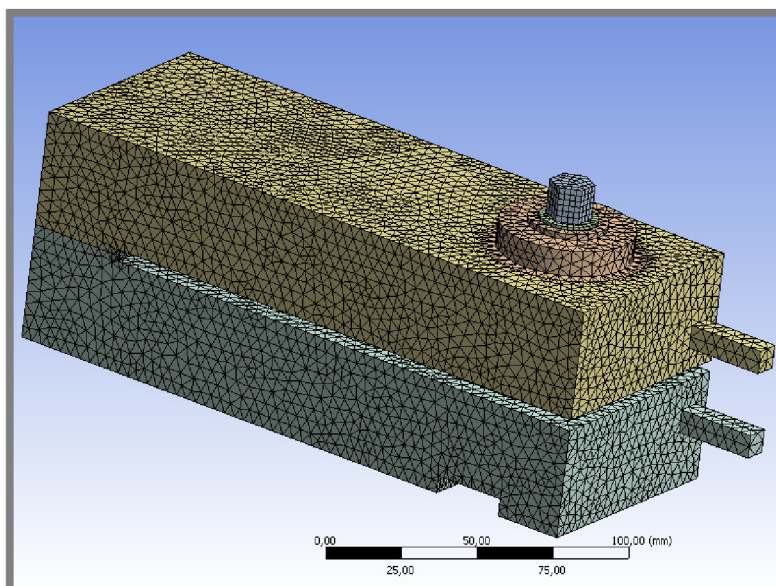
Obr. 44 Digitální model geometrie stanice

Po importování geometrie do Ansys Workbench, byly součásti přejmenovány podle svých jmen. To zajistí především lepší přehlednost při práci s modelem. Kontakty mezi tělesy musely být ručně upraveny, jelikož byly automaticky špatně rozpoznány. Na stykové plochy šroubu (2) a pojistky (11) byl vložen kontakt (A) bonded (spojení sítí). Ten (B) byl také umístěn na stykové plochy pojistky (11) a spodního ramene příruby (1). Mezi hlavou matice (9) a vložkou (12) byl přidán kontakt (C) frictional (kontakt se třením) s koeficientem tření 0,2. Tato vložka je umístěna ve víčku (13) a na stykové plochy těchto dvou součástí byl opět vložen kontakt (D) frictional s koeficientem tření 0,2. Poslední kontakt (E) frictional s koeficientem tření 0,2 byl umístěn na stykové plochy víčka (13) a horního ramene příruby (1). Kontakty nebyly dány na vzájemné stykové plochy přírub (vzdálenější konec od testovaného šroubu). Zde a v části, kde příruby pokračují a jsou vetknuty do stěny, bylo voleno zamezení pohybu vazbou fixed support (zamezení posuvů ve všech směrech), protože se zde příruby nemohou pohnout.



Obr. 45 Kontakty na stykových plochách

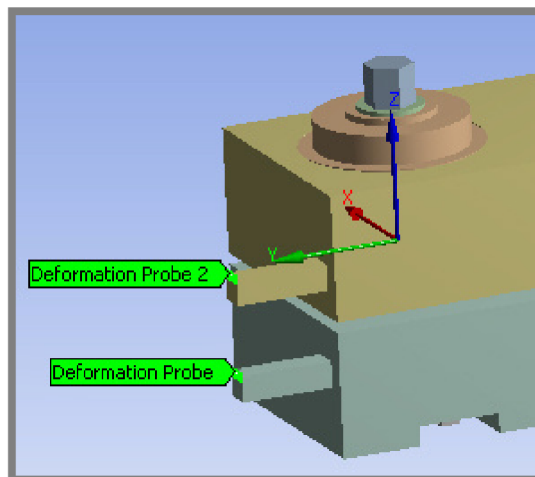
Při vytváření sítě byl pro šroub použit prvek SOLID186, který je dvacetizulový šestistěn. Velikost elementu byla zvolena jako 2 mm. Celý šroub byl vyplněn mapovanou sítí, která je potřeba pro budoucí modelování předpětí. Pro ostatní tělesa byl použit prvek SOLID187, to je desetizulový čtyřstěn. Velikost elementu byla zvolena jako 4 mm a všechny zbývající součásti byly vyplněny volnou sítí. Na kontaktních plochách byla dvojnásobně zjemněna síť. Celý model obsahuje přibližně 190 000 elementu a 290 000 uzlů. Všechny součásti jsou z oceli, a tak jako typ materiálu v Ansysu byla zvolena konstrukční ocel.



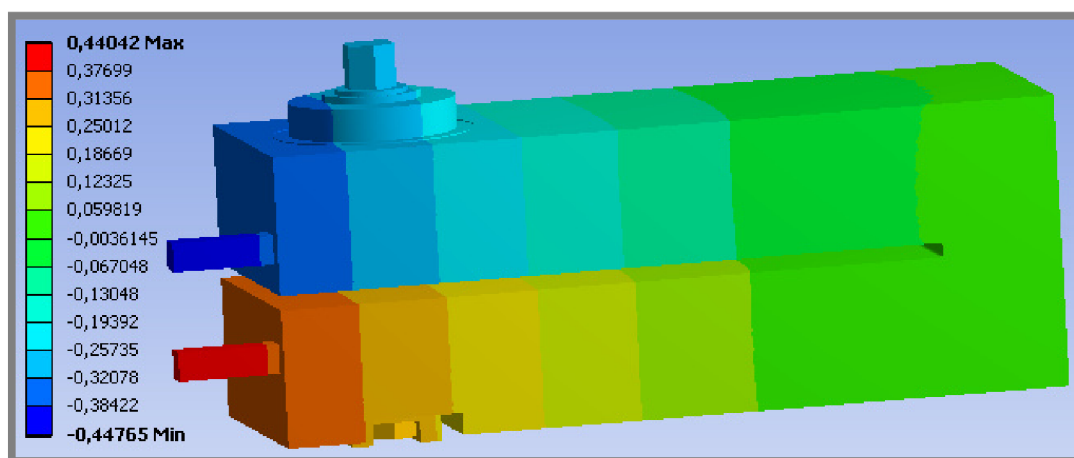
Obr. 46 Ukázka sítě stanice

Před modelováním samotného předpětí bylo zapotřebí vytvořit pomocný souřadný systém. Ten se nachází uvnitř šroubu a současně v polovině jeho délky. Jeho osa Z je totožná s osou šroubu. Nyní do tohoto pomocného souřadného systému mohlo být aplikováno předpětí, které se označuje bolt pretension. Jsou využity prvky PRETS179. Ty rozdělí šroub v pomocném souřadném systému na dvě poloviny. Rozdělení probíhá po hranici mapované sítě tak, aby nebyl rozpůlen element sítě. Dále je předpětí modelováno ve dvou krocích. V prvním kroku je aplikována síla zvoleného předpětí do osy Z pomocného souřadného systému. Podle její velikosti je v rozděleném povrchu mapované sítě vytvořen přesah uzlů obou polovin šroubu. Ve druhém kroku jsou uzly stále v přesahu, jsou předepsány vazební rovnice a celý systém se zamkne. Šroub se nyní chová, jako kdyby byl předepnut danou silou předpětí.

