



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta Strojní
Ústav strojírenské technologie**

Vliv koeficientu tření na bezpečnost šroubových spojů

Diplomová práce

Studijní program: Výrobní inženýrství

Vedoucí práce: doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.

Bc. Miroslav Bláha

Praha 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bláha** Jméno: **Miroslav** Osobní číslo: **437295**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Vliv koeficientu tření na bezpečnost šroubových spojů

Název diplomové práce anglicky:

Influence of the coefficient of friction on the safety of screw connections

Pokyny pro vypracování:

- 1) Analýza namáhání šroubových spojů
- 2) Vliv koeficientu tření na předepnutí šroubových spojů
- 3) Diskuze výsledků

Seznam doporučené literatury:

- 1) Extreme Tribology: Fundamentals and Challenges (Ahmed Abdelbary, 2020)
- 2) Friction, Wear, Lubrication: A Textbook in Tribology, Second Edition (Kenneth C Ludema, Layo Ajayi, 2019)
- 3) Engineering Tribology (Gwidon W. Stachowiak, Andrew W. Batchelor, 2001)
- 4) Časopis Tribologia

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc., ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Ing. Zdeněk Hazdra, ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání diplomové práce: **15.04.2021** Termín odevzdání diplomové práce: **06.08.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2021**

doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení o autorství:

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr magisterského studia Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a použil pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

Praha dne:

.....

Podpis studenta

Prohlášení o udělení souhlasu s užitím:

Podle § 60 zákona č.121/2000 Sb., O právu autorském a právu souvisejícím s právem autorským, O studiu na vysokých školách a zákona o závěrečných zkouškách, je diplomová práce duševním spoluvlastnictvím autora, vedoucího diplomové práce a Fakulty strojní ČVUT. Citace povoluje fakulta. Podmínkou externího použití je smlouva s řešiteli.

Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval doc. Ing. Viktoru Kreibichovi, CSc. za odborné vedení mé diplomové práce, věcné připomínky a cenné rady, které mi v průběhu zpracování práce poskytl.

Mé poděkování patří rovněž Ing. Zdeňku Hazdrovi za poskytnutí řady konzultací ke zpracovanému tématu.

Na závěr bych chtěl poděkovat také své rodině za podporu projevenou v průběhu celého studia.

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: **Výrobní inženýrství**

Název bakalářské práce: **Vliv koeficientu tření na bezpečnost šroubových spojů**

Autor diplomové práce: **Bc. Miroslav Bláha**

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.**

Konzultant: **Ing. Zdeněk Hazdra**

| | | |
|-------------------------|----------------|----|
| Rozsah diplomové práce: | Počet stran: | 92 |
| | Počet obrázků: | 30 |
| | Počet tabulek: | 33 |
| | Počet grafů: | 32 |

Anotace: Práce se zabývá problematikou vlivu koeficientu tření povrchu na bezpečnost šroubového spoje. Mimo základní rozbor problematiky principu šroubového spoje je hlavním záměrem práce realizace měřicího zařízení pro přesné stanovení koeficientu tření rozdílných povrchů šroubových spojů, včetně stanovení vlivu maziv na parametry tohoto rozebíratelného spoje, případně pohybových funkčních dvojic z pohledu tribologie.

Klíčová slova: šroubové spoje, koeficient tření

**CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING**

Study programme: **Production engineering**

Title of diploma thesis: **Influence of the coefficient of friction on the safety of
screw connections**

Author: **Bc. Miroslav Bláha**

Supervisor: **doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.**

Consultant: **Ing. Zdeněk Hazdra**

| | | |
|---------------------------|---------------------|----|
| Extend of diploma thesis: | Number of pages: | 92 |
| | Number of pictures: | 30 |
| | Number of tables: | 33 |
| | Number of graphs: | 32 |

Abstract: The thesis deals with the issue of the surface friction coefficient on the safety of the screw connection. In addition to the basic analysis of the principle of the screw connection principle, the main goal of the thesis is to implement a measuring device for accurate determination of the friction coefficient of different screw connection surfaces, including determining the impact of lubricants on the parameters of this detachable connection or moving functional pairs from tribology.

Key words: screw connections, coefficient of friction

Obsah

| | |
|--|-----------|
| ÚVOD..... | 9 |
| 1 TEORETICKÁ ČÁST | 10 |
| 1.1 Tribologie | 10 |
| 1.2 Tření..... | 10 |
| 1.2.1 Smykové tření..... | 11 |
| 1.2.2 Valivé tření..... | 12 |
| 1.2.3 Vnitřní tření | 13 |
| 1.2.4 Suché tření | 14 |
| 1.2.5 Mezní tření..... | 14 |
| 1.2.6 Kapalinné tření..... | 15 |
| 1.3 Tribologické zkoušky | 15 |
| 1.4 Konstrukční spoje | 16 |
| 1.5 Závitové dvojice..... | 17 |
| 1.5.1 Geometrie závitu..... | 18 |
| 1.5.2 Samosvornost závitové dvojice..... | 19 |
| 1.5.3 Výroba závitu | 19 |
| 1.6 Šroubové spoje..... | 20 |
| 1.7 Předepjaté šroubové spoje..... | 22 |
| 1.7.1 Proces montážního utahování a povolování | 22 |
| 1.7.2 Tlak a třecí moment pod maticí..... | 26 |
| 1.7.3 Silové poměry ve šroubovém spoji | 27 |
| 1.7.4 Tření ve šroubovém spoji..... | 29 |
| 1.8 Mazání..... | 30 |
| 1.8.1 Mazací oleje..... | 30 |
| 1.8.2 Plastická maziva | 31 |
| 1.8.3 Tuhá maziva | 31 |
| 1.8.4 Kluzné laky | 32 |
| 1.9 Selhání šroubových spojů | 33 |
| 1.9.1 Nedostatečné předepnutí..... | 33 |
| 1.9.2 Zadíráání | 34 |
| 1.9.3 Únavová pevnost | 34 |
| 1.10 Povrchové úpravy šroubů..... | 35 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1.10.1 | Zinkování | 36 |
| 1.10.2 | Fosfátování | 38 |
| 1.10.3 | Kompozitní galvanické povlaky | 38 |
| 2 | EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST | 39 |
| 2.1 | Návrh zkušebního zařízení..... | 39 |
| 2.1.1 | Tření v závitu | 39 |
| 2.1.2 | Tření pod maticí..... | 42 |
| 2.2 | Postup a metodika měření | 44 |
| 2.2.1 | Příprava vzorků..... | 44 |
| 2.2.2 | Použitá maziva..... | 45 |
| 2.2.3 | Metodika měření | 46 |
| 2.3 | Výpočty..... | 47 |
| 2.4 | Výsledky měření koeficientu tření v závitu..... | 49 |
| 2.4.1 | Šroub M6 | 49 |
| 2.4.2 | Šroub M8 | 54 |
| 2.4.3 | Šroub M10 | 60 |
| 2.4.4 | Vyhodnocení naměřených dat | 65 |
| 2.5 | Výsledky měření koeficientu tření pod maticí..... | 69 |
| 2.5.1 | Šroub M8 | 69 |
| 2.5.2 | Šroub M10 | 74 |
| 2.5.3 | Vyhodnocení naměřených dat | 80 |
| 3 | DISKUSE VÝSLEDKŮ | 82 |
| 4 | ZÁVĚR | 83 |
| 5 | SEZNAM ZDROJŮ A POUŽITÉ LITERATURY | 84 |
| 6 | SEZNAM OBRÁZKŮ | 87 |
| 7 | SEZNAM TABULEK | 89 |
| 8 | SEZNAM GRAFŮ | 91 |

ÚVOD

Obor povrchových úprav se týká ve strojírenství nejen úprav povrchu kvůli zvýšení odolnosti proti korozi, ale také úprav povrchu z hlediska tribologie, tj. oboru zabývající se procesy tření, opotřebení a mazání. Při vzájemném pohybu neupravených povrchů funkčních dvojic dochází ke ztrátě materiálu z povrchu, což je proces nežádoucího opotřebení.

V kombinaci vhodné ochrany proti jednotlivým vlivům působícím na povrch materiálů (korozní prostředí, tření, teplota, abraze, eroze) dosahují povrchové úpravy technického významu a naplnění požadavků kladených na funkčnost i životnost strojů a jejich částí.

Na základě teoretických zákonitostí procesů tření, opotřebení a mazání, podložených skutečným poznáním vycházejícím z provedených experimentů, lze aplikovat optimální úpravu povrchu, která má základní význam při návrhu, provozu i údržbě strojů.

Na odolnost proti opotřebení a správnou funkci má vliv nejen stav povrchu, ale také konstrukční řešení a správná montáž funkční dvojice.

Rozbory poruch a příčin selhání často ukazují na podcenění významu tribologických parametrů, především skutečných hodnot koeficientu tření, které jsou velmi důležité pro bezpečnost šroubových spojů, funkčnost a životnost tohoto spojení.

Vzhledem k potřebám technické veřejnosti a stoupajícím nárokům na bezpečnost, je hlavním obsahem práce problematika šroubových spojů s ohledem na význam koeficientů tření jejich povrchů pro jejich optimální funkci.

Cílem této diplomové práce je přispět k dosavadním tribologickým poznatkům v aplikaci na povrchy šroubových spojů navrženým a realizovaným zařízením pro určování a porovnávání koeficientů tření.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Tribologie

Tribologie je oblast vědy, která se zabývá problematikou tření, mazání a opotřebením funkčních dvojic. Předmětem zkoumání tribologie je působení povrchů součástí při jejich vzájemném pohybu nebo při pokusu o vzájemný pohyb. Rozeznáváme dva druhy tohoto pohybu – smykový a valivý. Problematika tření a opotřebením má ve strojírenství velký význam, protože má vliv na délku životnosti a na spolehlivost strojů a strojírenských zařízení, a tedy i na výši provozních nákladů. [1,2]

Základní tribologický systém je tvořen čtyřmi prvky – dvě třecí tělesa, mezilátka a okolní prostředí. V tomto systému dochází k procesu tření, opotřebením a mazání a tyto děje jsou ovlivňovány provozními podmínkami, např. druh pohybu, velikost zatížení, rychlost pohybu, teplota aj. [2]

Tribologie je z ekonomického hlediska velmi důležitým oborem technického vývoje. Tření a opotřebením má negativní vliv na spotřebu energie, což vede k vyšším provozním nákladům. Podmínky tření a opotřebením strojů a nástrojů úzce souvisí s délkou jejich životnosti. Tribologickými poznatky je nutné se řídit již při návrhu a konstrukci stroje a zajistit tak vhodné tribologické podmínky, které je nutné udržovat správnou údržbou stroje, a tím dosáhnout prodloužení jeho životnosti. [2]

1.2 Tření

Tření představuje odpor proti relativnímu pohybu, který vzniká v oblasti dotyku povrchu dvou těles v tangenciálním směru. Vnější tření je charakterizováno v případě styku dvou třecích ploch, naopak vnitřní tření probíhá v materiálových vrstvách téhož tělesa. Účinkem tření dochází ke vzniku třecích sil, třecích momentů, přeměny mechanické energie na teplo a vzniku opotřebením. Vnější tření se dělí na smykové a valivé. [3]

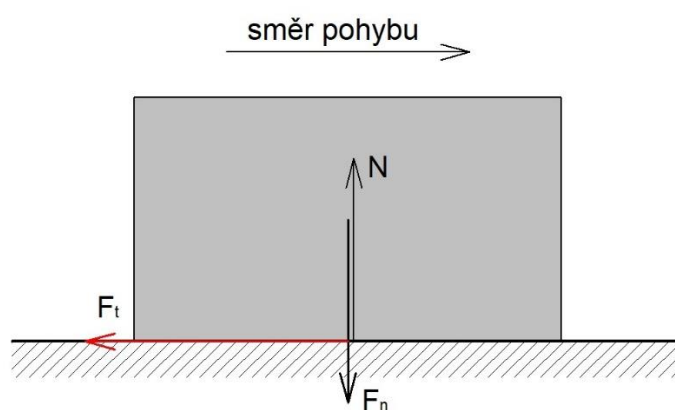
Vliv tření může mít v technických aplikacích jak negativní, tak i pozitivní vliv. Snaha o minimalizování třecích sil je například patrná v případě spalovacích motorů, ložisek a dalších součástech. Cílem je dosáhnout co nejnižších energetických ztrát a životnosti součástí. Vlivu tření je naopak využíváno například při brždění automobilu, kde je třeba dosáhnout co nejvyššího tření pro bezpečné zastavení, nebo v případě třecích spojek a řemenových převodů. [3]

1.2.1 Smykové tření

Ke smykovému tření dochází při posuvném pohybu mezi dvěma tělesy a vyjadřuje odpor proti pohybu, který vzniká v oblasti styku povrchů těles. Smykové tření probíhá buď jako čisté tření, anebo jako tření v adhezních vrstvách. Při vzájemném pohybu povrchů dvou těles dochází ke vzniku adhezivních vrstev, kde díky difúzi dotýkajících se povrchů vznikají mikrosvary mezi výstupky nerovností. Při pohybu dochází k opakovanému porušování a obnovování mikrosvarů stykových ploch. Síly smykového tření také vznikají při zachytávání nerovností povrchů a dalších částic, které se mezi povrchy dostaly, a dochází zde ke vzniku elastických a plastických deformací. K čistému tření dochází v případě vyleštěných rovinných povrchů především ve vakuu, kdy k sobě povrchy přilnou velkou silou a díky difúzi dojde k vytvoření spojů pevností svaru. Dále se rozlišuje statické a dynamické tření. Statické tření působí při přechodu z klidu do pohybu a je větší než tření dynamické, které působí při pohybu. [3,4]

Třecí síla F_t je závislá na přítláčné normálové síle F_n a na koeficientu smykového tření μ a vypočítá se ze vztahu:

$$F_t = \mu \cdot F_n$$



Obr. 1: Schematické zobrazení smykového tření [4]

Koeficient smykového tření je dán poměrem mezi třecí silou a normálovou silou. Třecí síla udává souhrn více silových účinků. U kovových materiálů jsou základní účinky abraze a adheze. Hodnota koeficientu tření je nejvyšší za klidu a se zvyšující rychlostí klesá. Rozlišuje se tedy koeficient statický a dynamický. Síly, které vznikají při smykovém tření jsou způsobeny kontakty nerovností třecích ploch, kde dochází

k následným deformacím. Z tohoto důvodu je patrné, že má na koeficient tření vliv drsnost povrchu, tedy s menší drsností klesá i hodnota koeficientu tření. [4]

Tab. 1: Hodnoty koeficientu smykového tření [5]

| Materiál třecích ploch | Za klidu μ_0 | | Za pohybu μ | |
|------------------------|------------------|--------------|-----------------|----------------|
| | suché | mazáno | suché | mazáno |
| ocel-ocel | 0,15 až 0,20 | 0,10 až 0,12 | 0,10 až 0,20 | 0,03 až 0,09 |
| ocel-litina | 0,20 až 0,30 | 0,13 až 0,27 | 0,17 až 0,18 | 0,05 až 0,10 |
| ocel-bronz | 0,11 až 0,15 | 0,10 až 0,20 | 0,10 až 0,15 | 0,005 až 0,008 |
| litina-litina | 0,25 | 0,16 až 0,18 | 0,15 | 0,07 až 0,15 |
| litina-bronz | 0,25 | 0,08 | 0,15 až 0,20 | 0,07 až 0,15 |
| bronz-bronz | 0,25 | 0,10 až 0,11 | 0,2 | 0,06 až 0,12 |
| kůže-litina | 0,30 až 0,60 | 0,12 až 0,15 | 0,40 až 0,60 | 0,12 až 0,15 |
| pryž-asfalt | 0,50 až 0,70 | - | 0,60 až 0,80 | 0,10 až 0,15 |
| ferodo-litina | 0,60 až 0,70 | - | 0,20 až 0,40 | - |
| ferodo-ocel | - | - | 0,50 až 0,60 | 0,30 až 0,50 |
| tvrzená litina-ocel | - | - | 0,25 až 0,40 | 0,03 až 0,12 |
| polyamid-ocel | - | - | 0,20 až 0,45 | 0,04 až 0,20 |
| polyvinylchlorid-ocel | - | - | 0,6 | - |

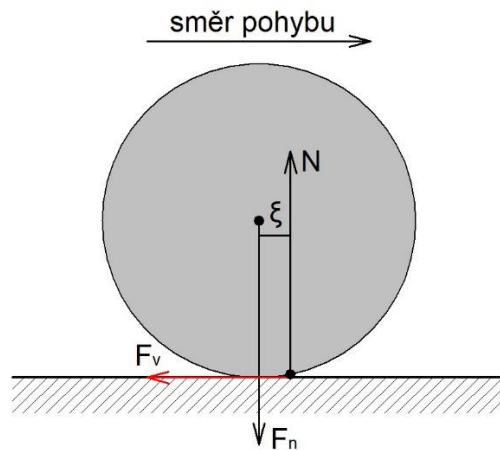
Hodnoty koeficientu smykového tření jsou jen orientační, protože značně závisí na provozních podmínkách a kvalitě ploch.

1.2.2 Valivé tření

Valivé tření vzniká při valení tělesa kruhového průřezu po podložce. Příčinou tohoto jevu je neexistence absolutně tuhého tělesa. Při valení tedy dochází k rozdílným deformacím valícího se tělesa a podložky. Při vzniku a následném zpětném vypružení těchto deformací vzniká rozdíl mezi délkou dráhy na povrchu tělesa a podložky. Dochází tedy k mírným prokluzům. Část přivedené energie při vzniku pružných deformací a navrácení do původního stavu je přeměněna na teplo. Vznikající deformace nemusí být jen elastické, ale mohou vznikat také plastické deformace, které též způsobují ztráty energie. K dalším ztrátám dochází v důsledku prokluzu tělesa a podložky, kde dochází ke smykovému tření. Pro snižování valivého tření se využívají tvrzené povrchy třecích těles, čímž se minimalizují deformace a s nimi spojené ztráty. Valivá třecí síla se vypočítá ze vztahu: [3,6]

$$F_v = F_n \cdot \frac{\xi}{R}$$

Kde F_n je normálová síla, ξ je rameno valivého odporu a R je poloměr tělesa.