Měřená deformace přírub úchylkoměrem na stanici je přesně v místech dvou výběžků z přírub. Aby zde mohla být změřena deformace na výpočtovém modelu, byly použity dva prvky deformation probe (měření posuvů v ose). Ty byly umístěny na hrany (místo měření úchylkoměrem) a nastaveny tak, aby měřily deformaci (posuvy) v ose Z, což je osa rovnoběžná s osou šroubu.



Obr. 47 Místa měření posuvů v ose Z



Obr. 48 Deformace (posuv) stanice v ose šroubu při předpětí 14 000 N



### 5.2.2 Zhodnocení výsledků MKP

U prvku s předpětím (bolt pretension) byla nastavena síla předpětí 14 000 N. Ta byla zvolena libovolně z rozsahu 0 N až 20 000 N (rozsah je podle dodané deformační konstanty). Po vyvození předpětí se spodní deformation probe deformoval v kladném směru osy Z o hodnotu 0,4402 mm. Vrchní deformation probe 2 se deformoval v záporném směru osy Z o 0,4476 mm. Celková vypočtená deformace přírub je tedy přibližně 0,887 mm. Dle deformační konstanty z manuálu 20 kN/1 mm by při předpětí 14 000N měla nastat deformace přírub 0,7 mm. Rozdíl mezi udávanou deformací a deformací vypočtenou na modelu MKP je zhruba 0,187 mm.

Bylo vyzkoušeno několik úprav modelu za účelem zpřesnění vypočtené deformace. Dvojnásobně se zjemnila síť a šroub byl vyplněn elementy o velikosti 1 mm a ostatní síť elementy o velikosti 2 mm. Dále byla testována velikost koeficientu tření na kontaktech frictional v rozmezí od 0,1 do 0,2 (jak je udáváno v literatuře [32]). Jelikož šroub odpovídá pouze hrubému válcovému modelu, bylo testováno zúžení průměru v závitové části. Zúžený průměr odpovídal nosnému průřezu v závitě šroubu  $A_s$ . Model by tak měl lépe popisovat tuhost šroubu.

Ve všech zmíněných úpravách a jejich různých kombinacích nebylo zpřesnění deformace nijak zřetelné. Rozdíly se odehrávaly v řádu desetitisícin. To je pro náš účel nepodstatné, protože digitálním úchylkoměrem měříme deformaci v řádu setin. V poslední řadě byla také testována různá velikost předpětí a vypočtená deformace byla porovnávána s deformací udávanou dle deformační konstanty v manuálu. Žádnou navrženou změnou výpočtového modelu nebylo dosaženo požadovaného zpřesnění a odchylka od hodnot z manuálu stále činí přibližně stejné procentuální navýšení deformace a to je 25 %. Konstatování faktu, je-li navržená deformační konstanta z manuálu dostatečně přesná, bude možné až po praktickém měření a porovnání naměřených hodnot s teoretickými a numerickými. Bude tedy provedeno v následující kapitole.

Celkový objem dat modelu MKP má zhruba 1,5 Gb. Výpočet probíhal na počítači DualCore AMD Athlon 64 X2, 2 600 MHz s pracovní pamětí 2 048 MB. Při různých kombinacích úprav modelu samotný výpočet trval vždy do jedné hodiny.

### 5.3 Experimentální měření na stanici a vyhodnocení výsledků

Na stanici bylo provedeno experimentální měření závislosti vyvozeného předpětí na utahovacím momentu. Bylo zvoleno 5 utahovacích momentů (5, 9, 13, 17 a 22,5 Nm) na šroubu M8. Deformace přírub byla měřena zakoupeným digitálním úchylkoměrem a předpětí bylo vypočteno pomocí deformační konstanty (20 kN/1 mm) z manuálu. Utahovací momenty byly vyvozeny zakoupeným momentovým klíčem. První měření proběhla při uspořádání stanice, kdy je tření pod maticí. Utahovací momenty byly postupně vyvozeny a zaznamenaly se deformace přírub (posuv rovnoběžný s osou šroubu). Experiment byl celkem 3krát zopakován a odpovídající deformace přírub pro příslušné momenty se lišily. To koresponduje s faktem, který je udáván v literatuře [19, 22], že předepínaný šroub by měl být pokaždé opatřen vhodným mazivem. Není-li tomu tak, objevuje se rozptyl předpětí při jeho vyvozování a v některých případech dané předpětí nelze ani vyvodit. Změřené deformace přírub byly poznamenány do tabulky 3 a byl z nich udělán aritmetický průměr. Z tohoto průměru bylo díky deformační konstantě stanoveno odpovídající předpětí ve šroubu. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3.

Tab. 3 Změřené deformace (posuv) přírub s třením pod maticí

| utahovací moment (Nm) | deformace přírub (mm) | deformace přírub (mm) | deformace přírub (mm) | aritmetický průměr deformace | odpovídající předpětí (N) |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|---------------------------|
| 5                     | 0,09                  | 0,09                  | 0,10                  | 0,093                        | 1 860                     |
| 9                     | 0,17                  | 0,19                  | 0,18                  | 0,18                         | 3 600                     |
| 13                    | 0,24                  | 0,25                  | 0,30                  | 0,263                        | 5 260                     |
| 17                    | 0,33                  | 0,41                  | 0,40                  | 0,38                         | 7 600                     |
| 22,5                  | 0,47                  | 0,54                  | 0,52                  | 0,51                         | 10 200                    |

Další měření proběhla při uspořádání stanice, kdy se vložka s víčkem otáčí zároveň s maticí a tření pod maticí je tedy minimalizováno (bez tření pod maticí). Byly použity stejné momenty (5, 9, 13, 17 a 22,5 Nm) a celý experiment se opět 3krát zopakoval. Byl udělán aritmetický průměr z naměřených hodnot a z něho bylo opět díky deformační konstantě stanoveno předpětí. Hodnoty uvádí tabulka 4.

Tab. 4 Změřené deformace (posuv) přírub bez tření pod maticí

| utahovací moment (Nm) | deformace přírub (mm) | deformace přírub (mm) | deformace přírub (mm) | aritmetický průměr deformace | odpovídající předpětí (N) |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|---------------------------|
| 5                     | 0,10                  | 0,18                  | 0,12                  | 0,133                        | 2 660                     |
| 9                     | 0,19                  | 0,22                  | 0,36                  | 0,256                        | 5 120                     |
| 13                    | 0,32                  | 0,35                  | 0,48                  | 0,383                        | 7 660                     |
| 17                    | 0,55                  | 0,48                  | 0,59                  | 0,54                         | 10 800                    |
| 22,5                  | 0,75                  | 0,66                  | 0,82                  | 0,743                        | 14 860                    |

Deformace přírub a vyvozené předpětí při tření pod maticí jsou menší, než když je tření pod maticí minimalizováno („bez tření“). Tento fakt koresponduje s literaturou [19, 22], kde se uvádí, že tření pod maticí má velký vliv na vyvozené předpětí. Pro snížení tření pod maticí a tím vyvození většího předpětí ve šroubu je doporučováno použít mazivo i zde.