Obr. 2: Schematické zobrazení valivého tření [6]

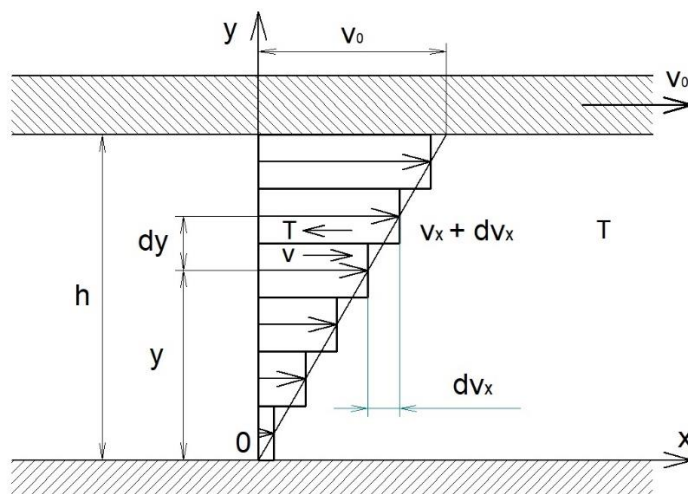
Tab. 2: Hodnoty ramene valivého odporu [5]

| Materiál stykových ploch | Rameno valivého odporu ξ [mm] |
|-------------------------------|-----------------------------------|
| Nekalená ocel – nekalená ocel | 0,05 až 0,06 |
| Kalená ocel – kalená ocel | 0,001 až 0,005 |
| litina – litina | 0,005 až 0,006 |
| ocelové kolo – kolejnice | 0,4 až 0,5 |
| pneumatika – beton | 1,5 až 2,5 |
| pneumatika – asphalt | 2,5 až 4,5 |

1.2.3 Vnitřní tření

Síly mezi molekulami tekutin způsobují, že při proudění tekutiny vznikají síly mezi sousedními vrstvami, které se pohybují různými rychlostmi. Tyto síly se nazývají vnitřní tření nebo též viskozita a mají směr tečny k povrchu stýkajících se vrstev. Působí tak, že zpomalují pohyb rychlejší vrstvy, a naopak zrychlují pohyb pomalejší vrstvy. Vrstva kapaliny, která je v bezprostředním kontaktu s pevným tělesem se vlivem vnitřního tření nepohybuje. [7]

Na obrázku č. 3 jsou znázorněny dvě desky, mezi kterými je vrstva kapaliny, kde spodní deska je v klidu a horní deska se pohybuje konstantní rychlostí ve směru roviny desky. Působením vnitřního tření se uvedou do pohybu všechny vrstvy tekutiny kromě vrstvy, která je v bezprostředním kontaktu se spodní deskou. Vrstva, která přiléhá k horní desce, je vůči této desce také v klidu, pohybuje se tedy spolu s ní konstantní rychlostí. Díky působení vnitřního tření se pohybují jednotlivé vrstvy tekutiny tím rychleji, čím jsou vzdáleny od pevné desky. [7]



Obr. 3: Schematické zobrazení vnitřního tření [7]

1.2.4 Suché tření

K suchému tření dochází mezi třecími povrchy v případě nepřítomnosti maziva. Výstupky a nerovnosti povrchů spolu přicházejí do přímého kontaktu. V těchto místech může docházet k rytí výstupků jednoho povrchu do povrchu druhého, tedy k abrazi. Může také docházet ke vzniku mikrosvarů a studených spojů, jako důsledků adheze. V případě cyklického zatěžování povrchů může dojít k iniciaci trhliny, což je způsobeno únavou povrchu materiálu. V důsledku těchto dějů dochází k uvolňování částic povrchu a s tím i ke změně tvaru a rozměru třecí plochy. [3]

Při suchém tření dochází k přímému kontaktu třecích ploch a v těchto místech se vyvíjí značné množství tepla. Výsledkem je vysoká teplota i při relativně malých zatížení a rychlostech, což má vliv na velikost opotřebení. Ke snížení tření a opotřebení součástí se používají maziva, které také odvádí teplo z třecích ploch. Proto je správné mazání důležité při provozu strojních součástí. [8]

1.2.5 Mezní tření

K meznímu tření dochází v případě, kdy je mezi povrchy jen tenká vrstva maziva. Vrstva maziva snižuje tření, ale nedokáže zabránit styku nerovností třecích povrchů. Dochází tedy k vyššímu opotřebení než v případě kapalinného tření. K meznímu tření dochází v případě nedostatečného množství maziva nebo nízké viskozity maziva. Dále při velkém zatížení a také při nízkých rychlostech mezi povrchy u hydrodynamicky mazaných součástí. [8]

1.2.6 Kapalinné tření

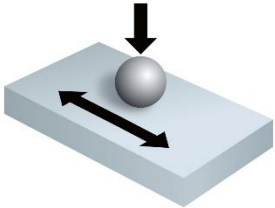
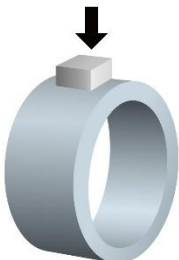
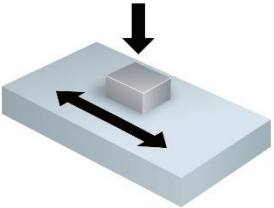
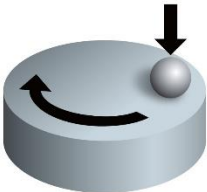
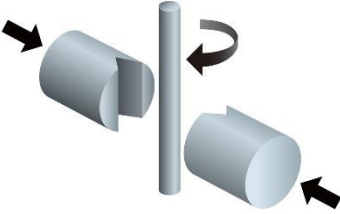
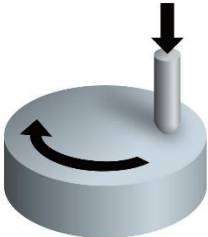
V případě kapalinného tření jsou povrchy třecích ploch smáčeny vrstvou maziva, která zabrání vzájemnému styku povrchu a jeho nerovností. Při kapalinném tření díky přilnavosti maziva téměř nedochází ke skluzu mezi povrchem a mazivem a třecí síla je tedy závislá pouze na velikosti vnitřního tření ve vrstvě maziva. Aby byla vrstva maziva zachována i při zatížení, kdy jsou k sobě třecí povrchy stlačovány, musí být v mazivu vytvořen odpovídající tlak. Požadovaného tlaku je možno dosáhnout dvěma způsoby, hydrodynamicky nebo hydrostaticky. [3,8]

Při hydrodynamickém mazání je tlak v mazací vrstvě vyvolán v důsledku vzájemného pohybu třecích ploch. Mazivo vytváří mezi pevnou a kluznou plochou takzvaný mazací klín. Do místa, kde se mezera mezi plochami zmenšuje, je přiváděno díky přilnavosti další mazivo, kterému je výtok ztěžován viskozitou. Tlak v mazací vrstvě je tedy závislý na rychlosti vzájemného pohybu třecích ploch a v případě nízkých rychlostí (rozběh a doběh) může docházet k meznímu tření. [8]

Hydrostatické mazání je způsob, při kterém je využíván k přívodu maziva externí zdroj. Mazivo je dodáváno mezi plochy pod takovým tlakem, aby byly třecí plochy odděleny dostatečnou vrstvou maziva. Při tomto způsobu není nutný vzájemný pohyb mazaných ploch. [8]

1.3 Tribologické zkoušky

Experimentální zařízení určené ke studiu procesu tření a opotřebení materiálu a jejich povrchových vrstev mají velký význam, protože se stále objevují požadavky na optimalizaci tribologických systémů s cílem zvýšit životnost a spolehlivost. Tribologické zkoušky se provádí na experimentálním zařízení zvaném tribometr. Měřicí zařízení se dělí do jednotlivých skupin podle geometrie třecího uzlu. Styková plocha třecího uzlu může být bodový, čarový, nebo plošný kontakt. Tribometry obvykle umožňují zkoušení funkčních dvojic různých tvarů a v různých podmínkách a v průběhu zkoušky je zaznamenáván průběh koeficientu tření případně třecího momentu. Mezi důležité podmínky měření, které mají vliv na koeficient tření a opotřebení patří rychlost vzájemného pohybu třecí dvojice, velikost zatížení, přítomnost maziva, teplota, doba zkoušky, stav povrchu aj. Na obrázku č. 4 jsou zobrazeny nejběžnější konfigurace třecích systémů. [9]

| Bodový kontakt | Čarový kontakt | Plošný kontakt |
|--|--|---|
|  <p>Ball on Plate</p> |  <p>Block on Ring</p> |  <p>Block on Plate</p> |
|  <p>Ball on Disk</p> |  <p>Pair v-blocks on Pin</p> |  <p>Pin on Disk</p> |

Obr. 4: Konfigurace třecích systémů [10]

1.4 Konstrukční spoje

Každé technické dílo se skládá z určitého počtu základních stavebních prvků, které jsou vhodným způsobem uspořádány a vzájemně pospojovány. V podstatě jde o realizaci funkčních vztahů – kinematických a silových vazeb. Nejtěsnější vztahy vznikají mezi prvky, které jsou v bezprostředním dotyku. Z kinematického hlediska se dva takové prvky označují jako kinematická dvojice. Těsnost vazby kinematické dvojice se vyjadřuje třídou kinematické dvojice T , která je definovaná vztahem:

$$T = 6 - u,$$

kde u je počet možných nezávislých složek relativního pohybu. $T = 0$ odpovídá dvojici vzájemně nevázané a $T = 6$ dvojici vzájemně nepohyblivé. V technické praxi se uplatňují převážně dvojice třídy $T = 5$ a 6 . [7]

Dělení konstrukčních spojů podle základních hledisek:

Hledisko kinematické:

- Spojení nepohyblivá
- Spojení pohyblivá

Hledisko vnitřních sil:

- Spojení bez předpětí
- Spojení předepjatá

Hledisko montážní:

- Spojení rozebíratelná
- Spojení nerozebíratelná

Za rozebíratelný spoj se považuje takový, jehož demontáž lze provést bez poškození spojovacích i spojovaných částí, a u kterého lze po zpětné montáži stejnými prvky dosáhnout spoje původní kvality. Mezi tyto spoje patří šrouby, kolíky, čepy, svěrné spoje, drážkové spoje a lisované spoje. Nerozebíratelný spoj lze rozebrat pouze s trvalým poškozením. Jedná se například o spoje svařované, pájené, nýtované a lepené. [11]

1.5 Závité dvojice

Závité dvojice se skládá ze dvou součástí, z nichž jedna je opatřena závitem vnějším a druhá otvorem se závitem vnitřním. Závité dvojice mají v technické praxi významné uplatnění, a to především v následujících třech oblastech:

1. Šroubové a závité spoje:

Závité dvojice vytváří pevné, ale rozebíratelné spojení dvou i více součástí. Spojení lze docílit pomocí spojovacích šroubů, které jsou hromadně vyráběny ve velkém spektru velikostí a tvarů, pak jde o šroubové spoje. V případě bezprostředního spojení (vešroubování) jedné součásti do druhé jde o spoje závité.

2. Závité převodové mechanismy (pohybové šrouby):

Uplatnění nachází především v přeměně otáčivého pohybu na posuvný, tedy v přeměně kroutícího momentu na osovou sílu.

3. Závité dvojice speciálního použití:

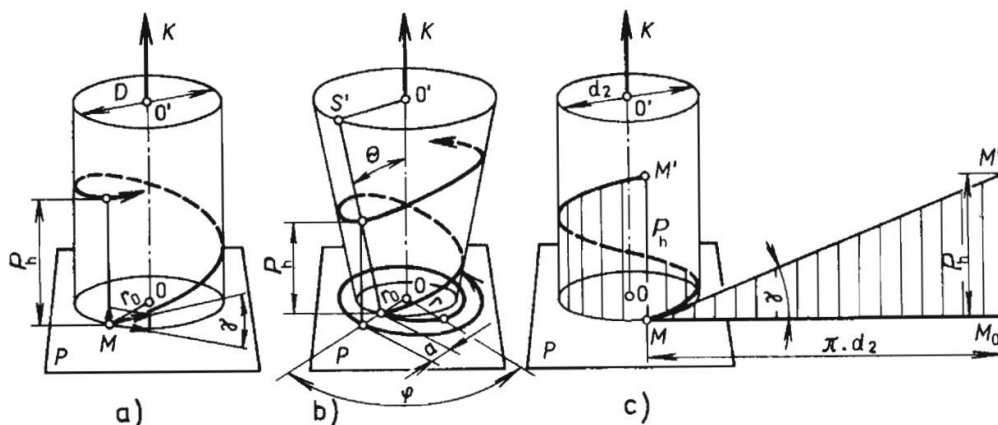
Tato oblast zahrnuje závité dvojice, které nelze zařadit do předchozích dvou skupin. Jedná se např. o mikrometrický šroub, stavěcí šroub aj. [11]

Tab. 3: Značení závitů [5]

| Název závitu | Značení | Norma |
|--|---------|------------------|
| Metrický závit | M | ČSN ISO 261 |
| Metrický závit pro jemnou mechaniku a optiku | | ČSN 01 4021 |
| Metrický závit pro součásti z plastů | | ČSN 01 4026 |
| Whitworthův závit | W | ČSN 01 4030 |
| Trubkový závit válcový | G | ČSN EN ISO 228-1 |
| Trubkový závit kuželový vnější | R | ČSN ISO 7-1 |
| Trubkový závit kuželový vnitřní | Rc | |
| Oblý závit | Rd | ČSN 01 4037 |
| Lichoběžníkový závit rovnoramenný | Tr | ČSN 01 4050 |
| Lichoběžníkový závit nerovnoramenný | | ČSN 01 4051 |
| Lichoběžníkový závit nerovnoramenný | S | ČSN 01 4052 |
| Pancéřový závit | P | ČSN 01 4035 |
| Edisonův závit | E | ČSN 01 4038 |
| Závit šroubů do plechu | - | ČSN EN ISO 1478 |

1.5.1 Geometrie závitu

Každý bod závitu opisuje šroubovici tvořenou bodem M, který se konstantní úhlovou rychlostí otáčí kolem osy K, a přitom se rovnoměrně posouvá ve směru této osy (obr. 5a). Šroubovice vzniká také navinutím trojúhelníku na válec. V případě, kdy má vodorovná odvěsna délku rovnou obvodu středního průměru závitu, pak se druhá odvěsna rovná stoupání šroubovice P_h (obr. 5c). Jestliže bude bod M opisovat na základně P Archimedovu spirálu, pak vzniká šroubovice na kuželu (obr. 5b). Podle smyslu otáčení je rozlišována šroubovice pravá nebo levá – pravotočivý nebo levotočivý závit. [13]



Obr. 5: Geometrie závitu [13]

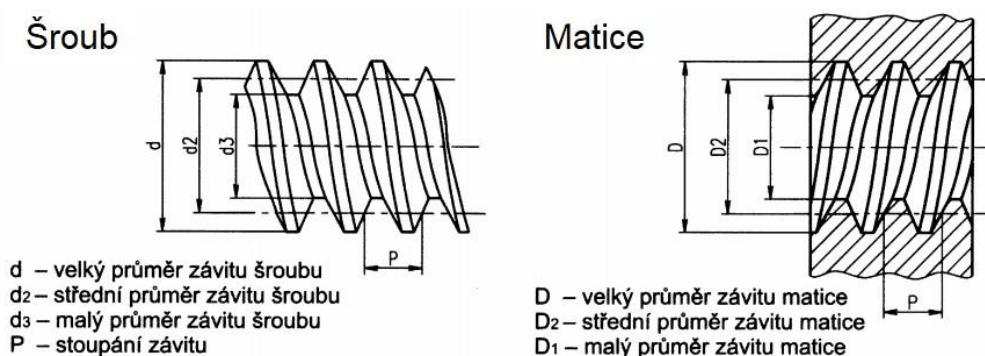
Základním prvkem šroubu je vnější závit, u matice pak závit vnitřní. Stoupání P_h je nejkratší vzdálenost dvou stejnohlých bodů téhož závitu. Rozteč P udává nejkratší vzdálenost dvou stejnohlých bodů sousedního závitu. Pro jednoduchý závit je stoupání rovno rozteči. V případě vícechodého závitu o počtu chodů n platí [13]:

$$P_h = n \cdot P$$

Úhel stoupání je dán vztahem:

$$\tan \gamma = \frac{P_h}{\pi \cdot d_2}$$

kde d_2 je střední průměr závitu.



Obr. 6: Základní rozměry závitu [17]

1.5.2 Samosvornost závitové dvojice

Samosvornost závitové dvojice je nezbytná v případě spojů, kde je nutné vyvodit požadované předpětí. Samosvornost zaručí, že nedojde k povolení matice působením pouze osově síly. Třecí úhel tedy musí být větší než úhel stoupání. Tyto závitové dvojice jsou schopny převádět pouze kroučící moment na osovou sílu. Nesamosvorné dvojice jsou schopny i transformace osově síly na kroučící moment. Této schopnosti se využívá v oblasti převodových závitových mechanismů. [11]

1.5.3 Výroba závitu

Mezi běžné způsoby výroby závitů patří třískové obrábění a tváření závitu. V případě plastů se závity také lisují a lijí. Pro výrobu vnitřních závitů se nejvíce používají závitníky. Používají se jak v ruční, tak i ve strojní výrobě. Jsou vyráběny z rychlořezné oceli nebo slinutých karbidů. Jde v podstatě o šroub s náběhovým kuželem, kde jsou břity vytvořeny drážkami. Soustružení závitů se také provádí pomocí

soustružnických nožů, jejichž profil je odvozen od daného závitu. Soustružnické nože mohou být jednodílné, nebo hřebenové, které umožňují řezat zvit na jeden záběr. Vnější závity jsou řezány pomocí závitových čelistí, které jsou používány v ruční i strojové výrobě. Jedná se o matici, která má vyvrtané drážky vytvářející klín a odvádějící třísky. Při soustružení se zvyšuje produktivita použitím závitových hlav. Závity lze také vyrábět frézováním, pomocí závitové frézy kotoučové, hřebenové, válcové nebo stopkové. Při výrobě přesných šroubů se používá broušení závitů. Broušení se nejčastěji provádí na speciálních bruskách s jednodílným, nebo hřebenovým kotoučem. [12]



Obr. 7: Sada závitníků a závitová čelist [16]

Tváření závitů je velmi produktivní způsob výroby. Nedochozí k řezání, tudíž ani k produkci třísky, ale k deformaci materiálu. Deformace materiál zpevňuje a nedochází k porušení struktury, proto tvářené závity vydrží větší zatížení než obráběné. Tvářené vnitřní závity se vyrábí pomocí speciálních tvářecích závitníků v materiálech s nižší pevností (cca do 500 MPa) a tažností minimálně 12 %. Nejproduktivnější způsob výroby vnějších závitů je válcování. Zvit je vytlačován pomocí kotoučových nebo plochých čelistí s tvarem požadovaného závitu. [12]

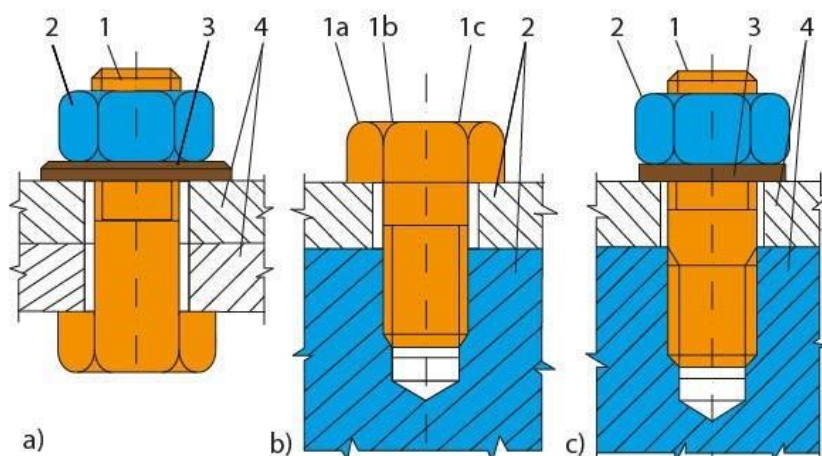
1.6 Šroubové spoje

Šroubové a závitové spoje jsou nejrozšířenějším druhem spojení ve strojírenství a v oblasti rozebíratelných spojů zcela dominují. Jejich význam spočívá jak v mnohostrannosti použití a ve velkém množství konstrukčních variant, tak především ve spolehlivosti. Šroubové spoje umožňují jednoduché, pevné a snadno rozebíratelné spojení dvou i více součástí. Za použití běžného nářadí jsou schopny vytvořit velké svěrné síly a přenášet velká zatížení při relativně malých rozměrech a hmotnosti. Velkou výhodou šroubových spojů je velký sortiment hromadně vyráběných spojovacích prvků (šrouby, matice, podložky) a velký stupeň jejich normalizace.

Na spolehlivosti šroubových spojů často závisí správný a bezpečný chod celého strojního zařízení. [11]

Na obrázku 8 jsou zobrazeny tři základní druhy šroubových spojů:

- a) **Spoj šroubem s hlavou a maticí** – šroub je v díře uložen s vůlí: 1 – šroub s hlavou, 2 – matice, 3 – podložka, 4 – spojované součásti
- b) **Spoj zašroubovaným šroubem s hlavou** – šroub zašroubován ve spodní části, horní prochází s vůlí: 1 – šroub s hlavou, 2 – spojované součásti
- c) **Spoj závrtným šroubem a maticí** – šroub je zašroubován do spodní součásti až po konec výběhu závitu, horní součást, kterou šroub prochází s vůlí, se nasadí na šroub a přitáhne maticí. Při demontáži není nutné šroub vyšroubovat. 1 – závrtný šroub, 2 – matice, 3 – pružná podložka, 4 – spojované součásti [31]



Obr. 8: Základní druhy šroubových spojů [31]

Šrouby a matice se dělí podle pevnosti do jednotlivých tříd. Třídy pevnosti šroubů jsou značeny dvěma čísly oddělenými tečkou. První číslo značí 1/100 pevnosti v tahu R_m a druhé číslo udává desetinný poměr meze kluzu (dolní mez kluzu R_{eL} , resp. smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$) vůči pevnosti v tahu R_m . Pevnostní třídy matic jsou značeny jedním číslem, které odpovídá vhodné třídě šroubu, se kterým mohou být smontovány. [14]

Tab. 4: Pevnostní třídy šroubů dle ČSN EN ISO 898-1 [14]

| Třída pevnosti | Pevnost v tahu R_m [MPa] | Dolní mez kluzu R_{eL} [Mpa] | Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [Mpa] |
|----------------|----------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| 3.6 | 300 | 180 | - |
| 4.6 | 400 | 240 | - |
| 4.8 | 400 | 320 | - |
| 5.6 | 500 | 300 | - |
| 5.8 | 500 | 400 | - |
| 6.8 | 600 | 480 | - |
| 8.8 | 800 | - | 640 |
| 9.8 | 900 | - | 720 |
| 10.9 | 1000 | - | 900 |
| 12.9 | 1200 | - | 1080 |

Šroubové spoje lze rozdělit z konstrukčního hlediska na spoje:

- Předepjaté
- Bez předpětí (nejsou příliš časté a mají spíše podružný význam)

1.7 Předepjaté šroubové spoje

Předepjaté šroubové spoje tvoří převážnou většinu v praxi používaných šroubových spojů. Už při montáži jsou utaženy na poměrně velkou osovou sílu (montážní předpětí), která zajišťuje potřebné silové vazby stykových ploch a na správném utažení tak závisí správná funkce spoje. Prvky předepjatého spoje jsou tedy namáhány ještě před zahájením pracovní činnosti, kdy dojde k namáhání od vnějších provozních sil. Správný předepjatý spoj i za provozu tvoří celek se zaručeným silovým dotykem v dosedacích plochách a se stálou vzájemnou polohou zúčastněných částí. Tento požadavek je důležitý hlavně u spojů vystavených proměnnému zatížení. Potřeba montážního předpětí je také u spojů, kde je tlak ve stykových plochách nezbytný pro vznik dostatečné třecí síly. [21]

1.7.1 Proces montážního utahování a povolování

U předepjatých šroubových spojení vzniká jako důsledek elastických deformací v průběhu utahování vnitřní osová síla – montážní předpětí Q_0 , viz obr. 9. V první fázi

utahování dosedne matka na horní desku a ve spoji není silové působení. Každým dalším otočením matice o 2π se matice posune k hlavě šroubu o rozteč P a po utažení vykáže celkovou dráhu ΔL . Ve skutečnosti se dráha ΔL rozdělí na prodloužení šroubu Δl_s a na stlačení desek v okolí otvoru Δl_D a to v obráceném poměru jejich tuhostí. S prodloužením šroubu o Δl_s souvisí měrná deformace, přes Hookův zákon pak osová napětí a posléze i osová síla – předpětí. [11]

Měrná deformace:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_s}{l} \quad [-]$$

Osová napětí (Hookův zákon):

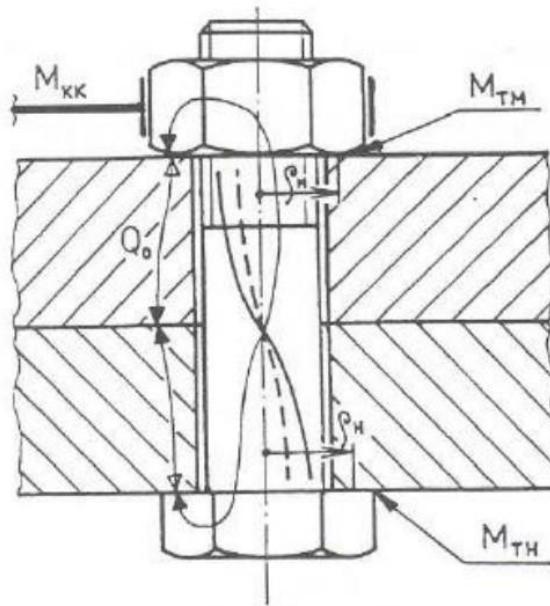
$$\sigma_t = \varepsilon \cdot E \quad [MPa]$$

Osová síla – předpětí:

$$Q_0 = \sigma_t \cdot S \quad [N]$$

kde S je průřez dřívku.

Šroub je namáhán tahem osovou silou Q_0 . Stejná síla svírá spojované desky mezi maticí a hlavou šroubu. Vzniká uzavřený silový okruh vzájemného působení vyznačený křivkou o intenzitě Q_0 . V procesu utahování postupně narůstá předpětí od nuly až do požadované hodnoty Q_0 . [11]



Obr. 9: Předepjatý šroubový spoj [11]

M_{TM} – třecí moment pod maticí $M_{TM} = Q \cdot f_M \cdot \rho_M$

M_Z – moment závitů $M_Z = Q \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \tan(\gamma + \varphi')$

M_{TH} – třecí moment pod hlavou $M_{TH} = Q \cdot f_H \cdot \rho_H$

f_M, f_H jsou součinitele tření pod maticí a pod hlavou

ρ_M, ρ_H jsou příslušné třecí poloměry

Potřebný moment na klíči je dán součtem:

$$M_{KK} = M_{TM} + M_Z$$

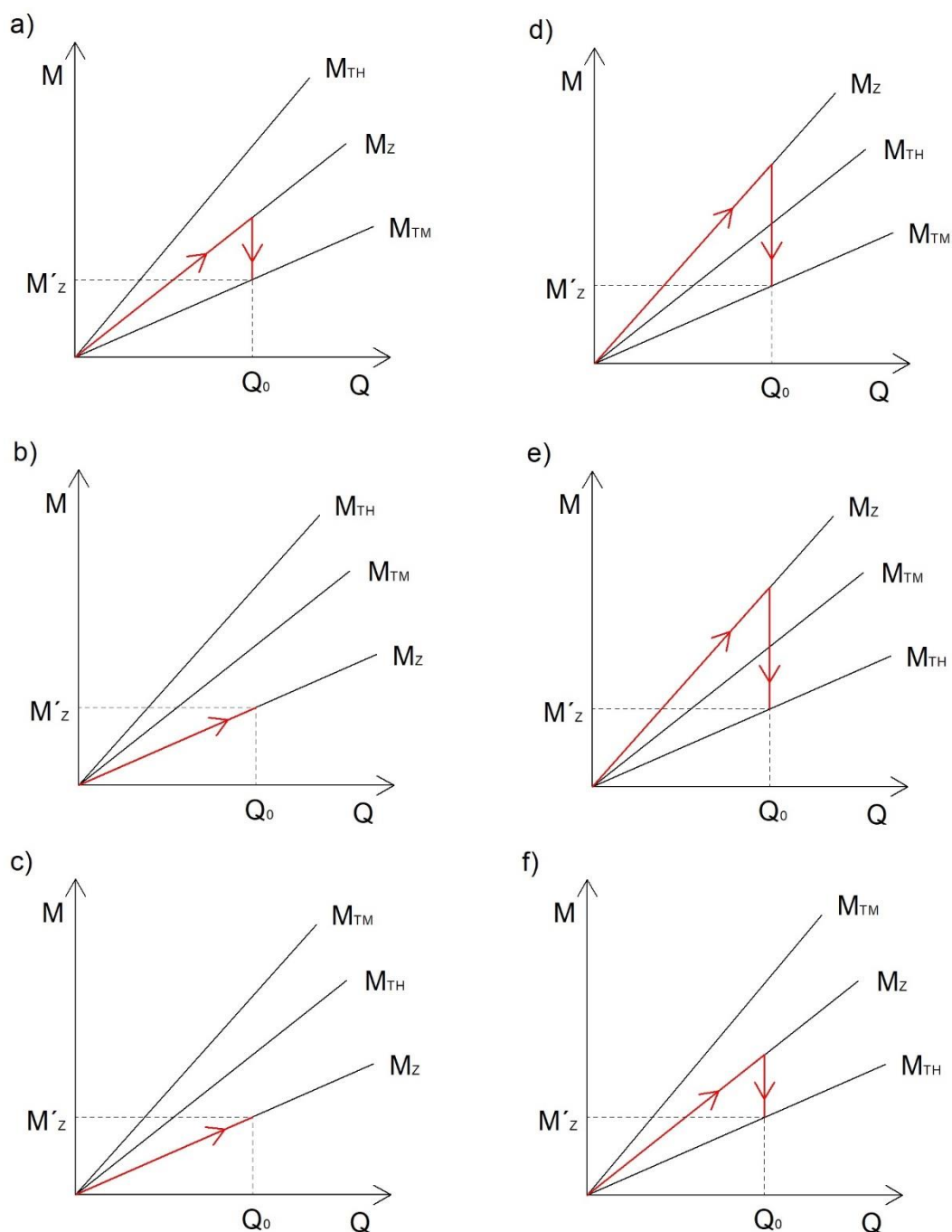
část M_{TM} překonává tření pod maticí a část M_Z postupuje závitěm do dřívku šroubu.

Mohou nastat dvě situace:

- $M_{TH} > M_Z$ pak je možno matici šroubu utahovat a dřív je namáhán na krut a příslušně zkrucován
- $M_{TH} < M_Z$ pak dochází k protáčení hlavy šroubu a je nutno při utahování přiložit klíč k hlavě šroubu a vyvodit pomocný moment M'_{KK}

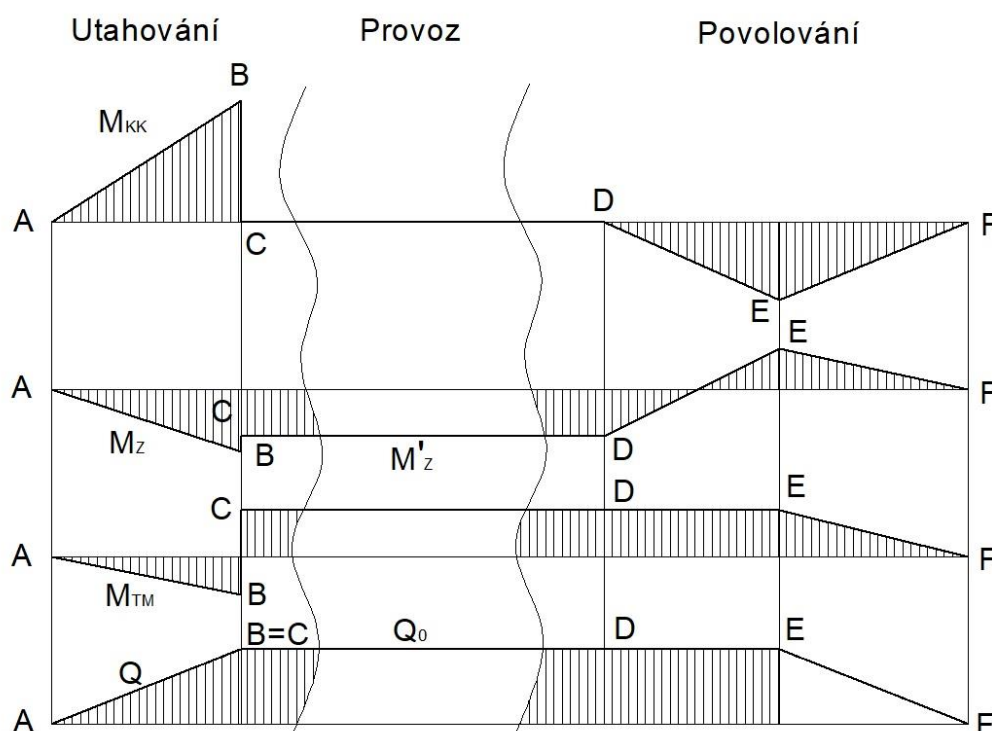
$$M'_{KK} + M_{TH} = M_Z$$

Po dotažení spoje na požadované předpětí a odložení klíčů může nastat několik situací. Jestliže je třecí moment pod hlavou nebo pod maticí menší než moment v závitě, dojde ke zpětnému protočení v ploše pod hlavou nebo pod maticí, a moment M_z klesne na rovnovážnou hodnotu M'_z (obr. 10 a, f). V případě, kdy je třecí moment pod hlavou i pod maticí menší než moment v závitě, klesne M_z na hodnotu menšího z nich (obr. 10 d, e). Pokud je třecí moment pod hlavou i pod maticí větší než moment v závitě, tak k prokluzu nedojde a M_z zůstane ve dřívku v plné hodnotě (obr. 10 b, c). [11]



Obr. 10: Průběhy momentu v procesu utahování [11]

Výhodný je případ spoje na obr. 10a, hlava šroubu se při utahování matice neprotáčí a moment ve dřívku M_z poklesne na hodnotu M'_z . Pro tento případ je na obr. 11 znázorněn diagram povolování a utahování. Při utahování utahovací moment překonává třecí moment pod maticí a moment závitů a v bodě B, kde je dosaženo montážního předpětí Q_0 , dosáhne svého maxima. Po uvolnění klíče klesá M_{KK} na nulu (body B-C). Nakroucený dřív šroubu momentem M_z se snaží napřímit a na to reaguje moment M_{TM} , který změnil smysl proti potenciálnímu pohybu. Jelikož je moment M_z větší než M_{TM} , tak dochází k prokluzu a poklesu M_z na M'_z . Při povolování se klíčem přivádí moment M_{KK} opačného smyslu. V první fázi (DE) narůstá moment M_{KK} a dochází k protočení matice vůči dosedací ploše, což provází pokles M_z snižujícím nakroucení dřívku. Pokračujícím nárůstem M_{KK} a prokluzem matice dochází k nakroucení dřívku a nárůstu momentu M_z v opačném směru. Ve druhé fázi povolování (EF) se již protáčí matice i vůči šroubu, to je provázeno poklesem všech momentů a předpětí až na nulovou hodnotu. [11]



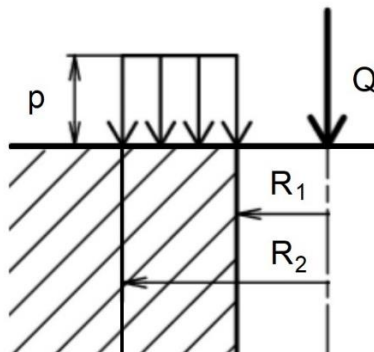
Obr. 11: Diagram procesu utahování a povolování [11]

1.7.2 Tlak a třecí moment pod maticí

V praxi se pod maticemi vyskytují tři druhy dosedacích ploch.

a) Stykovou plochou je mezikruží

Nejčastější případ šroubového spoje s normální maticí při dodržené kolmosti stykových ploch na osu šroubu.