Je-li známo požadované předpětí, může se vypočítat potřebný utahovací moment pro jeho vyvození. Princip výpočtu spočívá v překonání tření pod maticí a tření v závitě. Podrobnější vysvětlení lze nalézt v literatuře [6, 32]. Po matematické úpravě vzniká vzorec pro potřebný utahovací moment.

$$M = \left[ \left( \frac{d_2}{2d} \frac{\tan(\psi) + f \frac{1}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}}{1 - f \tan(\psi) \frac{1}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}} \right) + 0,625 f_0 \right] F_i d$$



kde:

|          |      |                                |
|----------|------|--------------------------------|
| $M$      | [Nm] | je utahovací moment            |
| $d_2$    | [mm] | - střední průměr závitu šroubu |
| $d$      | [mm] | - velký průměr závitu šroubu   |
| $\psi$   | [°]  | - úhel stoupání závitu         |
| $\alpha$ | [°]  | - vrcholový úhel závitu        |
| $f$      | [-]  | - součinitel tření pod maticí  |
| $f_0$    | [-]  | - součinitel tření v závitu    |
| $F_i$    | [N]  | - předpětí ve šroubu           |

$$\psi = \tan\left(\frac{P}{\pi \cdot d_2}\right)$$

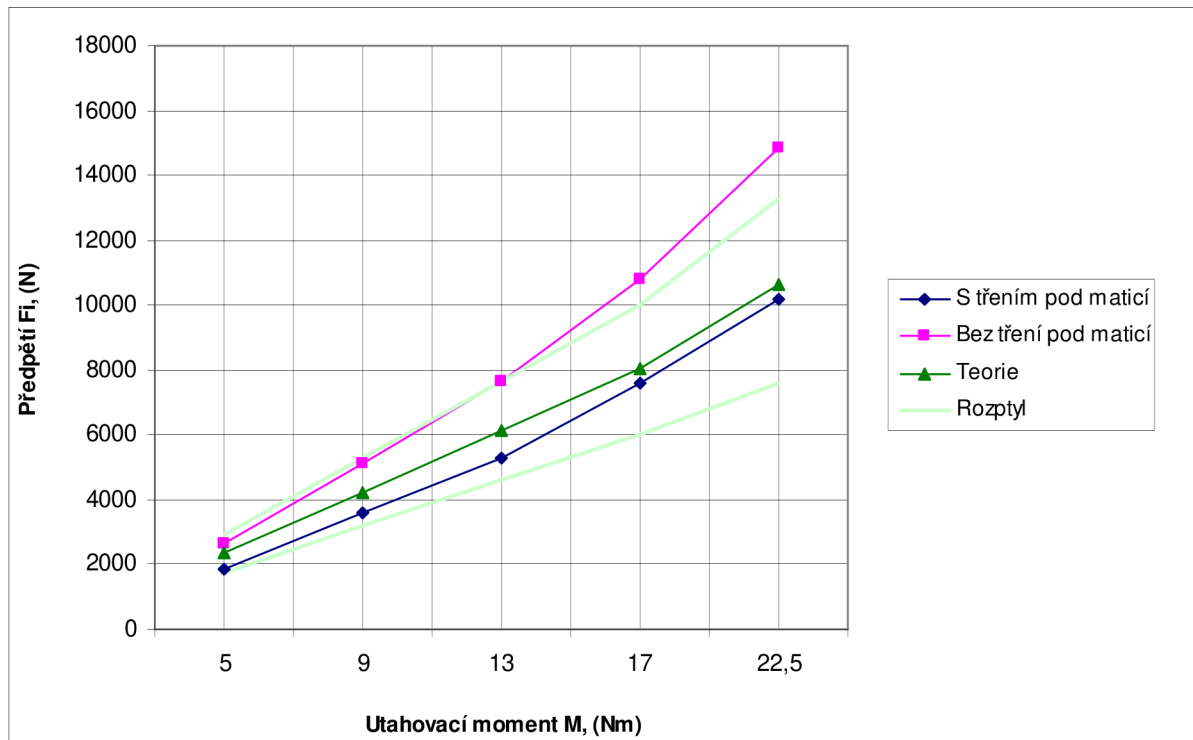
kde:

|        |      |                                |
|--------|------|--------------------------------|
| $\psi$ | [°]  | je úhel stoupání závitu        |
| $P$    | [mm] | - rozteč závitu                |
| $d_2$  | [mm] | - střední průměr závitu šroubu |

Zvýše uvedeného vztahu bylo vypočteno teoretické předpětí, které by mělo být vyvozeno při použití utahovacích momentů (5, 9, 13, 17 a 22,5 Nm). Normalizované hodnoty pro metrický závit byly použity ze strojnických tabulek. Literatura [6, 32] udává rozptyl v koeficientech tření ( $f = 0,15$  až  $0,25$ ,  $f_0 = 0,1$  až  $0,2$ ) a tak byly zvoleny hodnoty  $f = 0,23$  a  $f_0 = 0,19$ . Byly zvoleny vyšší hodnoty, jelikož třecí povrchy jsou opotřebovanější a výsledky s nimi se více blížily teoretickým výpočtům. Změřená a vypočtená předpětí byla spolu porovnána. Literatura [6, 32] udává informaci, že je-li k vyvození předpětí použit momentový klíč, je přesnost vyvození předpětí  $\pm 25\%$ . Od vypočteného předpětí byl tedy stanoven možný rozptyl, kterého se při utahování momentovým klíčem může dosáhnout. Porovnání hodnot ukazuje tabulka 5.

Tab. 5 Tabulka porovnání předpětí

| utahovací moment (Nm) | změřené předpětí s třením (N) | změřené předpětí bez tření (N) | teoretické předpětí (N) | teoretický rozptyl předpětí (N) |
|-----------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| 5                     | 1 860                         | 2 660                          | 2 358                   | 1 769 až 2 948                  |
| 9                     | 3 600                         | 5 120                          | 4 244                   | 3 183 až 5 305                  |
| 13                    | 5 260                         | 7 660                          | 6 130                   | 4 598 až 7 663                  |
| 17                    | 7 600                         | 10 800                         | 8 016                   | 6 012 až 10 020                 |
| 22,5                  | 10 200                        | 14 860                         | 10 610                  | 7 598 až 13 263                 |