Obr. 12: Dosedací mezikruhová plocha [11]

Střední tlak ve stykové ploše:

$$\bar{p} = \frac{Q}{\pi(R_2^2 - R_1^2)}$$

Třecí moment pod maticí:

$$M_{TM} = Q \cdot f_M \cdot R_S$$

kde R_S je střední poloměr.

b) Styková plocha kuželová

Speciální použití u spojů, kde je požadováno centrování spojovaných součástí vůči ose šroubu. Tyto spoje dosahují menšího rizika samouvlnění, ale jsou náročnější na přesnost výroby.

c) Styková plocha kulová

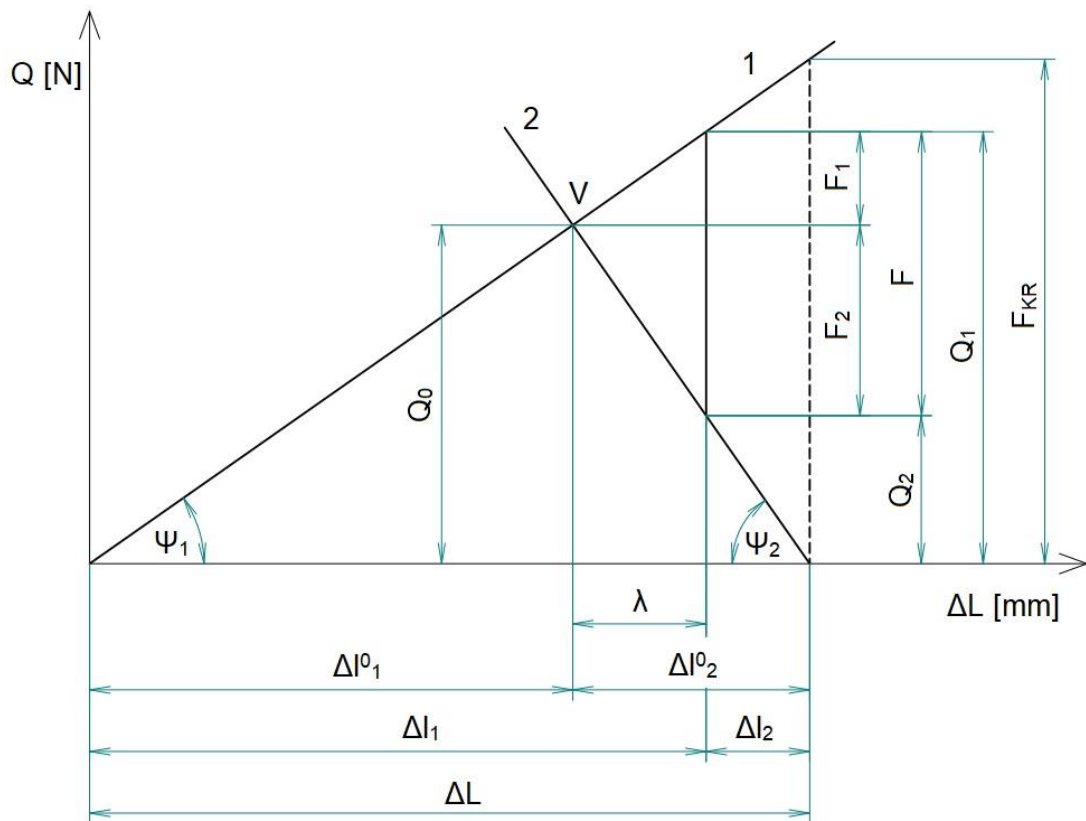
Speciální použití u spojů, kde hrozí narušení kolmosti dosedacích ploch na osu šroubu. Používají se kulové matice nebo kulové podložky.

1.7.3 Silové poměry ve šroubovém spoji

Předepjatý šroubový spoj je při montáži záměrně uveden do stavu vnitřní napjatosti realizované předpětím Q_0 a působí na něj za provozu soustava rovnovážných vnějších sil F . Řešení spoje se provádí pomocí Rötšcherova diagramu „síla – deformace“, viz obr. 13. Pro ukázkou Rötšcherova diagramu byl vybrán model šroubu a matice, který svírá dvě tenkostěnné trubky. Na šroub a na trubky lze nahlížet jako na

pružiny o neobyčejně velké tuhosti a lze definovat jejich tuhostní charakteristiky. V případě šroubu konstantu tuhosti v tahu C_1 a u trubky konstantu tuhosti v tlaku C_2 . Obě konstanty tuhosti vyjadřují lineární závislost mezi osovou silou Q a vyvolanou deformací ΔL . [11]

$$C_1 = \frac{Q_0}{\Delta l_1^0}, \quad C_2 = \frac{Q_0}{\Delta l_2^0} \quad \left[\frac{N}{mm} \right]$$



Obr. 13: Rötscherův diagram [11]

V diagramu přímka 1 představuje šroub a přímka 2 svírané trubky. V průběhu utahování se matice posune o délku ΔL a ve spoji dojde ke vzniku předpětí Q_0 . Při posunu matice o ΔL dojde ke stlačení trubky Δl_2^0 a prodloužení šroubu Δl_1^0 . Po účinku vnější osové síly F , která působí v dosedacích plochách šroubu a matice, se deformace šroubu zvětší o hodnotu λ na celkové prodloužení Δl_1 a na šroub v tomto okamžiku působí síla Q_1 . Prodloužení šroubu vede k poklesu stlačení trubky na hodnotu Δl_2 a na trubku působí síla Q_2 . Původní silový tok o velikosti montážního předpětí Q_0 se tedy změnil, ve šroubu vzrostl na velikost Q_1 a trubky jsou svírány už jen silou Q_2 , která se označuje jako provozní předpětí. Výsledné vnitřní síly jsou dány vztahem: [11]

$$Q_1 = Q_0 + F_1, \quad Q_2 = Q_0 + F_2 \quad [N]$$

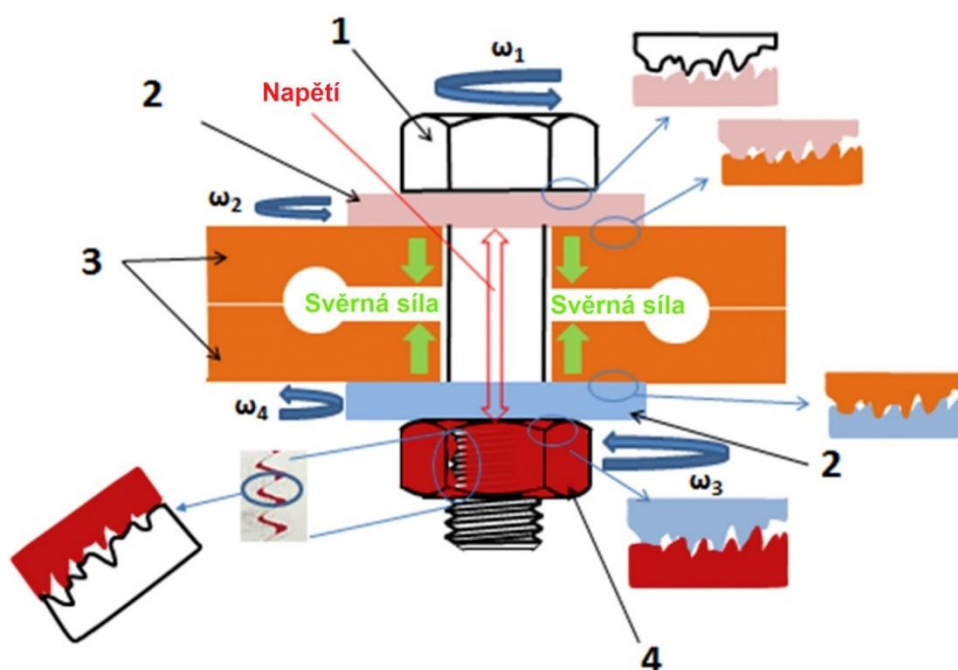
kde F_1 síla přitěžující šroubu a F_2 síla odlehčující trubkám a jsou dány vztahem:

$$F_1 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot F, \quad F_2 = \frac{C_2}{C_1 + C_2} \cdot F \quad [N]$$

V praxi se ovšem nejčastěji objevují případy komplikovanějších typů spojení s kombinovaným namáháním a jejich řešení je o to složitější. Předepjatý spoj se může skládat kromě šroubu a matice i z většího počtu tuhostně různorodých sevřených součástí. Vnější zatížení F také nemusí vždy ležet v dosedacích plochách pod hlavou a maticí a může se v čase měnit. [11]

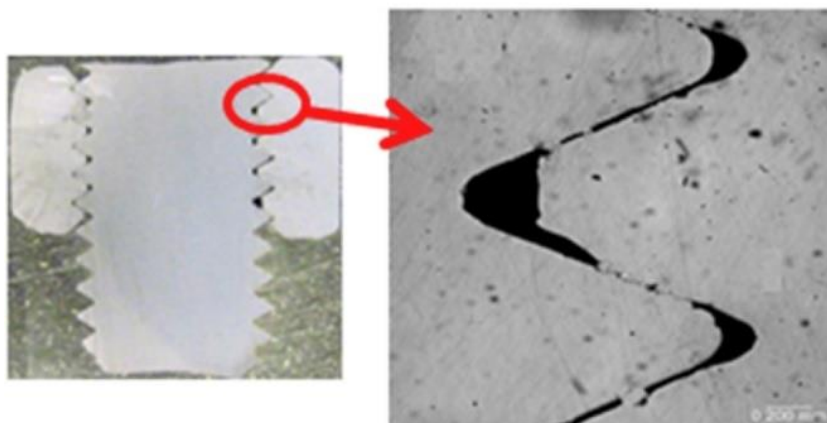
1.7.4 Tření ve šroubovém spoji

Pro správnou funkci šroubového spoje je důležité při montáži znát utahovací moment, pomocí kterého se dosáhne požadovaného předpětí. Velikost utahovacího momentu je závislá na součiniteli tření. Třecí síly působící v utahovaném šroubovém spoji vznikají na rozhraní spojovacích a spojovaných prvků. Ke tření dochází pod maticí, v závitech a pod hlavou šroubu, v případě použití podložek i pod nimi. Stanovení součinitele tření není ovšem jednoduché, protože jej ovlivňuje řada faktorů, např. materiál, kvalita povrchu (drsnost), mazivo, povrchová úprava, velikost zatížení, teplota, nečistoty aj. Z tohoto důvodu nelze stanovit hodnotu součinitele tření, která by měla obecnou platnost. [15]



Obr. 14: Oblasti tření ve šroubovém spoji [15]

Při utahování šroubového spoje může vlivem tření dojít ke svaření materiálu za studena, což vede až k zadření závitu. K tomuto jevu dochází především u šroubů vyrobených z legovaných materiálů obzvláště z austenitických ocelí. Tyto oceli nemají na povrchu vrstvu oxidů, která by od sebe oddělovala základní materiály při tření. Při utahování matice pak dochází ke svaření za studena. Těmto jevům lze předejít použitím vhodného maziva. Vhodným mazáním lze také docílit snížení velikosti součinitele tření a prodloužení životnosti spoje. [18]



Obr. 15: Mikroskopický snímek šroubu a matice v řezu [15]

1.8 Mazání

Mazání má zásadní vliv na síly působící ve šroubovém spoji. Vhodné mazání prodlužuje životnost spojů, protože vrstva maziva snižuje špičky pnutí v závitu, dosáhne se lepšího záběhu závitu a dřík šroubu je méně namáhán na krut. Šroubové spoje nejsou pro mazání příliš vhodné díky komplikovanému tvaru a zpracování, také často obsahují nečistoty a mohou být poškozeny dopravou nebo skladováním. Pro snížení tření ve šroubových spojkách se jako maziva používají oleje, plastická maziva, tuhá maziva a kluzné laky. Maziva, konkrétně olejové filmy, se také používají jako ochrana proti korozi při přepravě šroubů. [18]

1.8.1 Mazací oleje

Mazací oleje jsou obecně nejrozšířenější druh maziv. Kromě mazání jsou také využívány k odvádění tepla, které vzniká třením. Pro mazací oleje je typická dobrá zatékavost a smáčivost stykových ploch. Kromě odvodu tepla mají také čistící účinky a odplavují nečistoty a částice vzniklých třením a opotřebením z prostoru třecích ploch. V minulosti se nejvíce používaly minerální oleje, které se vyrábí destilací, rafinací a

odparafinování ropy. Jsou to směsi, které jsou upravovány jen malým množstvím přísad. Dnes už jsou minerální oleje pro spoustu aplikací nevyhovující a jsou nahrazovány syntetickými oleji, které mají lepší mazací vlastnosti a lepší odolnost proti vyšším teplotám. Oleje mají nízkou odolnost proti vysokým tlakům a při použití v případě šroubových spojů může dojít k nedostatečnému mazání třecích ploch. K vylepšení mazacích vlastností při vyšších tlacích se oleje míchají s tuhými mazivy. [18,19]

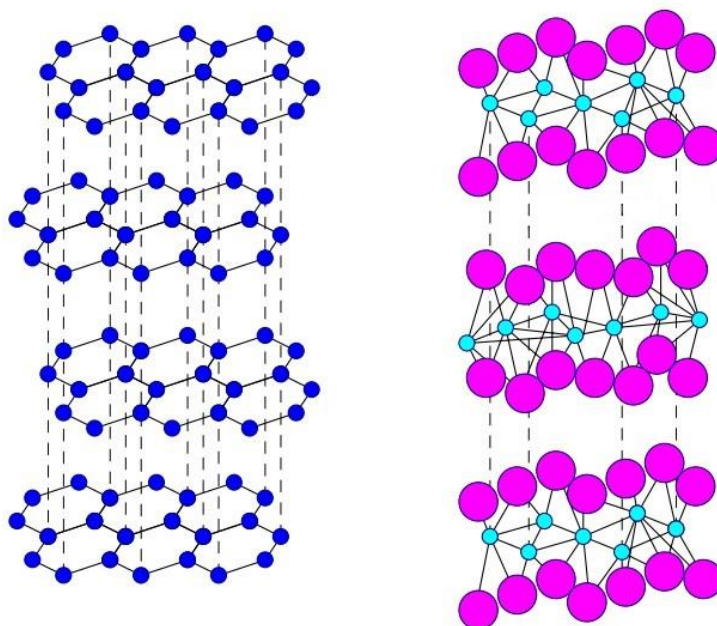
1.8.2 Plastická maziva

Plastická maziva se vyrábí smícháním minerálních nebo syntetických olejů, zahušťovadla a aditiv. Jako zahušťovadla se používají mýdla, anorganické látky nebo organické polymery. Přidáním aditiv lze dosáhnout specifických vlastností maziva, např. přidáním grafitu. Výhoda plastického maziva je dlouhá doba setrvaní na mazaných stykových plochách a ochrana proti vnějším vlivům, jako je vlhkost, koroze, znečištění aj. Základ plastických maziv je až z 85 % z olejů a musí se tedy počítat s nižší odolností vůči vysokým tlakům, což ale mohou kompenzovat přidaná aditiva v podobě tuhých maziv. [3,19]

1.8.3 Tuhá maziva

Tuhá maziva se používají v případech, kdy není vhodné použití olejů nebo plastických maziv. K takovým případům dochází při velkých zatíženích, vysokých teplotách nebo ve velmi prašných prostředích. Tuhá maziva jsou pevné látky, které působí jako distanční tělíška, takže nedochází k dotyku povrchů kovu a tím snižují tření a opotřebení. Mají velkou tvrdost, smykovou pevnost a vysokou afinitu ke kovům. Nejpoužívanější tuhá maziva pro mazání šroubových spojů jsou grafit a sirník molybdeničitý MoS_2 , ale také polytetrafluorethylen (PTFE), měď, hliník nebo olovo. Mazací účinek grafitu a sirníku molybdeničitého je způsoben jejich lamelovou krystalickou strukturou, viz obr. 16. V mřížce grafitu jsou atomy v jednotlivých vrstvách uspořádány hexagonálně. Zatímco silné vazby ve vrstvách zabraňují pronikání nerovností povrchu, slabé vazby ve vrstvách způsobují jednoduchý přesun jednotlivých lamel. Grafit lze použít i v teplotách nad 400 °C, kde již molekuly síry sirníku molybdeničitého způsobují korozi. V mřížce sirníku molybdeničitého je jedna rovina atomů molybdenu sendvičově obklopena dvěma rovinami atomů síry. Vazba atomů síra – síra dosáhne nízké odolnosti krystalu sirníku molybdeničitého ve stříhu. Vrstvy síry se vážou na kovový povrch a velice dobře přilnou. Lamely se orientují rovnoběžně

s povrchem a vytváří tenký film s nízkým součinitelem tření a velkou odolností proti tlaku. [19,20]



Obr. 16: Krystalická struktura grafitu (vlevo) a sirníku molybdeničitého (vpravo) [19]

1.8.4 Kluzné laky

Kluzné laky se skládají z kombinace tuhých maziv (sirník molybdeničitý, grafit, PTFE) v organické nebo anorganické vazbě s rozpouštědly. Po vytvrzení laku se vytvoří pevná vrstva s mazacími účinky. Správně navržené vrstvy mají stálé vlastnosti i v extrémních podmínkách. Odolávají vysokým teplotám až přes 300 °C a chladu až do -180 °C. Mají také dobrou odolnost proti chemickým vlivům a nízký součinitel tření. Při aplikaci kluzných laků je potřeba důkladné očištění povrchů a odmaštění. Po nanesení se kluzné laky vysušují nebo se pro zvýšení účinnosti vypalují. Při dodržení správného technologického postupu se dosahuje nízkých hodnot součinitele tření při malém rozptylu. [19]

Tab. 5: Orientační hodnoty součinitele tření u povrchově neupravených (černých) šroubů [19]

| Mazivo | Koeficient tření μ [-] |
|-------------------------|----------------------------|
| Čistý povrch bez maziva | 0,15 až 0,35 |
| Plastické mazivo | 0,08 až 0,18 |
| Tuhé mazivo | 0,08 až 0,12 |
| Kluzný lak | 0,06 až 0,1 |

1.9 Selhání šroubových spojů

K selhání šroubového spoje může dojít z několika důvodů. Nejčastějšími důvody jsou chybně dimenzované spojovací části, především při dynamickém zatížení, nesprávná montáž, zadírání, koroze, tepelné podmínky aj. Z těchto důvodů může dojít k nevratnému poškození spojovacích součástí v podobě lomu, stržení závitu apod., ale také může dojít ke ztrátě předpětí a tím dojde k samovolnému povolení šroubového spoje. [22]

1.9.1 Nedostatečné předepnutí

Nedostatečné předepnutí šroubového spoje je jednou z nejčastějších příčin selhání. Síla předpětí je během montáže výrazně ovlivněna třením mezi závity a třením mezi kontaktními plochami spojovacích prvků a součástí. Napínací síla šroubu je tedy ve velké míře závislá na součiniteli tření viz následující rovnice. [23]

$$M_A = F_M \cdot \left(0,16p + 0,58 \cdot d_2 \cdot \mu_G + \frac{D}{2} \cdot \mu_K \right)$$

Kde:

M_A [Nm] = utahovací moment šroubu

F_M [N] = napínací síla šroubu

p [mm] = stoupání závitu

d_2 [mm] = střední průměr šroubovice závitu

μ_G [-] = součinitel tření v závitu

$D/2$ [mm] = účinný třecí rádius hlavy

μ_K [-] = součinitel tření dosednutí hlavy

Při konstantním utahování momentem M_A bude při nízkém součiniteli tření μ_G a μ_K napínací síla vysoká a naopak. Účinnost montáže šroubových spojů je přibližně 10 %. Z vynaložené utahovací síly dochází ke ztrátě až 50 % jako tření hlavy a až 40 % jako tření v závitu. Na vytvoření požadované napínací síly zbývá jen 10 %. [23]

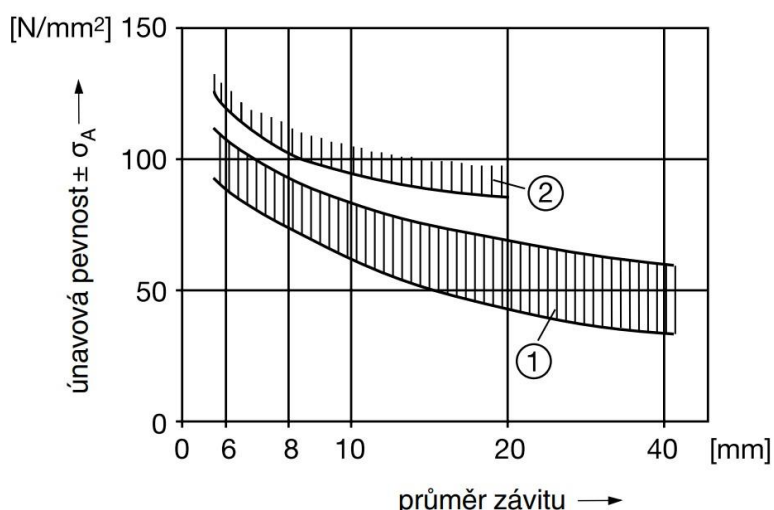
1.9.2 Zadírání

K zadírání šroubů dochází v důsledku nedostatečného mazání nebo následkem koroze. Mezi příčiny zadření šroubových spojů patří svaření za studena, vyhřátí, koroze nebo odírání kmitavým třením. Především u vysoce legovaných austenitických ocelí dochází snadno ke svaření za studena. Tyto oceli postrádají přirozenou vrstvu oxidů, která by dokázala účinně oddělit spojovací součásti a pokud nejsou opatřeny vhodnou povrchovou ochranou nebo vrstvou maziva, dochází často již při utahování matice ke svaření povrchů. [23]

Při vystavování šroubových spojů vyšším teplotám dochází ke vzniku dodatečných namáhání a v závislosti na druhu materiálu, ze kterého jsou spojovací prvky vyrobeny, vznikají tvrdé a křehké vrstvy okují, které následně blokuji závit a znemožňují povolení šroubového spoje. [23]

1.9.3 Únavová pevnost

Šrouby jsou opatřeny závitem a jedná se tedy o konstrukční díly s vruby. Při proměnlivém zatížení může u šroubů dojít k únavovému lomu, který v 90 % případů vzniká v oblasti první nosné části závitu na vstupu závitu do matice. Při návrhu spoje musí být zohledněna únavová pevnost, která je nezávislá na statickém zatěžování a činí pouze zlomek pevnosti v tahu. U žárově zinkovaných šroubů je odolnost proti únavě o cca 20 % nižší než u šroubů s konečnou operací kalení a popuštění. [24]



Obr. 17: Únavová pevnost (směrnice VDI 2230) 1. závit válcován, pak kaleno a popuštěno, 2. kaleno a popuštěno, pak válcován závit. [24]

Ke zvýšení odolnosti proti únavě šroubových spojů jsou vhodná všechna opatření, která snižují účinné špičky pnutí nebo brání kombinovanému namáhání. Možná opatření: pružné šrouby s redukováným dříkem místo s plným, kovové kolíky nebo lícované šrouby k zachycení střížných sil, dostatečné předpětí šroubů. [24]

1.10 Povrchové úpravy šroubů

Šroubový spoj je velmi důležitou součástí ve strojírenství a mezi důležité patří nejen parametry materiálové, konstrukční, technologické, ale také parametry stavu povrchu. Šroubový spoj se řadí mezi rozebíratelné spoje a tato vlastnost má zásadní vliv na jeho životnost. Po dobu životnosti nesmí dojít ke koroznímu poškození, proto musí mít materiál dostatečnou korozní odolnost v daném prostředí. [25]

Šroubové spoje je možné chránit různými úpravami povrchu podle jejich určení. Předpokladem je, že povrchová úprava nesmí negativně ovlivnit vlastnosti materiálu, např. popuštění, vodíková křehkost. Musí být také dodrženy rozměrové tolerance šroubu. [32]

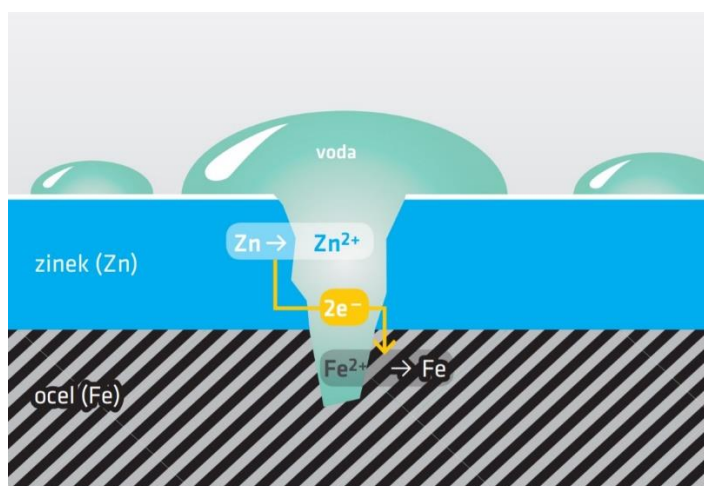
Ochranné povlaky slouží kromě estetického hlediska, také k zamezení přímého vlivu agresivního prostředí na součástku a tím zajišťují ochranu před korozí. V případě šroubových spojů je nejvýznamnější ochranným prvkem zinek. Zinek se aplikuje buď galvanicky, tj. elektrochemickým způsobem nebo ponorem do taveniny roztavených solí zinku, tzv. žárové zinkování. Odolnost galvanicky nanášených povlaků zinku se může zvýšit modrým nebo žlutým chromátováním. Mezi další využívané kovové povlaky patří povlaky niklu, kadmia a chromu, které jsou nanášeny galvanickým způsobem, v případě niklu případně i chemickou cestou. Další skupinou povrchových úprav šroubových spojů jsou nekovové povlaky, které se dělí na povlaky organické a anorganické. Přehled nejpoužívanějších povlaků šroubových spojů je uveden v následující tabulce. [32]

Tab. 6: Druhy povrchových úprav [32]

| Druh povrchové úpravy | Technologie | Typ povlaku |
|-----------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Kovové | Žárové pokovení (ponor) | Žárový zinek |
| | Galvanické pokovení | Zinek, nikl, kadmium, chrom |
| | Chemické pokovení | Nikl |
| | Pokovení v lázni | Dacromet, Delta Tone |
| | Mechanické pokovení | Zinek (plátování) |
| Nekovové | Organické povlaky | Barvení, kluzné laky, PTFE |
| | Anorganické povlaky | Černění, fosfátování |

1.10.1 Zinkování

Nejpoužívanější povrchovou úpravou šroubových spojů jsou povlaky zinku a jeho slitin. Zinek je méně ušlechtilý než ocel a chrání základní materiál katodicky. Zinek díky katodické ochraně zabraňuje poškození základního materiálu i při poškození samotného povlaku. Zinek se železem tvoří ve vlhku elektrochemický článek a při reakci dochází ke vzniku hydroxidu zinečnatého. Tento proces probíhá až do spotřebování veškerého zinku. Hlavní výhodou je tedy dobrá korozní odolnost a dále odolnost proti mechanickému poškození a nízké výrobní náklady. [26]



Obr. 18: Schéma reakce zinku a oceli při porušení zinkové vrstvy [26]

Nejčastější zinkové povlaky lze rozdělit podle technologie výroby na:

➤ **Galvanické zinkování:**

Galvanické zinkování je elektrolytický proces, což vypovídá o odlišném technologickém procesu, než je tomu v případě žárového zinkování.

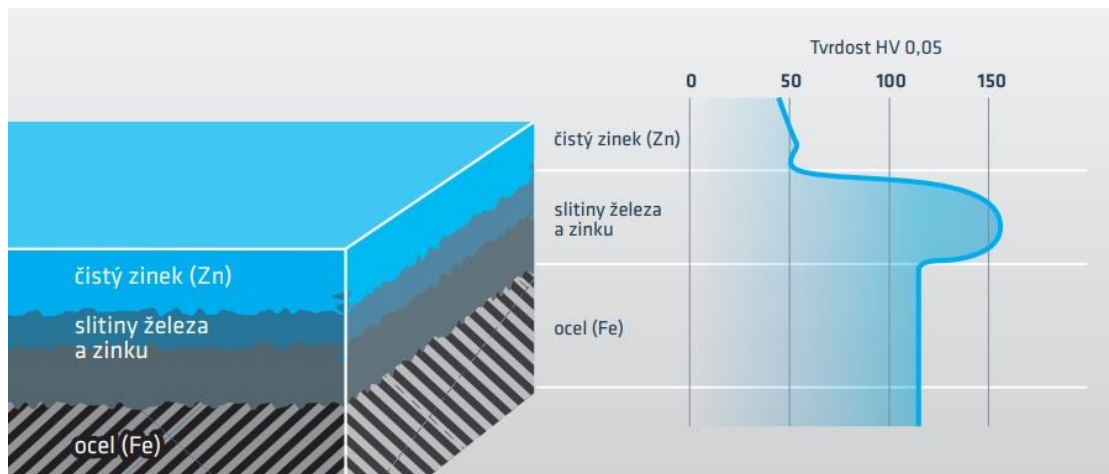
Před samotným pokovením je nutné povrch dílů zbavit nečistot, rzi, okují, odmastit a odmořit. Pokovení probíhá ve vodním roztoku zinečnaté soli, kde pokovovaný díl je zapojen ke zdroji stejnosměrného proudu jako katoda. Elektrolyt může být kyselý, alkalický i neutrální. Jako anoda jsou zapojeny desky čistého zinku. Po zapojení proudu probíhá elektrolytický děj, kde se z anody rozpouští zinek a vylučuje se na povrchu pokovovaného dílu. Pokovené díly se dále mohou chromátovat. [28]

➤ **Povlaky s mikrolamelami zinku:**

Povlaky s mikrolamelami zinku se nanáší neelektrolyticky a dělí se podle výrobních technologií na systémy ředidlové a na systémy vodou ředitelné. Tenký povlak je vytvářen ponořením za studena do emulze a následným odstředěním předmětů a vytvrzením v peci. Tím se zcela vylučuje riziko vodíkové křehkosti. Následně se provádí pasivace ochranné vrstvy, po které poskytuje povlak kvalitní ochranu proti korozi. Obě skupiny povlaků mají tloušťku v rozmezí 8 až 12 μm . Povlaky jsou tvořeny z mikrolamel zinku a pojiva a mohou obsahovat další prvky, které mohou například snížit koeficient tření. [29]

➤ **Žárové zinkování:**

Žárové zinkování je povrchovou úpravou ocelových spojovacích součástí. Zajišťuje dobrou a trvanlivou ochranu proti korozi. Postup žárového zinkování je relativně jednoduchý. Spojovací součásti jsou ponořeny do lázně roztaveného zinku s teplotou mezi 455 a 480°C a vysokou teplotou mezi 530 a 560°C. Dále jsou spojovací součásti odstředěny, aby došlo k odstranění přebytečného zinku. Poté probíhá ochlazení ve vodě. Výsledkem je zinková vrstva, která je v porovnání s galvanickým zinkováním relativně silná (40 až 70 μm). Výsledný povlak zinku tvoří na povrchu oceli slitinové fáze železa a zinku a je uzavřen povlakem čistého zinku. Slitina železa a zinku je tvrdší než základní materiál. [27]



Obr. 19: Schéma zinkového povlaku a průběh křivky tvrdosti. [26]

1.10.2 Fosfátování

Principem fosfátování je vytvoření nerozpustné vrstvy fosforečnanů na povrchu dílu. Ve fosfátovací lázni dochází k rozpouštění povrchové vrstvy materiálu železa nebo zinku a u povrchu dochází k vylučování nerozpustného fosforečnanu příslušného kovu. Podle toho se jedná o fosfátování železnaté nebo zinečnaté. Procesem fosfátování je vytvořena nevodivá, nerozpustná konverzní vrstva, která vylepšuje přilnavost nátěrů a tím korozní odolnost a odolnost proti podkorodování. Samotný povlak z důvodu porezity neposkytuje dostatečnou ochranu základního materiálu. Pro dosažení korozní odolnosti se povrch impregnuje olejem. Tento povlak vytváří adhezní vrstvu, která je dobrým nosičem lubrikantů, což je využíváno ke snížení tření. [30]

1.10.3 Kompozitní galvanické povlaky

Kompozitní galvanické povlaky jsou typem kompozitního materiálu, které mají kovovou galvanicky vyloučenou matici, ve které jsou obsaženy dispersní částice. Matrice významně ovlivňuje výsledné vlastnosti kompozitního povlaku a je jednou z hlavních částí povlaku. V matici jsou ukotveny disperzní částice, které mají výrazný vliv na výsledné vlastnosti kompozitního povlaku a jeho aplikaci. Disperzní částice lze rozdělit na částice tvořené prvky a částice tvořené sloučeninami a nekovy. Využitím vlastností kompozitních povlaků a možnosti tepelného zpracování (u slitinných povlaků) vznikají další možnosti uplatnění. Je možné vylučovat tvrdé povlaky, ořezuvzdorné, kluzné, antiadhezivní, samomazné, tepelně odolné a případné kombinace těchto vlastností. [25]

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

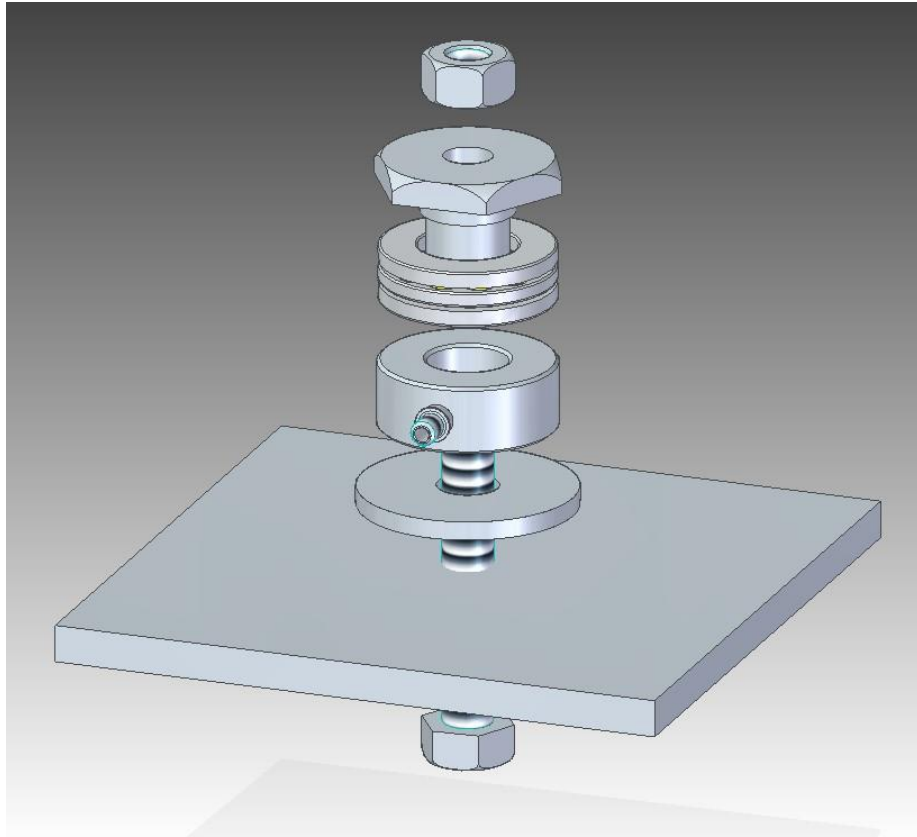
Cílem experimentální části práce je stanovení vlivu tření na montážní předpětí šroubového spoje. Při montáži předepjatého šroubového spoje je důležité znát potřebný utahovací moment, kterým je dosaženo optimálního předpětí. Z teoretické části práce je patrné, že na dosažení optimálního předpětí má zásadní vliv velikost součinitele tření v závitu a pod maticí. Stanovení součinitele tření je obtížné z důvodů řady faktorů, které ho ovlivňují např. použitý materiál, mazivo, kvalita povrchu, nečistoty, teplota aj. Prvním úkolem je tedy návrh zkušebního zařízení, pomocí kterého je možné stanovit vliv tření v závitu a pod maticí na velikost předpětí. Dalším úkolem je samotné testování šroubů na zkušebním zařízení a stanovení koeficientu tření při použití různých druhů maziva.