Graf 1 Závislost předpětí na utahovacím momentu

Výsledky byly zpracovány do grafu. Tmavě zelená křivka představuje teoretické předpětí, které by mělo nastat při dosažení daných momentů. Světle zelené křivky představují možný 25 % rozptyl. Ohraničují tedy pásmo, ve kterém by se mělo vyskytovat vyvozené předpětí. Modrá křivka představuje předpětí, které bylo na stanici vyvozeno (s třením pod maticí). Ružová křivka představuje předpětí vyvozené na stanici, kdy nebylo tření pod maticí. Experimentální měření potvrdilo teorii. Při předepínání šroubu bez použití maziva nebylo nikdy dosaženo teoretického předpětí. Bylo ho však dosaženo v udávaném rozptylu 25 %. V praxi je vždycky tření pod maticí, a tak křivka z hodnot, které byly změřeny bez tření pod maticí, má pouze informativní charakter. Ukazuje ale fakt, že při utahování musí být větší část práce vyvozena na překonání tření pod maticí. Ze vzorce uvedeného níže byla také vypočtena účinnost šroubu.

$$\psi = \tan\left(\frac{P}{\pi \cdot d_2}\right) = \tan\left(\frac{1,25}{\pi \cdot 7,188}\right) = 3,17^\circ$$

$$\eta = \frac{F_i \cdot d_2 \cdot \tan(\psi)}{2M} = \frac{7600 \cdot 0,007188 \cdot \tan(3,17)}{2 \cdot 17} = 8,8 \%$$

kde:

- $\eta$  [%] je účinnost šroubu
- $F_i$  [N] - předpětí ve šroubu
- $d_2$  [mm] - střední průměr závitu šroubu
- $\psi$  [°] - úhel stoupání závitu
- $M$  [Nm] - utahovací moment

Dle deformační konstanty z manuálu by při deformaci přírub 0,5 mm mělo nastat předpětí 10 kN. Podle výpočtů MKP by při stejné deformaci mělo nastat předpětí menší přibližně 8 kN. To znamená, že experimentálně změřené závislosti předpětí na utahovacím momentu (modrá křivka) by se v grafu posunula ještě níže dál od teorie. Bylo provedeno více měření, které byly uvedeny v kapitole výše a také měření, které byly provedeny pro vyřešení edukačních úloh. V některých případech by se snížení předpětí, jak udává numerický výpočet, teorii oddalovalo a v některých zase přibližovalo. Je tomu tak především z rozptylu naměřených deformací (posuvů rovnoběžných s osou šroubu) přírub na stanici. Ten je zapříčiněn metodou utahování momentovým klíčem a také absencí maziva. V globálním pohledu se numerický výpočet shoduje s deformační konstantou z manuálu. Proto lze tedy tvrdit, že i přes rozptyl vyvozených deformací na stanici je dodaná deformační konstanta správná.

### 5.4 Návrh edukační úlohy

Cílem navržené úlohy je seznámit studenty se vzájemnou relací mezi utahovacím momentem a vzniklou silou předpětí. Dále studenti zjistí účinnost šroubu a jaký má vliv tření pod utahovanou maticí na vyvozené předpětí. Budou také seznámeni s momentovým klíčem, který je v praxi hojně rozšířený. Úloha je připravena pro šrouby M8 a M6. Přiřazení průměrů šroubů do skupin studentům je plně v kompetenci vyučujícího. Aby se během cvičení na stanici mohly vystřídat všechny skupiny studentů, navrhl jsem pouze jedno odměření pro daný utahovací moment. Studenti tedy nebudou provádět více měření deformací pro jeden utahovací moment a z nich počítat aritmetický průměr, tak jak bylo prováděno při experimentálním měření v praktické části této diplomové práce. Z časového důvodu jsou také studentům dány všechny potřebné vzorce a veličiny. Ti se pak budou moci více soustředit na samotný experiment a dále nebude hrozit pokažení stanice vlivem jejího přetížení, které by mohlo vzniknout ze špatně nalezených vstupních hodnot. Záleží na cvičícím, jestli jim je všechny poskytne. Pomocí součinitele předpětí  $k_R$  bude napětí od předpětí odpovídat procentuálnímu napětí ve šroubu při smluvní mezi kluzu. Jeho hodnota a maximální přípustná deformace přírub byla zvolena tak, aby nedocházelo k poškození testovaného šroubu.

#### Zadání:

Vypočtete sílu předpětí a potřebný utahovací moment dle zadaných hodnot. Proveďte měření předpětí, kdy je tření pod hlavou matice a také kdy je minimalizováno. Dále vypočtete účinnost šroubu. Porovnejte teoretické předpětí s předpětím naměřeným (při tření pod hlavou matice a bez tření pod hlavou matice) a vyvoďte z toho závěr.

#### Zadané hodnoty pro šroub M8:

|                                       |                              |
|---------------------------------------|------------------------------|
| Výpočtový průřez šroubu:              | $A_s = 36,6 \text{ mm}^2$    |
| Smluvní mez kluzu:                    | $R_{P0,2} = 640 \text{ MPa}$ |
| Součinitel předpětí:                  | $k_R = 0,38$                 |
| Součinitel tření v závitech:          | $f = 0,23$                   |
| Součinitel tření pod maticí:          | $f_0 = 0,19$                 |
| Rozteč závitu:                        | $P = 1,25 \text{ mm}$        |
| Střední průměr závitu šroubu:         | $d_2 = 7,188 \text{ mm}$     |
| Velký průměr závitu šroubu:           | $d = 8 \text{ mm}$           |
| Vrcholový úhel závitu:                | $\alpha = 60^\circ$          |
| Maximální přípustná deformace přírub: | $0,85 \text{ mm}$            |

#### Zadané hodnoty pro šroub M6:

|                                       |                              |
|---------------------------------------|------------------------------|
| Výpočtový průřez šroubu:              | $A_s = 20,1 \text{ mm}^2$    |
| Smluvní mez kluzu:                    | $R_{P0,2} = 640 \text{ MPa}$ |
| Součinitel předpětí:                  | $k_R = 0,45$                 |
| Součinitel tření v závitech:          | $f = 0,23$                   |
| Součinitel tření pod maticí:          | $f_0 = 0,19$                 |
| Rozteč závitu:                        | $P = 1 \text{ mm}$           |
| Střední průměr závitu šroubu:         | $d_2 = 5,35 \text{ mm}$      |
| Velký průměr závitu šroubu:           | $d = 6 \text{ mm}$           |
| Vrcholový úhel závitu:                | $\alpha = 60^\circ$          |
| Maximální přípustná deformace přírub: | $0,48 \text{ mm}$            |

1) Vypočtete potřebné předpětí:

$$F_i = k_R R_{p0,2} A_S$$

2) Vypočtete úhel stoupání závitu:

$$\psi = \arctan\left(\frac{P}{\pi \cdot d_2}\right)$$

3) Vypočtete teoretický potřebný utahovací moment:

$$M = \left[ \left( \frac{d_2}{2d} \frac{\tan(\psi) + \frac{f}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}}{1 - \frac{f \tan(\psi)}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}} \right) + 0,625 f_0 \right] F_i d$$

4) Vypočtený utahovací moment rozdělte na 5 momentů. Tyto momenty by měly stoupat přibližně po stejné hodnotě. Nejmenší z nich nesmí být menší než 5 Nm.

5) Pro tyto momenty vypočtete teoretické vyvozené předpětí ze vzorce pro potřebný utahovací moment.

6) Na experimentální stanici postupně vyvoďte 5 navržených momentů a vždy odečtěte vzniklé předpětí z digitálního úchylkoměru. Deformaci 1 mm přírub odpovídá předpětí 20 000 N. Měření proveďte při uspořádání stanice, kdy je tření pod hlavou matice, a taky při uspořádání, kdy je tření pod maticí minimalizováno.

7) Vypočtete účinnost šroubu z naměřených hodnot:

$$\eta = \frac{F_i d_2 \tan(\psi)}{2M}$$

8) Vytvořte graf závislosti síly předpětí (teoretické, změřené s třením pod hlavou, změřené s minimalizovaným třením pod hlavou) na vámi navržených utahovacích momentech.

9) Výsledky zpracujte formou protokolu a uveďte všechny naměřené a vypočtené hodnoty s použitými vzorci. Napište závěr z měření a rozeberte průběh závislostí předpětí na utahovacím momentu.

Vyřešení úlohy pro obě zadání se nachází v příloze č. 1 a č 2.

### 5.5 Postup práce při řešení úlohy

Součástí stanice a jejich vzájemné uložení je popsáno na přiloženém posteru (příloha č.4), který bude vystaven v laboratoři a dále ve výukové prezentaci (příloha č.5), která bude přednesena studentům během cvičení.

- 1) Umístěte horní víčko do vrchní příruby jeho větším průměrem (bude tření pod maticí) nebo na ložisko jeho menším průměrem (tření pod maticí bude minimalizováno).
- 2) Do víčka umístěte vložku.
- 3) Na testovaný šroub nasuňte pojistku proti otáčení tak, aby bylo zabráněno protáčení hlavy šroubu
- 4) Šroub prostrčte otvorem ze spodní strany příruby tak, aby pojistka na šroubu zapadla do drážky v přírubě.
- 5) Na závit šroubu ručně našroubujte matici a jemně ji dotáhněte.
- 6) Na momentový klíč nasad'te nástrčnou hlavu. Pro šroub M8 má označení 13 mm a pro šroub M6 má označení 10 mm.
- 7) Povolte aretační šroub na momentovém klíči a na rukojeti nastavte požadovaný utahovací moment. Po jeho nastavení aretační šroub zpátky utáhněte.
- 8) Pro utahování matice přepněte páčku na momentovém klíči do pravé krajní polohy.
- 9) Zapněte digitální úchylkoměr stisknutím tlačítka „ON/OFF“.
- 10) Svítí-li na displeji v pravém horním rohu nápis „in“, zmáčkněte tlačítko „in/mm“ pro přepnutí měřicí jednotky na milimetry.
- 11) Je-li potřeba vynulovat digitální úchylkoměr, zmáčkněte tlačítko „ZERO“.
- 12) Momentovým klíčem pomalu a plynule utahujte matici testovaného šroubu.
- 13) Objeví-li se v rukojeti cvaknutí, okamžitě přestaňte utahovat. Bylo dosaženo nastaveného utahovacího momentu.
- 14) Poznamenejte deformaci přírub z digitálního úchylkoměru pro daný moment.
- 15) Pro povolení matice přepněte páčku na momentovém klíči do levé krajní polohy.



## 6 ZÁVĚR

Tato diplomová práce může být využita jako teoretický podklad pro studenty do jejich výuky. Z tohoto důvodu je také začátek práce věnován širší problematice šroubových spojů obecně a šroubům s předpětím. Studenti zde mohou nalézt užitečné informace, které jim poslouží při studiu a řešení problematiky předepjatých šroubů.

Na Ústavu konstruování se částečně zavádí problémově orientovaná výuka. Za tímto účelem byla také zakoupena experimentální stanice TM 320 pro modelování předepjatých šroubových spojů. Na této stanici byly zjištěny funkční nedostatky, které byly odstraněny pomocí inovace. K zařízení byl dokoupen digitální úchylkoměr, momentový klíč, šrouby M6 s maticemi a byla vyrobena nová pojistka proti otáčení šroubu. Tyto kroky vedly ke zpřesnění měření, jeho urychlení a rozšíření využitelnosti stanice o možnost pracovat s více průměry šroubů. Byla ověřena dodaná deformační konstanta z manuálu s numerickým výpočtem MKP. Vypočtená hodnota se lišila přibližně o 25 %. Pro určení správnosti deformační konstanty bylo potřeba provést na stanici více měření. Vyvozené předpětí pro stejné utahovací momenty se lišily. Některé, ve srovnání s teorií, korespondovaly s výpočtem MKP a některé zase s deformační konstantou dodanou z manuálu. Ze získaných údajů vyplývá fakt, který potvrzuje teorii literatury. To znamená, že není-li předepínaný šroub mazán a je-li utahován momentovým klíčem, nastává velký rozptyl vyvozeného předpětí. Ten může činit až 25 % od teoretického předpětí. Proto bylo konstatováno, z výsledků MKP a měření na stanici, že je dodaná deformační konstanta správná.

Pro studenty byla vytvořena nová kompletní úloha. V této úloze se seznámí se závislostí mezi utahovacím momentem a předpětím ve šroubu. Dále prakticky zjistí účinnost šroubu a vliv tření pod utahovanou maticí na vyvozené předpětí. Také se naučí zacházet s momentovým klíčem, který je v praxi často používaný. Pro edukační úlohu byla vytvořena dvě zadání, a to se šroubem M8 a také se šroubem M6, který má jiné vstupní parametry. Pro obě zadání byla úloha odzkoušena a vyřešena. Jako podpora výuky byla vytvořena prezentace, kterou vyučující přednese v hodině a studenty tak seznámí s problematikou a zadáním úlohy. Byl také vytvořen plakát s podrobným popisem stanice a postupem práce pro řešení úlohy.

Do budoucna by bylo vhodné pokračovat v inovaci stanice. Například použít jinou metodu měření předpětí. Tou by mohla být tenzometrie nebo ultrazvuk. V úvahu přichází i doplnit experiment novou realizací předpětí. Například metodou úhlu pootočení matice, která by využívala již zakoupený momentový klíč. Zajímavá může být i konstrukční úprava stanice, která by po vyvození předpětí mohla simulovat provozní zatížení ve šroubu.