2.1 Návrh zkušebního zařízení

Zkušební zařízení musí být zkonstruováno tak, aby bylo schopné určit velikost tření v závitu a pod maticí nezávisle na sobě. Důvodem je určení vlivu jednotlivých složek tření na velikost předpětí šroubového spoje. Navrhnutý a zkonstruovány byly tedy dvě zařízení. Pomocí prvního je možné stanovit velikost tření v závitu a druhé slouží k určení velikosti tření pod maticí.

2.1.1 Tření v závitu

Aby bylo možné při utahování šroubového spoje určit pouze vliv velikosti tření v závitu na velikost předpětí, je nutné eliminovat tření pod utahovanou maticí. Jako vhodný prvek bylo vybráno axiální ložisko, které je umístěno pod maticí a tím je minimalizována velikost tření pod maticí. K určitému tření dochází i v samotném ložisku, ale tento vliv je v porovnání se třením pod maticí bez ložiska zanedbatelný.



Obr. 20: Model zkušebního zařízení na určení vlivu tření v závitu

Základnu zkušebního zařízení tvoří ocelová deska s otvorem opatřeným závitem, do které je zašroubován testovaný šroub. Na šroubu je dále nasezena podložka, na kterou doléhá piezoelektrický snímač osově síly a následuje axiální ložisko. Kvůli vystředění snímače a ložiska vůči šroubu je pod maticí umístěna středící podložka. Princip zařízení spočívá v měření okamžité osově síly (předpětí) ve šroubovém spoji při utahování matice momentovým klíčem, čímž lze určit vzájemnou závislost obou veličin.



Obr. 21: Zkušební zařízení na určení vlivu tření v závitu

Použité komponenty zkušebního zařízení:

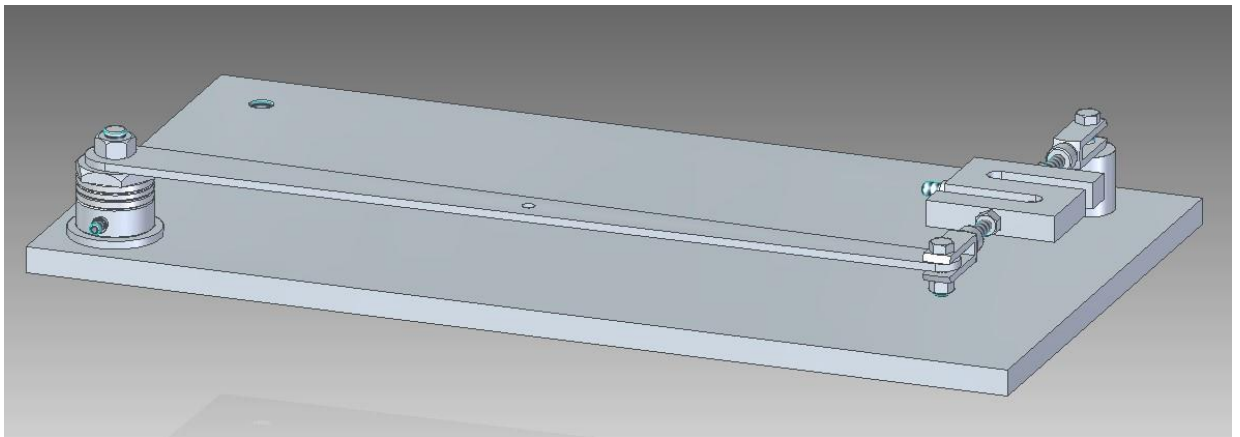
- Snímač osově síly – KISTLER 9103A
Měřicí rozsah – 0 až 100 kN
- Měřící jednotka – KISTLER Charge Meter Type 5015
- Axiální ložisko – SKF 51102
- Testované šrouby a matice – M6, M8, M10



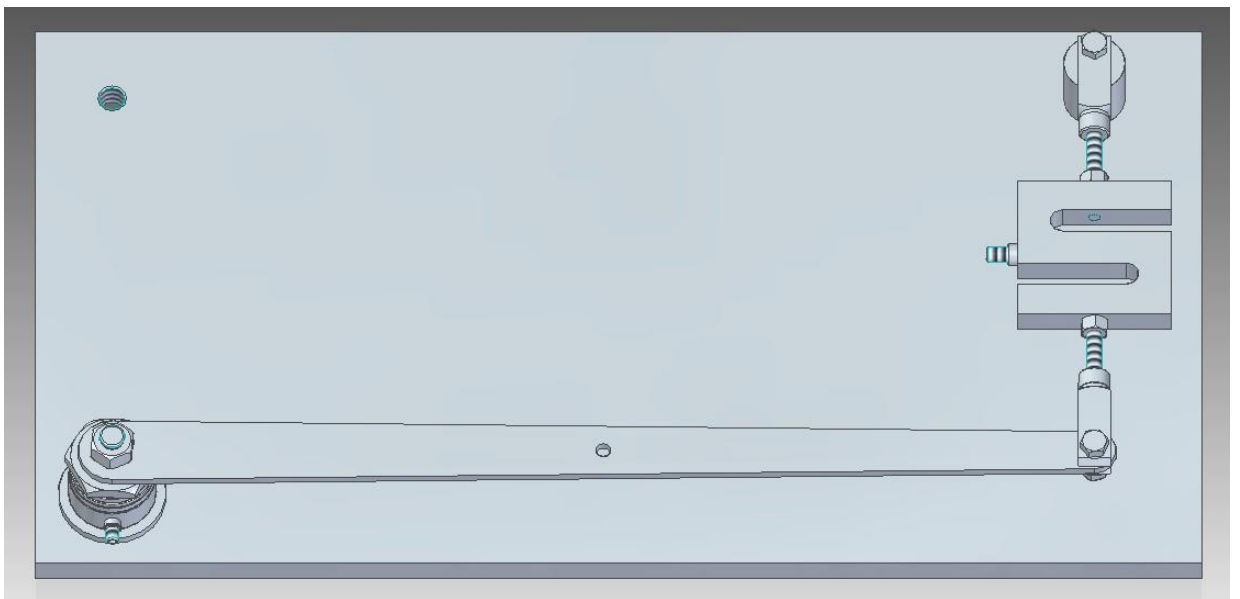
Obr. 22: Připravený testovaný vzorek včetně měření prodloužení

2.1.2 Tření pod maticí

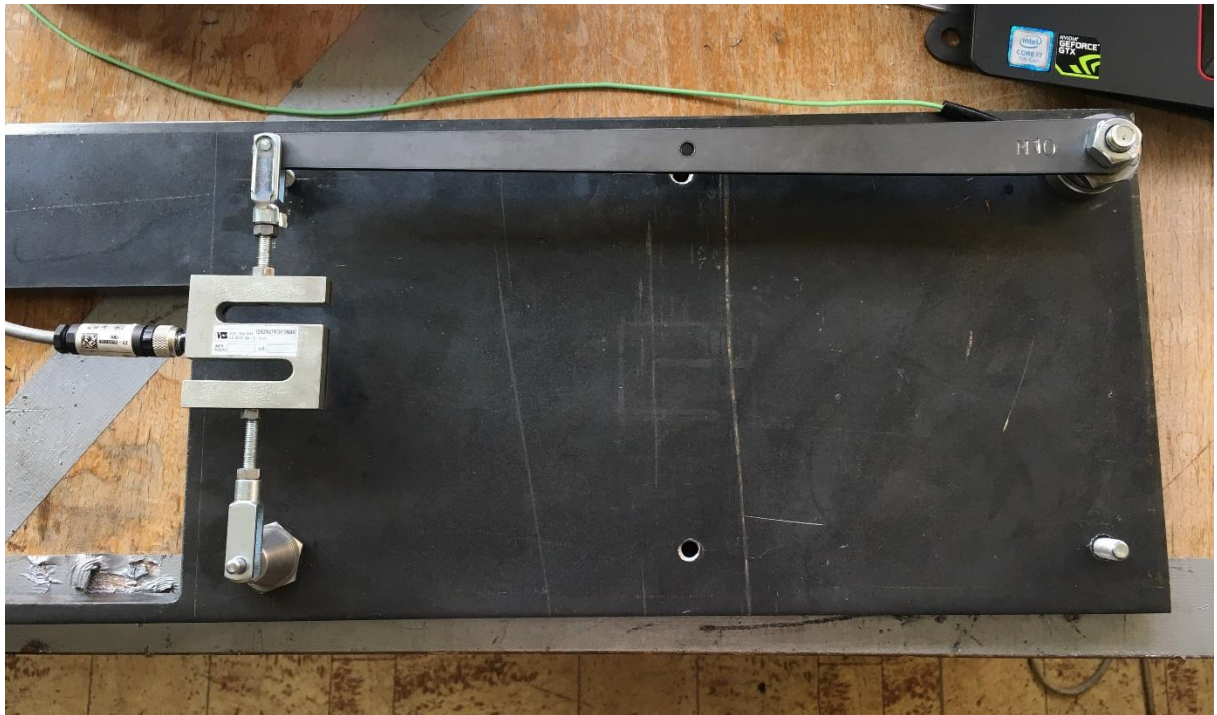
Při návrhu zařízení na měření velikosti tření pod maticí bylo vycházeno z předchozího návrhu zařízení na měření velikosti tření v závitě. Mezi maticí a středící podložkou bylo vloženo rameno o známé délce, které je na druhém konci pevně spojeno se sloupkem pomocí tenzometrického snímače. Při utahování matice dochází ke tření mezi povrchy matice a ramene a vzniká třecí moment, který se projeví jako síla na rameni. Vzniklá síla je zaznamenána pomocí tenzometrického snímače a následně lze díky známé délce ramene vypočítat hodnotu třecího momentu při konkrétním utahovacím momentu.



Obr. 23: Model zkušebního zařízení na určení vlivu tření pod maticí



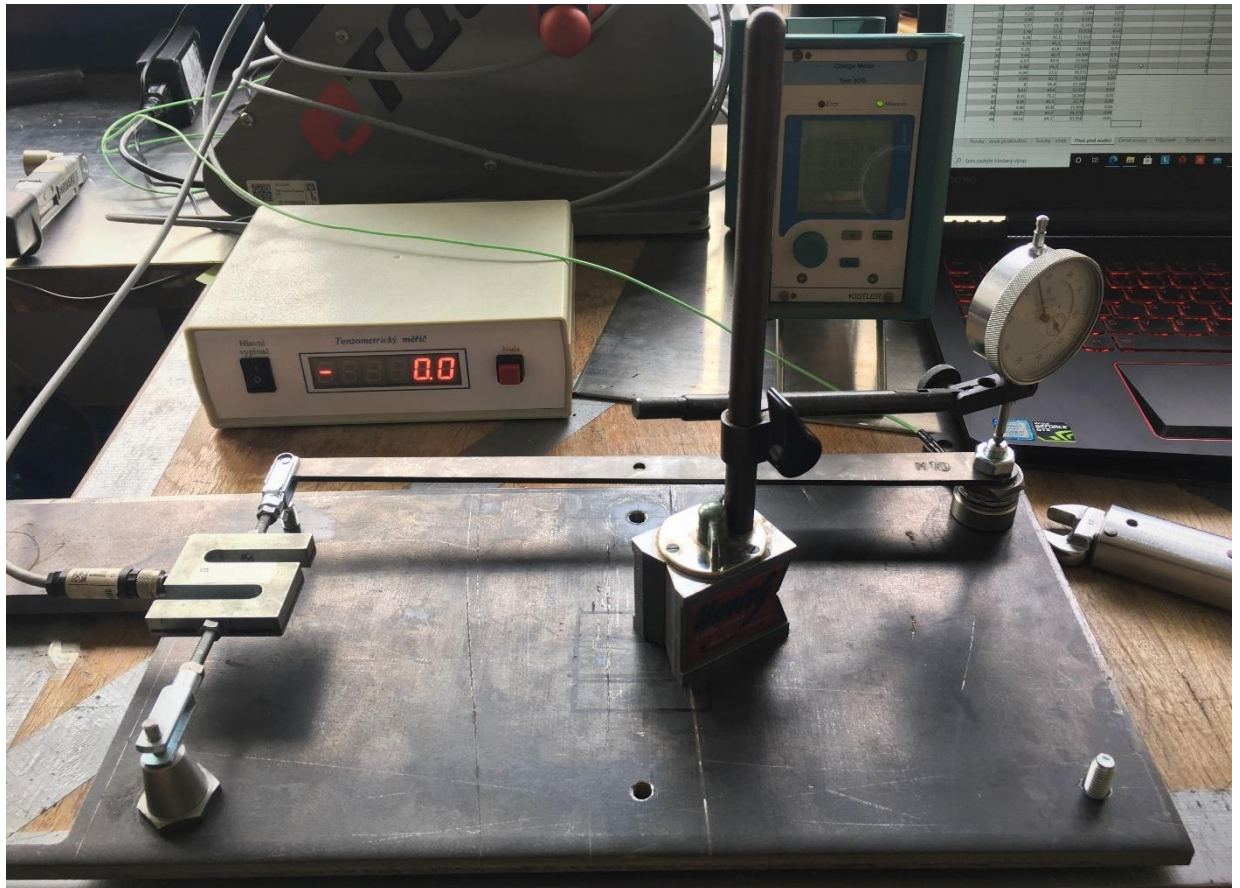
Obr. 24: Model zkušebního zařízení na určení vlivu tření pod maticí, pohled shora



Obr. 25: Zkušebního zařízení na určení vlivu tření pod maticí

Použité komponenty zkušebního zařízení:

- Snímač osově síly – KISTLER 9103A
Měřicí rozsah – 0 až 100 kN
- Měřicí jednotka – KISTLER Charge Meter Type 5015
- Axiální ložisko – SKF 51102
- Tenzometrický snímač – VTS, typ F181
Měřicí rozsah – 0 až 100 N
- Tenzometrické měřicí zařízení – TENZ 2307C
- Testované šrouby a matice – M8, M10



Obr. 26: Zkušebního zařízení na určení vlivu tření pod maticí včetně měření prodloužení

2.2 Postup a metodika měření

2.2.1 Příprava vzorků

Jako testované vzorky byly vybrány šrouby a matice M6, M8 a M10 o pevnostní třídě 8.8, opatřené povrchovou úpravou zinkováním. Důvodem výběru těchto šroubů je velmi rozšířené využití mezi rozebíratelnými spoji. V případě testování vzorků bez maziva nebyly šrouby ani matice čištěny ani odmašťovány, aby bylo dosaženo výsledků, které odpovídají běžné montáži. V případě testování vzorků s mazivem bylo mazivo aplikováno jak na závit šroubu, tak na matici.



Obr. 27: Testované šrouby a matice

Na část testovaných vzorků byl aplikován kluzný lak GLEIT – μ GL 220. Před samotnou aplikací laku bylo nutné šrouby očistit od nečistot a následně došlo k jejich důkladnému odmaštění pomocí acetonu. Kluzný lak ve formě spreje byl aplikován na závit šroubu a celou matici.



Obr. 28: Šrouby a matice opatřené kluzným lakem

2.2.2 Použitá maziva

Při samotném testování vzorků bylo použito několik typů maziv, aby bylo možné určit jejich vliv na velikost tření a tím i vliv na dosažené předpětí šroubového spoje. Mazivo bylo nanášeno v dostatečném množství na závit šroubu i na matici. Záměrně byla vybrána také maziva, která nejsou určena k mazání šroubových spojů (motorový a parafínový olej), aby bylo možné dokázat, zda má prokazatelný vliv na snížení velikosti koeficientu tření i mazivo, které není k tomuto účelu primárně určeno.

Použitá maziva:

➤ **Parafínový olej**

➤ **Motorový olej BEL – RAY EXP 10W-40**

Syntetický olej pro čtyřdobé motory s mokrou i suchou spojkou.

➤ **Plastické mazivo MOGUL G3**

Plastické mazivo na bázi vápenatých mýdel, mající krátkovláknitou strukturu a obsahující tuhé mazivo – grafit.

➤ **Kluzný lak GLEIT – μ GL 220**

Jedná se o šedočerný kluzný lak, který je postaven na bázi anorganického pojiva a kombinaci tuhých maziv s vysokým podílem MoS₂. Jako ředidlo je zde použit speciální benzín. Po nanesení laku a odpaření ředidla se na povrchu vytvoří suchý, dobře držící a extrémně tlakově odolný kluzný film.



Obr. 29: Použitá maziva

2.2.3 Metodika měření

Vlastní měření probíhalo po sestavení měřících zařízení a zapojení příslušných snímačů. Každý vzorek byl postupně utahován momentovým klíčem vždy o hodnotu 2 Nm od hodnoty 4 Nm až do maximální hodnoty utahovacího momentu udávané v tabulce 7. V případě zařízení, které bylo sestrojeno pro měření velikosti tření v závitě,

se při utahování na příslušný moment odečítá hodnota osově síly ve šroubovém spoji a velikost koeficientu tření je následně vypočítána. Při měření velikosti tření pod maticí je odečítána velikost síly na rameni, která je vyvolána při utahování matice na požadovaný moment. Následně se díky známé délce ramene vypočítá třecí moment pod maticí. Na všech testovaných šroubech a maticích byla provedena vždy jen jedna série měření, aby se na výsledných hodnotách neprojevovalo opotřebení závitů.