**7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

- [1] VOLEK, František. *Základy konstruování a části strojů 1*. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, 2009. 168 s.
- [2] *Stavba a provoz strojů* [online]. Kladno : Střední průmyslová škola a Vyšší odborná, [200?] [cit. 2010-11-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.spskladno.cz/stahuj.php?id=2241>>.
- [3] *Skola.spectator* [online]. [cit. 2010-12-10]. Šrouby a šroubové spoje. Dostupné z WWW: <[http://skola.spectator.cz/3\\_SEMESTR/Z%20E1kl.stoj%20EDrenstv%20ED/PrednaskyRAW/p8.pdf](http://skola.spectator.cz/3_SEMESTR/Z%20E1kl.stoj%20EDrenstv%20ED/PrednaskyRAW/p8.pdf)>.
- [4] MADUSCHKA, L. *Beanspruchung von Schraubenverbindungen und zweckmässige Gestaltung der Gewindeträger*. Forschung-Ingenieurwesens, 1936. 299-305 s.
- [5] BIRGER, I. A. *Rasčet rezbovych sojedinenij*. Moskva, 1959.
- [6] SHIGLEY, Joseph E.; MISCHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard G. *Konstruování strojních součástí*. Vysoké učení technické v Brně : VUTIUUM, 2010. 1186 s.
- [7] *Ústav konstruování* [online]. [cit. 2010-12-15]. Přednáška-Šrouby a šroubové spoje. Dostupné z WWW: <[http://old.uk.fme.vutbr.cz/index5e20.html?akce=3&sekce=vyuka&ln=cs&zobraz\\_predmet=1](http://old.uk.fme.vutbr.cz/index5e20.html?akce=3&sekce=vyuka&ln=cs&zobraz_predmet=1)>.
- [8] FOLTA, Zdeněk. *Rozložení napětí na jednotlivých závitech šroubu a matice*. Vysoká škola báňská, [200?]. 4 s. Dizertační práce. Vysoká škola báňská, Fakulta strojní. Dostupné z WWW: <[http://www.347.vsb.cz/staff/folta/Veda\\_a\\_vyzkum/ROZLOŽENÍ%20NAPĚTÍ%20NA%20JEDNOTLIVÝCH%20ZÁVITECH%20ŠROUBU%20A%20MATICE.pdf](http://www.347.vsb.cz/staff/folta/Veda_a_vyzkum/ROZLOŽENÍ%20NAPĚTÍ%20NA%20JEDNOTLIVÝCH%20ZÁVITECH%20ŠROUBU%20A%20MATICE.pdf)>.
- [9] POSPIŠIL, František. *Závitová a šroubová spojení*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1968. 256 s.
- [10] *Šroubové spoje* [online]. [cit. 2010-12-15]. Ostrava : Vysoká škola báňská, Technická univerzita Ostrava, [200?]. 6 s. Podklady ke studiu. Dostupné z WWW: <<http://homel.vsb.cz/~ros11/Ocel/03a%20Sroubove%20spoj.pdf>>.
- [11] RYBÁŘ, Pavel. *Metody zhotovení závitů v ocelových tenkostěnných součástech*. Fakulta strojního inženýrství, 2009. 40 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [12] STRAKA, Jiří. *Možnosti výroby závitů v malé strojírenské firmě*. Fakulta strojního inženýrství, 2010. 86 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [13] *Thermdrill : firemní stránky* [online]. [cit. 2011-02-1]. Dostupné z WWW: <<http://www.thermdrill.cz/jak-to-funguje/princip-cinnosti/>>.
- [14] *Kres : firemní stránky* [online]. [cit. 2011-02-1]. Dostupné z WWW: <[http://www.kres.cz/akce/Thermdrill\\_2009-03\\_CZ.pdf](http://www.kres.cz/akce/Thermdrill_2009-03_CZ.pdf)>.
- [15] KRÍŽ, Rudolf. *Stavba a provoz strojů 1 : Části strojů*. Praha : SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1977
- [16] *Mitcalc : Mechanical, Industrial and Technical Calculations* [online]. c2010 [cit. 2011-02-9]. Dostupné z WWW: <<http://www.mitcalc.cz/doc/boltcon/help/cz/boltcon.htm>>.

- [17] RÓDER, Václav. *Spoje ocelových konstrukcí* [online]. [200?] [cit. 2011-02-10]. Dostupné z WWW: <<http://ocel.wz.cz/sroubove-spoje/>>.
- [18] STUDNIČKA, Jiří. *Ocelové konstrukce*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2004. 144 s.
- [19] WALDA, F., et al. *K utahování šroubů třecích spojů*. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební [online]. [200?] [cit. 2011-02-11]. Dostupné z WWW: <[http://people.fsv.cvut.cz/~wald/Clanky%20v%20Adobe%20\(Pdf\)/22\\_Wald\\_Utahovani\\_sroubu\\_W12.pdf](http://people.fsv.cvut.cz/~wald/Clanky%20v%20Adobe%20(Pdf)/22_Wald_Utahovani_sroubu_W12.pdf)>.
- [20] THUM, A.; WÜRGES, M. *Die zweckmässige Vorspannung in Schraubenverbindungen*. Deutsche : Kraftfahrtforschung, 1940.
- [21] MARTINEC, Robin. *Deformačně-napjatostní analýza šroubu svorníku parogenerátoru VVER 440 pomocí MKP*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2006. 60 s. Diplomová práce.
- [22] LEV, Jaroslav. *Mazání při montáži strojů* [online]. [s.l.] : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, [200?]. 11 s. Semestrální práce. Dostupné z WWW: <[http://dl.uk.fime.vutbr.cz/zobraz\\_soubor.php?id=514](http://dl.uk.fime.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=514)>.
- [23] KLIMEŠ, Pavel. *Části a mechanismy strojů I*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2002. 96 s.
- [24] TEN BOSCH, M. *Berechnung der Maschinenelemente*. Berlin : Heidelberg, 1951.
- [25] FINDENSEN, F. *Neuzeitliche Maschinenelemente*. Zürich : Schweizer Druck und Verlaghaus, 1951.
- [26] WIEGANG, H.; ILGNER, H. *Berechnung und Gestaltung von Schraubenverbindungen*. Berlin, Heidelberg, 1962.
- [27] WILEMAN, J; CHOUDHURY, M; GREEN, I. Computation of Member Stiffness in Bolted Connections. *Journal of mechanical design*. 1991, 113, s. 432-437. ISSN 0161-8458.
- [28] Niemann, G. *Maschinenelemente*. Berlin, Heidelberg, 1961.
- [29] ŠIŠOLÁK, E. *Části strojov : Spoje*. Skripta SVŠT v Bratislavě : SVTL, 1956.
- [30] KOCHMAN, J. *Části strojů : Díl I*. Praha : NČSAV, 1956.
- [31] *Boltscience : firemní stránky* [online]. c2011 [cit. 2011-03-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.boltscience.com/>>.
- [32] *RoyMech : engineering information* [online]. 2010 [cit. 2011-03-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.roymech.co.uk/>>.
- [33] *Digiboss : firemní stránky* [online]. c2009 [cit. 2011-03-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.digiboss.cz/Momentovy-klic-3-8-20-100-Nm/d40385/>>.
- [34] *Fastenal : Fastenal engineering & Design support* [online]. 2009 [cit. 2011-03-19]. Dostupné z WWW: <<http://www.fastenal.com/content/feds/pdf/Article%20-%20Bolted%20Joint%20Design.pdf>>.
- [35] ČSN 73 1495:Šroubové třecí spoje ocelových konstrukcí. Praha:ČNI, 2001. 20 s.
- [36] *Torcup : firemní stránky* [online]. c2007 [cit. 2011-03-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.torcup.com/>>.
- [37] *Nibtorque : firemní stránky* [online]. 2004 [cit. 2011-03-16]. Dostupné z WWW: <<http://www.nibtorque.com/>>.
- [38] *Hydratight : firemní stránky* [online]. c2011 [cit. 2011-03-16]. Dostupné z WWW: <<http://www.hydratight.com/>>.