Tab. 7: Utahovací momenty šroubů

| Pevnost | | 8.8 | |
|---------|------|---------------------|--------------------|
| D | P | M _k [Nm] | F _o [N] |
| M6 | 1 | 9,7 | 8302 |
| M8 | 1,25 | 24,5 | 15242 |
| M10 | 1,5 | 48,4 | 24275 |

2.3 Výpočty

Moment na klíči:

$$M_K = M_{TM} + M_Z$$

Třecí moment pod maticí:

$$M_{TM} = Q \cdot f_M \cdot \rho_M$$

Třecí moment v závitě:

$$M_Z = Q \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \tan(\gamma \cdot \varphi')$$

Zařízení určené na měření velikosti tření v závitě je sestrojeno tak, že je minimalizováno tření pod maticí a platí:

$$M_K = M_Z = Q \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \tan(\gamma \cdot \varphi')$$

Třecí úhel se následně vypočítá jako:

$$\varphi' = \tan^{-1} \left(\frac{M_K \cdot 2}{Q \cdot d_2} \right) - \gamma$$

Úhel stoupání:

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{P}{\pi \cdot d_2} \right)$$

Koeficient tření v ostrém závitu:

$$f' = \tan \varphi'$$

Koeficient tření v závitu:

$$f = f' \cdot \cos \frac{\alpha}{2}$$

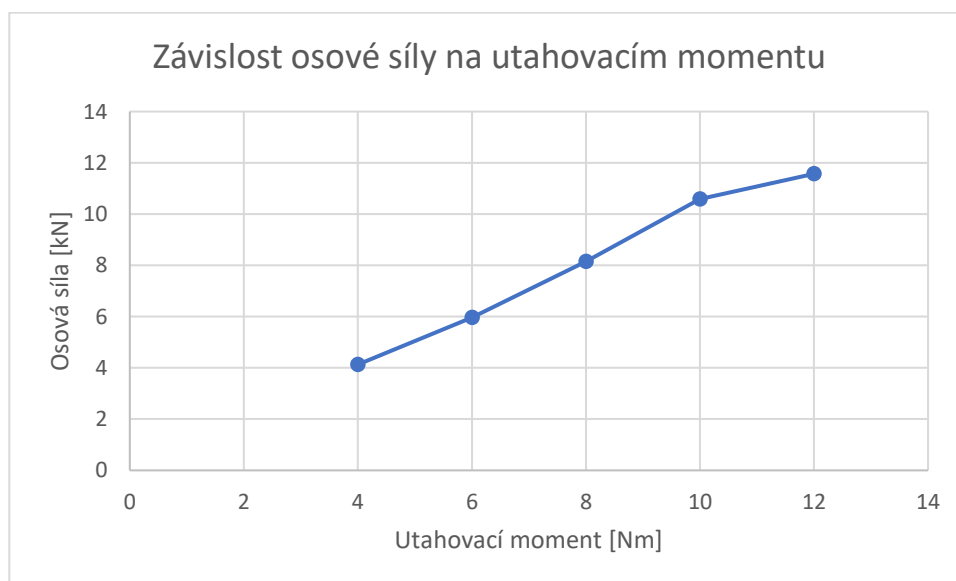
(Úhel profilu metrického závitu $\alpha = 60^\circ$)

2.4 Výsledky měření koeficientu tření v závitu

2.4.1 Šroub M6

Tab. 8: Naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M6 bez maziva

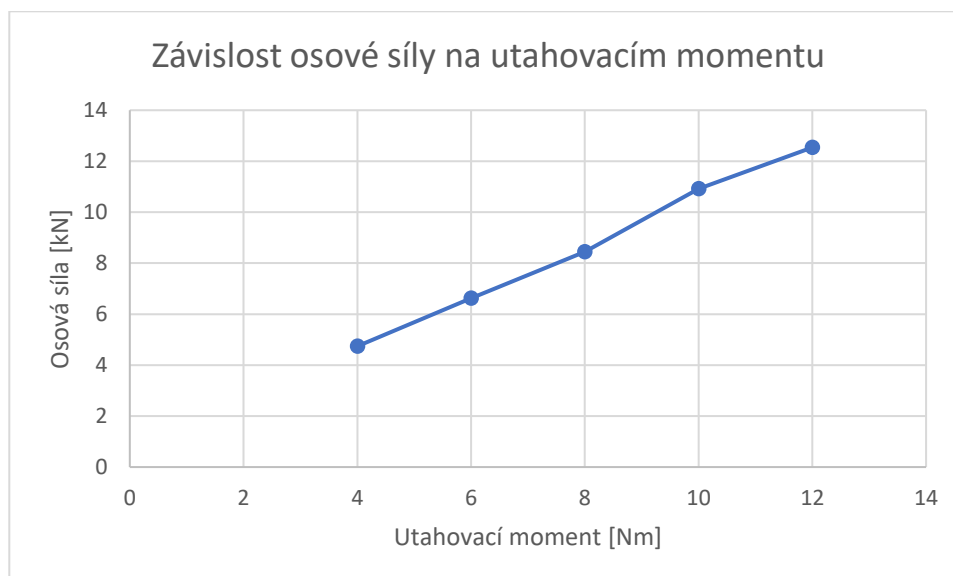
| Šroub M6 x 50 - 8.8 | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|---------------------------|---|--------------------------|
| Matice M6 - 08 | | | | |
| Bez maziva | | | | |
| Utahovací moment M_K [Nm] | Osová síla F_0 [kN] | Třecí úhel φ' [°] | Koeficient tření v ostrém závitu f' [-] | Koeficient tření f [-] |
| 4 | 4,13 | 16,499 | 0,296 | 0,257 |
| 6 | 5,97 | 17,187 | 0,309 | 0,268 |
| 8 | 8,15 | 16,746 | 0,301 | 0,261 |
| 10 | 10,59 | 16,038 | 0,287 | 0,249 |
| 12 | 11,57 | 17,788 | 0,321 | 0,278 |
| Průměrná hodnota | | 16,851 | 0,303 | 0,262 |
| Směrodatná odchylka | | 0,598 | 0,011 | 0,010 |



Graf 1: Závislost osová síly na utahovacím momentu, šroub M6 bez maziva

Tab. 9: Naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M6 mazáno – parafínový olej

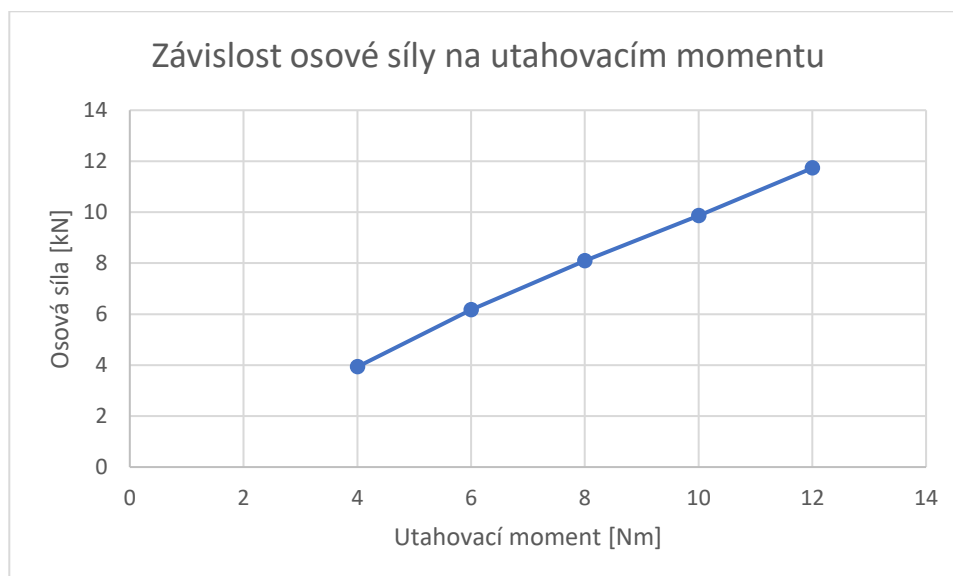
| Šroub M6 x 50 - 8.8 | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|---------------------------|---|--------------------------|
| Matice M6 - 08 | | | | |
| Parafínový olej | | | | |
| Utahovací moment M_K [Nm] | Osová síla F_0 [kN] | Třecí úhel φ' [°] | Koeficient tření v ostrém závitu f' [-] | Koeficient tření f [-] |
| 4 | 4,74 | 14,104 | 0,251 | 0,218 |
| 6 | 6,62 | 15,313 | 0,274 | 0,237 |
| 8 | 8,45 | 16,085 | 0,288 | 0,250 |
| 10 | 10,92 | 15,493 | 0,277 | 0,240 |
| 12 | 12,54 | 16,279 | 0,292 | 0,253 |
| Průměrná hodnota | | 15,455 | 0,277 | 0,239 |
| Směrodatná odchylka | | 0,765 | 0,014 | 0,012 |



Graf 2: Závislost osová síly na utahovacím momentu, šroub M6 mazáno – parafínový olej

Tab. 10: Naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M6 mazáno – olej 10W – 40

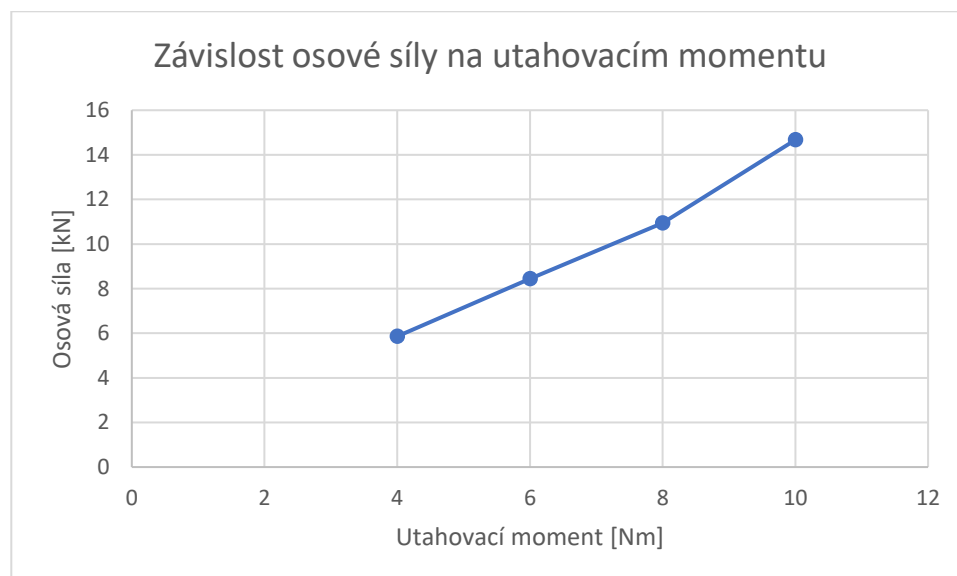
| Šroub M6 x 50 - 8.8 | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|---------------------------|---|--------------------------|
| Matice M6 - 08 | | | | |
| Olej 10W - 40 | | | | |
| Utahovací moment M_K [Nm] | Osová síla F_0 [kN] | Třecí úhel φ' [°] | Koeficient tření v ostrém závitě f' [-] | Koeficient tření f [-] |
| 4 | 3,93 | 17,426 | 0,314 | 0,272 |
| 6 | 6,17 | 16,573 | 0,298 | 0,258 |
| 8 | 8,09 | 16,883 | 0,304 | 0,263 |
| 10 | 9,86 | 17,359 | 0,313 | 0,271 |
| 12 | 11,73 | 17,524 | 0,316 | 0,273 |
| Průměrná hodnota | | 17,153 | 0,309 | 0,267 |
| Směrodatná odchylka | | 0,364 | 0,007 | 0,006 |



Graf 3: Závislost osově síly na utahovacím momentu, šroub M6 mazáno – olej 10W – 40

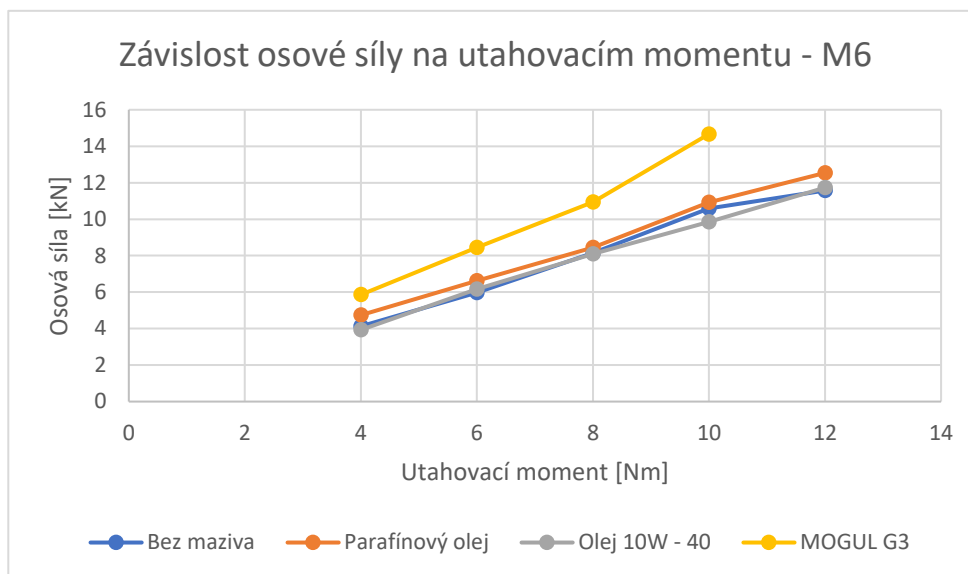
Tab. 11: Naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M6 mazáno – MOGUL G3

| Šroub M6 x 50 - 8.8 | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|---------------------------|---|--------------------------|
| Matice M6 - 08 | | | | |
| MOGUL G3 | | | | |
| Utahovací moment M_K [Nm] | Osová síla F_0 [kN] | Třecí úhel φ' [°] | Koeficient tření v ostrém závitě f' [-] | Koeficient tření f [-] |
| 4 | 5,86 | 10,910 | 0,193 | 0,167 |
| 6 | 8,44 | 11,478 | 0,203 | 0,176 |
| 8 | 10,94 | 11,884 | 0,210 | 0,182 |
| 10 | 14,67 | 10,891 | 0,192 | 0,167 |
| 12 | Strženo | - | - | - |
| Průměrná hodnota | | 11,291 | 0,200 | 0,173 |
| Směrodatná odchylka | | 0,416 | 0,008 | 0,007 |

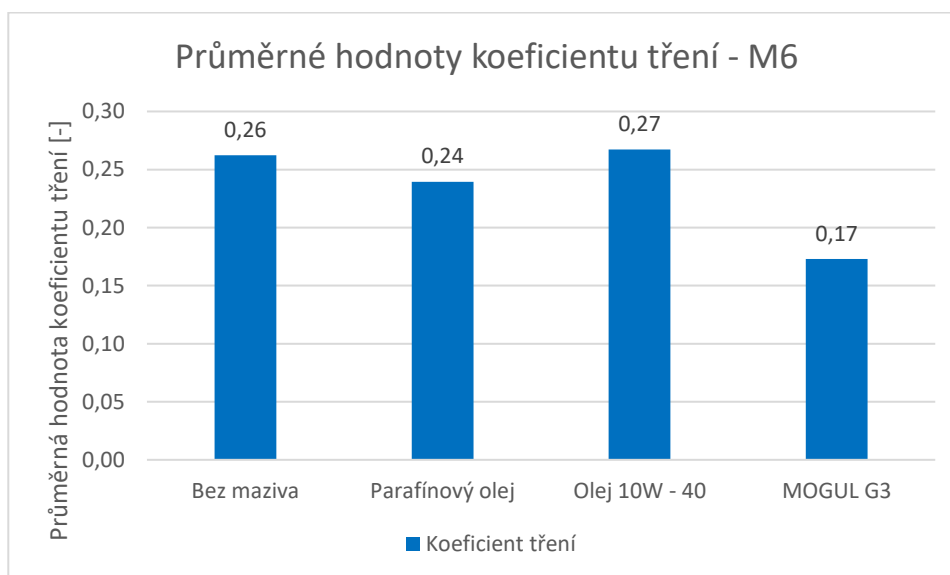


Graf 4: Závislost osově síly na utahovacím momentu, šroub M6 mazáno – MOGUL G3

2.4.1.1 Porovnání naměřených hodnot – šroub M6



Graf 5: Porovnání závislostí osově síly na utahovacím momentu, šroub M6

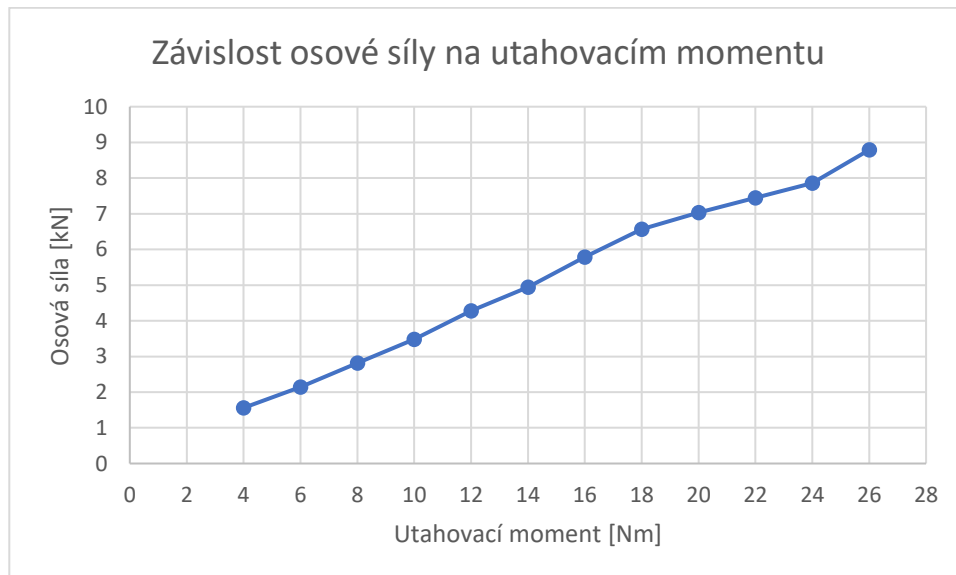


Graf 6: Průměrné hodnoty koeficientu tření, šroub M6

2.4.2 Šroub M8

Tab. 12: Naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M8 bez maziva

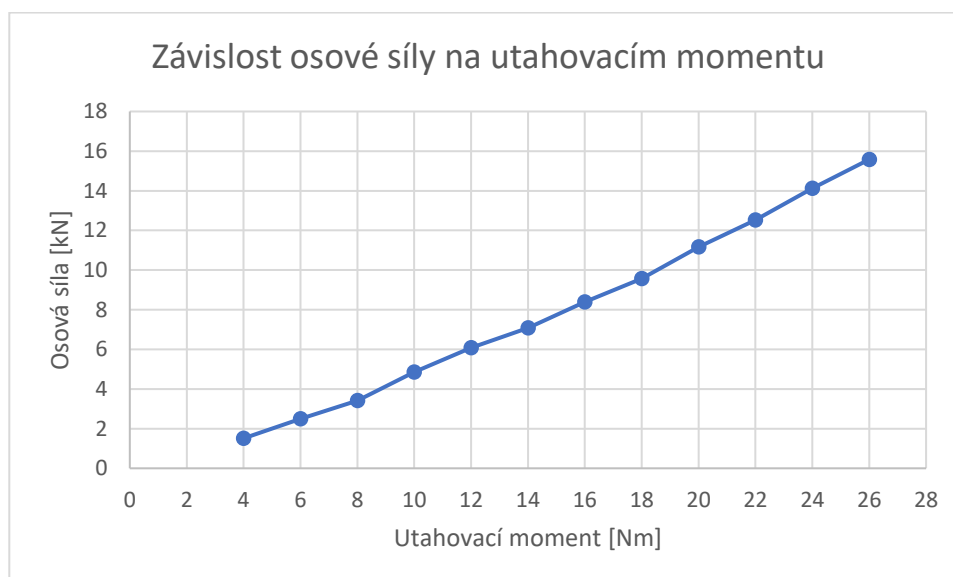
| Šroub M8 x 50 - 8.8 | | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|---------------------------|---|--------------------------|------------------|
| Matice M8 - 08 | | | | | |
| Bez maziva | | | | | |
| Utahovací moment M_k [Nm] | Osová síla F_0 [kN] | Třecí úhel φ' [°] | Koeficient tření v ostrém závitu f' [-] | Koeficient tření f [-] | Prodloužení [mm] |
| 4 | 1,56 | 32,337 | 0,633 | 0,548 | - |
| 6 | 2,14 | 34,790 | 0,695 | 0,602 | 0,020 |
| 8 | 2,82 | 35,117 | 0,703 | 0,609 | 0,020 |
| 10 | 3,48 | 35,476 | 0,713 | 0,617 | 0,022 |
| 12 | 4,28 | 34,790 | 0,695 | 0,602 | 0,025 |
| 14 | 4,94 | 35,089 | 0,703 | 0,608 | 0,027 |
| 16 | 5,79 | 34,388 | 0,684 | 0,593 | 0,030 |
| 18 | 6,57 | 34,150 | 0,678 | 0,587 | 0,032 |
| 20 | 7,03 | 35,196 | 0,705 | 0,611 | 0,035 |
| 22 | 7,45 | 36,240 | 0,733 | 0,635 | 0,042 |
| 24 | 7,86 | 37,183 | 0,759 | 0,657 | 0,045 |
| 26 | 8,79 | 36,286 | 0,734 | 0,636 | 0,050 |
| Průměrná hodnota | | 35,087 | 0,703 | 0,609 | |
| Směrodatná odchylka | | 1,170 | 0,030 | 0,026 | |