- [39] File:Hydraulic torque wrench.png. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2011-03-16]. Dostupné z WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Hydraulic\\_torque\\_wrench.png](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Hydraulic_torque_wrench.png)>.
- [40] *Bolt Tech : firemní stránky* [online]. c2008 [cit. 2011-03-16]. Dostupné z WWW: <<http://www.bolttech.com/>>.
- [41] *Rapid-torc : firemní stránky* [online]. c2010 [cit. 2011-03-17]. Dostupné z WWW: <<http://www.rapidtorc.com/>>.
- [42] *Niara : firemní stránky* [online]. c2009 [cit. 2011-03-18]. Dostupné z WWW: <<http://www.niara.cz/>>.
- [43] *Belleville Springs : firemní stránky* [online]. 200? [cit. 2011-03-20]. Dostupné z WWW: <<http://www.bellevillesprings.com/>>.
- [44] Belleville washer#cite note-smith-1. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2011-03-20]. Dostupné z WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Belleville\\_washer#cite\\_note-smith-1](http://en.wikipedia.org/wiki/Belleville_washer#cite_note-smith-1)>.
- [45] *SmartBolts : firemní stránky* [online]. c2011 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z WWW: <<http://www.smartbolts.com/>>.
- [46] *Rotabolt : firemní stránky* [online]. 2004 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z WWW: <<http://www.rotabolt.co.uk/>>.
- [47] *Applied Bolting : firemní stránky* [online]. c2011 [cit. 2011-03-22]. Dostupné z WWW: <<http://www.appliedbolting.com/>>.
- [48] *TurnaSure : firemní stránky, Instruction Manual for installing high-strength bolts with Direct Tension Indicators* [online]. c2007 [cit. 2011-03-22]. Dostupné z WWW: <<http://www.turnasure.com/pdf/USMetric-3016.pdf>>.
- [49] *Windpower engineering : The technical support resource for wind profitability* [online]. c2011 [cit. 2011-03-22]. Dostupné z WWW: <<http://www.windpowerengineering.com/tag/squinter-direct-tension/>>.
- [50] *Fastorq : firemní stránky* [online]. c2008 [cit. 2011-03-22]. Dostupné z WWW: <[http://www.fastorq.com/hydraulic\\_nut\\_splitters.aspx](http://www.fastorq.com/hydraulic_nut_splitters.aspx)>.
- [51] MATTAR NETO, Miguel; A. J. MIRANDA, Carlos; FAINER, Gerson. AN APPROACH FOR THE DESIGN OF CLOSURE BOLTS OF SPENT FUEL ELEMENTS TRANSPORTATION PACKAGES. In *2009 International Nuclear Atlantic Conference* [online]. 2009. Rio de Janeiro,RJ, Brazil : ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA NUCLEAR, 2009 [cit. 2011-03-14]. Dostupné z WWW: <<http://pintassilgo2.ipen.br/biblioteca/2009/inac/15298.pdf>>.
- [52] Problem-based learning. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2011-05-12]. Dostupné z WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Problem-based\\_learning](http://en.wikipedia.org/wiki/Problem-based_learning)>.
- [53] *Zavedení problémově orientovaného vzdělávání do studijních plánů strojího inženýrství : Vysoké učení technické v Brně* [online]. 2007 [cit. 2011-04-10]. Dostupné z WWW: <<http://opvk22.umt.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/esf%20poster%20cz.pdf>>.
- [54] HOMOLKA, Jakub. *Reflexe studia v Holandsku v kontextu filosofie výchovy* : Univerzita Karlova v Praze [online]. 2010 [cit. 2011-05-12]. Dostupné z WWW: <<http://www.cuni.cz/IFORUM-8578-version1.pdf>>.
- [55] *GUNT Hamburg : firemní stránky* [online]. c2005 [cit. 2011-04-20]. Dostupné z WWW: <<http://www.gunt.de>>.

- [56] *Armfield : firemní stránky* [online]. c2010 [cit. 2011-04-20]. Dostupné z WWW: <<http://www.armfield.co.uk>>.
- [57] *TecQuipment : firemní stránky* [online]. 200? [cit. 2011-04-20]. Dostupné z WWW: <<http://www.tecquipment.com/>>.
- [58] *GUNT Hamburg: instruction manual - TM 320 Screw Tester* [cit. 2011-04-24].
- [59] *Nako : návod k momentovému klíči 5- 25 Nm BGS* [cit. 2011-04-24].
- [60] *WHP Technik : návod k digitálnímu úchylkoměru* [cit. 2011-04-24].
- [61] *CAD 3 - Pevnostní analýzy* [online]. [cit. 2011-04-27]. Ostrava : Vysoká škola báňská, Technická univerzita Ostrava, [200?]. Učební text. Dostupné z WWW: <<http://robot.vsb.cz/skripta/cad-iii/8-1-analyza-sroubovych-spoju.html>>.



**8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN**

|             |                      |   |
|-------------|----------------------|---|
| <i>AMD</i>  |                      | -Advanced Micro Devices                     |
| $A_S$       | [mm <sup>2</sup> ]   | -výpočtový průřez šroubu                    |
| $C$         | [-]                  | -tuhostní konstanta spoje                   |
| <i>DTI</i>  |                      | -identifikační podložky                     |
| $d$         | [mm]                 | -velký průměr závitu šroubu                 |
| $d_2$       | [mm]                 | -střední průměr závitu šroubu               |
| $E$         | [MPa]                | -modul pružnosti v tahu                     |
| $F$         | [N]                  | -síla provozního zatížení                   |
| $F_i$       | [N]                  | -předpětí ve šroubu                         |
| $F_p$       | [N]                  | -síla ve spojovaných součástech             |
| $F_S$       | [N]                  | -síla ve šroubu                             |
| $f$         | [-]                  | -součinitel tření pod maticí                |
| $f_0$       | [-]                  | -součinitel tření v závitu                  |
| <i>IT</i>   |                      | -stupeň přesnosti                           |
| $k_S$       | [Nmm <sup>-1</sup> ] | -tuhost šroubu                              |
| $k_R$       | [-]                  | -součinitel předpětí                        |
| $k_P$       | [Nmm <sup>-1</sup> ] | -tuhost spojovaných přírub                  |
| $l$         | [mm]                 | -svěrná délka                               |
| $M$         | [Nm]                 | -utahovací moment                           |
| <i>MKP</i>  |                      | -metoda konečných prvků                     |
| $P$         | [mm]                 | -rozteč závitu                              |
| <i>PA</i>   |                      | -polyamid                                   |
| $Ra$        |                      | -parametr drsnosti povrchu                  |
| $R_{P0,2}$  | [MPa]                | -smluvní mez kluzu                          |
| $\alpha$    | [°]                  | -vrcholový úhel závitu                      |
| $\beta$     | [°]                  | -vrcholový úhel kužele                      |
| $\delta$    | [mm]                 | -deformace                                  |
| $\delta_P$  | [mm]                 | -stlačení spojovaných součástí              |
| $\delta_S$  | [mm]                 | -prodloužení šroubu                         |
| $\eta$      | [%]                  | -účinnost šroubu                            |
| $\varphi_P$ | [°]                  | -úhel zatěžovací dráhy spojovaných součástí |
| $\varphi_S$ | [°]                  | -úhel zatěžovací dráhy šroubu               |
| $\psi$      | [°]                  | -úhel stoupání závitu                       |
| <i>.ipt</i> |                      | -datový formát                              |
| <i>.iam</i> |                      | -datový formát                              |
| <i>.igs</i> |                      | -datový formát                              |



**9 SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK**

|  |    |
|--|----|
| <b>Obr. 1</b> Různé využití spojovacích šroubů [61]  | 13 |
| <b>Obr. 2</b> Kuličkový šroub [3]  | 14 |
| <b>Obr. 3</b> Rozložení napětí na závitech matice [9]  | 14 |
| <b>Obr. 4</b> Ukázka pojištění matice proti uvolnění [1]   | 15 |
| <b>Obr. 5</b> Rozdíl v průběhu pëchovaných a porušených vláken [11]  | 16 |
| <b>Obr. 6</b> Karbidový trn [14]   | 16 |
| <b>Obr. 7</b> Rozdělení šroubových spojů podle způsobu zatížení [15]   | 17 |
| <b>Obr. 8</b> Namáhání šroubu na tah a stříh [2]   | 18 |
| <b>Obr. 9</b> Poměr faktorů závislosti utahovacího momentu a předepínací síly [19]                                 | 19 |
| <b>Obr. 10</b> Rozložení napětí v předepjatém šroubu [16]  | 20 |
| <b>Obr. 11</b> Montážní a pracovní diagram předepjatého šroubového spoje<br>při zatížení stálou provozní silou [6] | 22 |
| <b>Obr. 12</b> Poddajný šroub se zeslabeným dříkem [9]   | 23 |
| <b>Obr. 13</b> Rozdílné působíště provozní síly [9]  | 24 |
| <b>Obr. 14</b> Různé polohy působíště provozních sil [9]   | 24 |
| <b>Obr. 15</b> Momentový klíč [33]   | 25 |
| <b>Obr. 16</b> Schéma metody úhlu pootočení matice [34]  | 26 |
| <b>Obr. 17</b> Pneumatický utahovák [37]   | 26 |
| <b>Obr. 18</b> Elektrický utahovák [37]  | 27 |
| <b>Obr. 19</b> Hydraulický utahovák [39]   | 27 |
| <b>Obr. 20</b> Vyvození předpětí elektrickým indukčním zahřátím šroubu [41]  | 28 |
| <b>Obr. 21</b> Matice Superbolt [42]   | 29 |
| <b>Obr. 22</b> Talířové podložky v neutaženém a utaženém stavu [34]  | 29 |
| <b>Obr. 23</b> Rotabolt (vlevo) a Smartbolts (vpravo) [45, 46]   | 30 |
| <b>Obr. 24</b> Squirter DTI podložky [49]  | 31 |
| <b>Obr. 25</b> Měření délky šroubu mikrometrem [34]  | 31 |
| <b>Obr. 26</b> Ultrazvuková kontrola předpětí [38]   | 32 |
| <b>Obr. 27</b> Nut Splitter [50]   | 32 |
| <b>Obr. 28</b> Postup křížového utahování [51]   | 33 |
| <b>Obr. 29</b> Postup utahování u obdélníkového vzoru [31]   | 34 |
| <b>Obr. 30</b> Hydraulické matice [37]   | 34 |
| <b>Obr. 31</b> Experimentální stanice TM 320 [55]  | 39 |
| <b>Obr. 32</b> Schéma a popis uložení šroubu [58]  | 39 |
| <b>Obr. 33</b> Pohled na uložení šroubu  | 40 |
| <b>Obr. 34</b> Pojistka proti protáčení šroubu   | 40 |
| <b>Obr. 35</b> Experimentální stanice TM 320   | 41 |
| <b>Obr. 36</b> Měřič utahovacího momentu   | 41 |
| <b>Obr. 37</b> Měřič deformace přírub  | 42 |
| <b>Obr. 38</b> Vyrobená pojistka proti protáčení se šroubem M6   | 44 |
| <b>Obr. 39</b> Momentový klíč s nástrčnými hlavicemi   | 45 |
| <b>Obr. 40</b> Stupnice momentového klíče  | 45 |
| <b>Obr. 41</b> Aretační šroub  | 46 |
| <b>Obr. 42</b> Digitální úchylkoměr  | 46 |
| <b>Obr. 43</b> Upravená experimentální stanice   | 48 |
| <b>Obr. 44</b> Digitální model geometrie stanice   | 49 |
| <b>Obr. 45</b> Kontakty na stykových plochách  | 50 |

|   |    |
|---|----|
| <b>Obr. 46</b> Ukázka sítě stanice  | 50 |
| <b>Obr. 47</b> Místa měření posuvů v ose Z                                  | 51 |
| <b>Obr. 48</b> Deformace (posuv) stanice v ose šroubu při předpětí 14 000 N | 51 |
| <br>  |    |
| <b>Tab. 1</b> Technické data digitálního úchylkoměru [60]                   | 47 |
| <b>Tab. 2</b> Problémy digitálního úchylkoměru a jejich odstranění [60]     | 47 |
| <b>Tab. 3</b> Změřené deformace (posuv) přírub s třením pod maticí          | 53 |
| <b>Tab. 4</b> Změřené deformace (posuv) přírub bez tření pod maticí         | 53 |
| <b>Tab. 5</b> Tabulka porovnání předpětí                                    | 54 |
| <br>  |    |
| <b>Graf 1</b> Závislost předpětí na utahovacím momentu                      | 55 |

## **10 SEZNAM PŘÍLOH**

|            |  |
|------------|--|
| Příloha 1: | Řešení edukační úlohy pro šroub M8       |
| Příloha 2: | Řešení edukační úlohy pro šroub M6       |
| Příloha 3: | Výkres pojistky                          |
| Příloha 4: | Poster                                   |
| Příloha 5: | Prezentace do výuky                      |
| Příloha 6: | DVD - diplomová práce v pdf              |
|            | - přílohy                                |
|            | - výpočtový model stanice MKP            |
|            | - výpočet utahovacího momentu v Mathcadu |
|            | - výpočet předpětí v Mathcadu            |
|            | - výpočet účinnosti šroubu v Mathcadu    |