Graf 7: Závislost osová síla na utahovacím momentu, šroub M8 bez maziva

Tab. 13: Naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M8 mazáno – parafínový olej

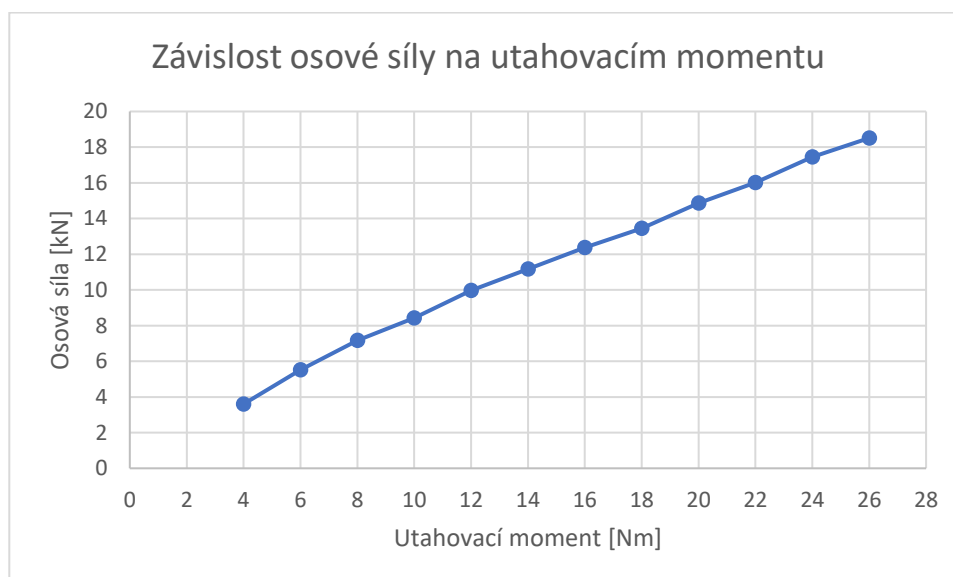
| Šroub M8 x 50 - 8.8 | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|---------------------------|---|--------------------------|
| Matice M8 - 08 | | | | |
| Parafínový olej | | | | |
| Utahovací moment M_K [Nm] | Osová síla F_0 [kN] | Třecí úhel φ' [°] | Koeficient tření v ostrém závitu f' [-] | Koeficient tření f [-] |
| 4 | 1,51 | 33,224 | 0,655 | 0,567 |
| 6 | 2,5 | 30,566 | 0,591 | 0,511 |
| 8 | 3,42 | 29,890 | 0,575 | 0,498 |
| 10 | 4,85 | 26,674 | 0,502 | 0,435 |
| 12 | 6,08 | 25,606 | 0,479 | 0,415 |
| 14 | 7,08 | 25,651 | 0,480 | 0,416 |
| 16 | 8,39 | 24,783 | 0,462 | 0,400 |
| 18 | 9,57 | 24,456 | 0,455 | 0,394 |
| 20 | 11,16 | 23,334 | 0,431 | 0,374 |
| 22 | 12,52 | 22,887 | 0,422 | 0,366 |
| 24 | 14,12 | 22,143 | 0,407 | 0,352 |
| 26 | 15,58 | 21,739 | 0,399 | 0,345 |
| Průměrná hodnota | | 25,913 | 0,488 | 0,423 |
| Směrodatná odchylka | | 3,446 | 0,076 | 0,066 |



Graf 8: Závislost osová síly na utahovacím momentu, šroub M8 mazáno – parafínový olej

Tab. 14: Naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M8 mazáno – olej 10W – 40

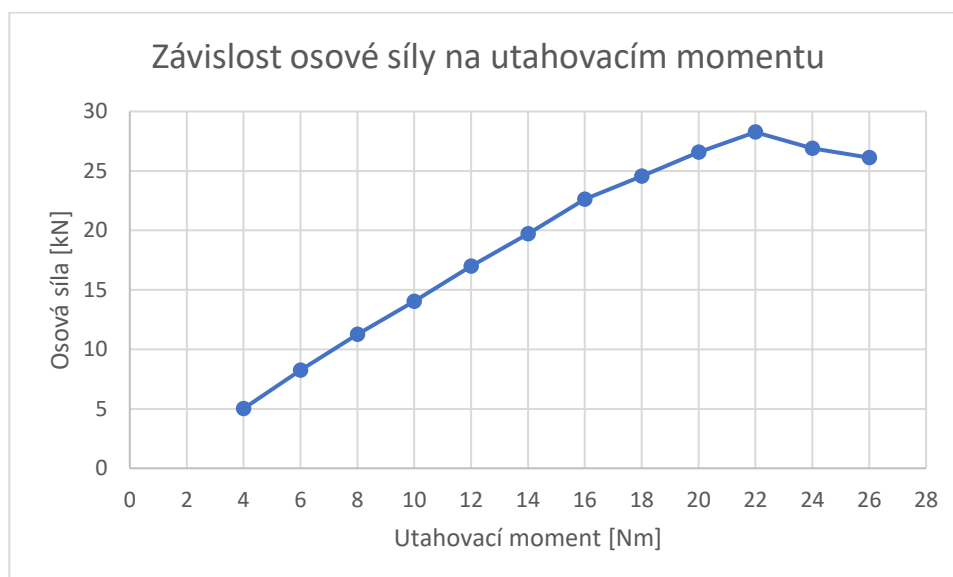
| Šroub M8 x 50 - 8.8 | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|---------------------------|---|--------------------------|
| Matice M8 - 08 | | | | |
| Olej 10W - 40 | | | | |
| Utahovací moment M_K [Nm] | Osová síla F_0 [kN] | Třecí úhel φ' [°] | Koeficient tření v ostrém závitu f' [-] | Koeficient tření f [-] |
| 4 | 3,6 | 14,011 | 0,250 | 0,216 |
| 6 | 5,51 | 13,688 | 0,244 | 0,211 |
| 8 | 7,17 | 14,079 | 0,251 | 0,217 |
| 10 | 8,43 | 15,098 | 0,270 | 0,234 |
| 12 | 9,96 | 15,364 | 0,275 | 0,238 |
| 14 | 11,17 | 16,057 | 0,288 | 0,249 |
| 16 | 12,37 | 16,625 | 0,299 | 0,259 |
| 18 | 13,45 | 17,255 | 0,311 | 0,269 |
| 20 | 14,87 | 17,349 | 0,312 | 0,271 |
| 22 | 16,02 | 17,744 | 0,320 | 0,277 |
| 24 | 17,45 | 17,773 | 0,321 | 0,278 |
| 26 | 18,51 | 18,179 | 0,328 | 0,284 |
| Průměrná hodnota | | 16,102 | 0,289 | 0,250 |
| Směrodatná odchylka | | 1,549 | 0,029 | 0,025 |



Graf 9: Závislost osová síly na utahovacím momentu, šroub M8 mazáno – olej 10W – 40

Tab. 15: Naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M8 mazáno – MOGUL G3

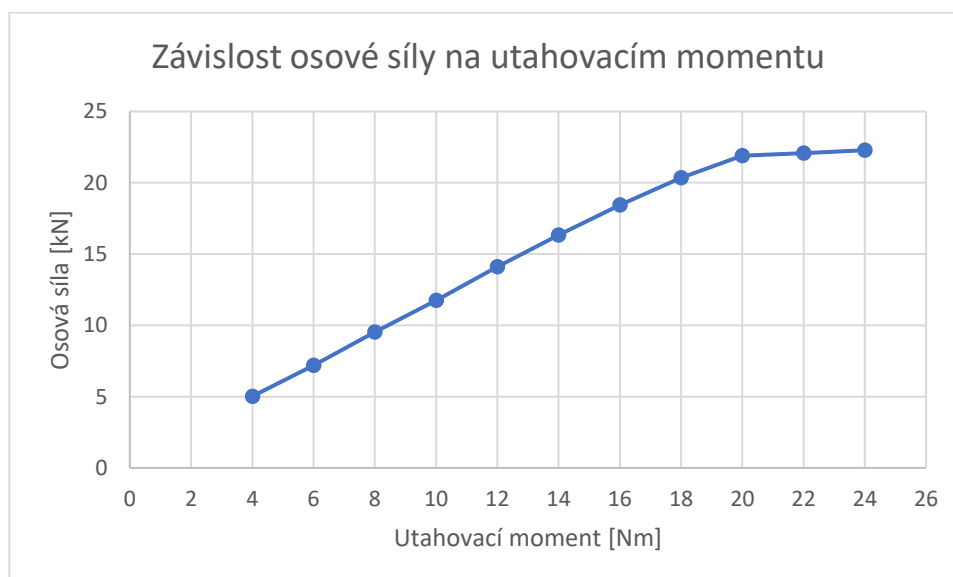
| Šroub M8 x 50 - 8.8 | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|---------------------------|---|--------------------------|
| Matice M8 - 08 | | | | |
| MOGUL G3 | | | | |
| Utahovací moment M_K [Nm] | Osová síla F_0 [kN] | Třecí úhel φ' [°] | Koeficient tření v ostrém závitu f' [-] | Koeficient tření f [-] |
| 4 | 5,02 | 9,332 | 0,164 | 0,142 |
| 6 | 8,25 | 8,271 | 0,145 | 0,126 |
| 8 | 11,25 | 8,024 | 0,141 | 0,122 |
| 10 | 14,03 | 8,049 | 0,141 | 0,122 |
| 12 | 16,99 | 7,950 | 0,140 | 0,121 |
| 14 | 19,71 | 8,011 | 0,141 | 0,122 |
| 16 | 22,63 | 7,961 | 0,140 | 0,121 |
| 18 | 24,56 | 8,358 | 0,147 | 0,127 |
| 20 | 26,57 | 8,661 | 0,152 | 0,132 |
| 22 | 28,26 | 9,054 | 0,159 | 0,138 |
| 24 | 26,89 | 10,778 | 0,190 | 0,165 |
| 26 | 26,12 | 12,312 | 0,218 | 0,189 |
| Průměrná hodnota | | 8,897 | 0,157 | 0,136 |
| Směrodatná odchylka | | 1,297 | 0,023 | 0,020 |



Graf 10: Závislost osová síly na utahovacím momentu, šroub M8 mazáno – MOGUL G3

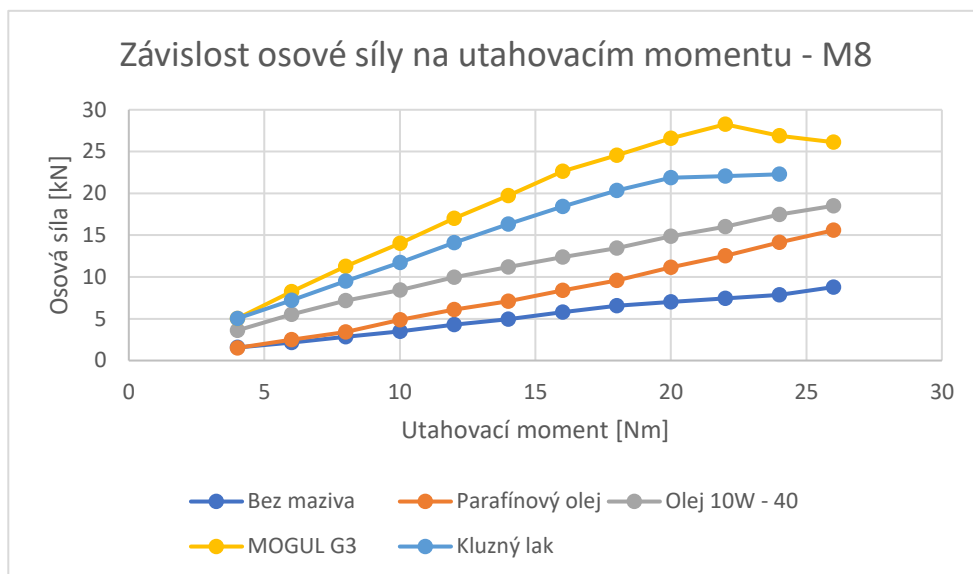
Tab. 16: Naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M8 kluzný lak

| Šroub M8 x 50 - 8.8 | | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|---------------------------|---|--------------------------|------------------|
| Matice M8 - 08 | | | | | |
| Kluzný lak | | | | | |
| Utahovací moment M_K [Nm] | Osová síla F_0 [kN] | Třecí úhel φ' [°] | Koeficient tření v ostrém závitu f' [-] | Koeficient tření f [-] | Prodloužení [mm] |
| 4 | 5,02 | 9,332 | 0,164 | 0,142 | - |
| 6 | 7,19 | 9,904 | 0,175 | 0,151 | 0,035 |
| 8 | 9,52 | 9,992 | 0,176 | 0,153 | 0,045 |
| 10 | 11,74 | 10,165 | 0,179 | 0,155 | 0,057 |
| 12 | 14,11 | 10,145 | 0,179 | 0,155 | 0,068 |
| 14 | 16,32 | 10,256 | 0,181 | 0,157 | 0,087 |
| 16 | 18,43 | 10,412 | 0,184 | 0,159 | 0,108 |
| 18 | 20,35 | 10,658 | 0,188 | 0,163 | 0,130 |
| 20 | 21,89 | 11,095 | 0,196 | 0,170 | 0,147 |
| 22 | 22,08 | 12,327 | 0,219 | 0,189 | 0,375 |
| 24 | 22,28 | 13,516 | 0,240 | 0,208 | 0,540 |
| 26 | strženo | - | - | - | - |
| Průměrná hodnota | | 10,2176 | 0,1803 | 0,1561 | |
| Směrodatná odchylka | | 0,4648 | 0,0084 | 0,0073 | |

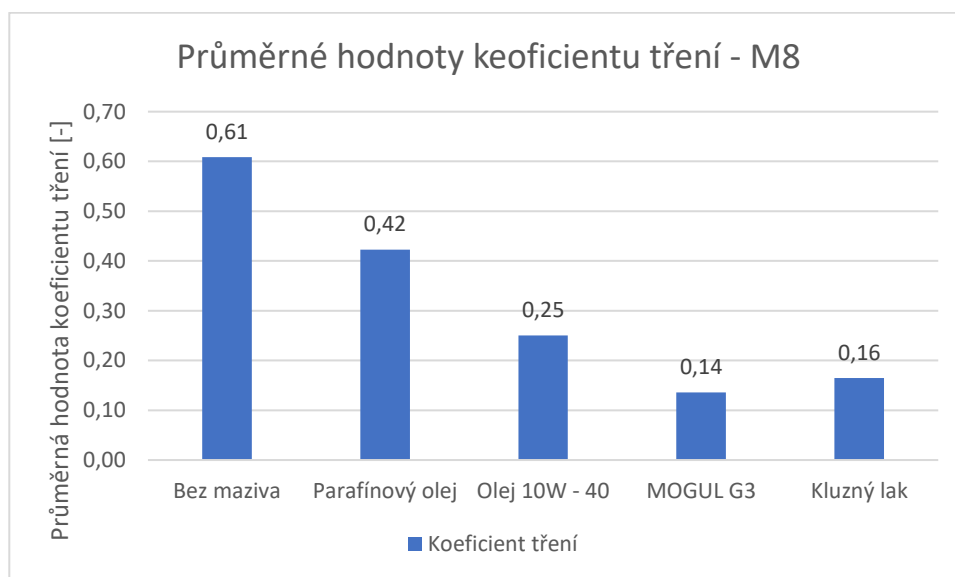


Graf 11: Závislost osová síly na utahovacím momentu, šroub M8 kluzný lak

2.4.2.1 Porovnání naměřených hodnot – šroub M8



Graf 12: Porovnání závislostí osová síla na utahovacím momentu, šroub M8

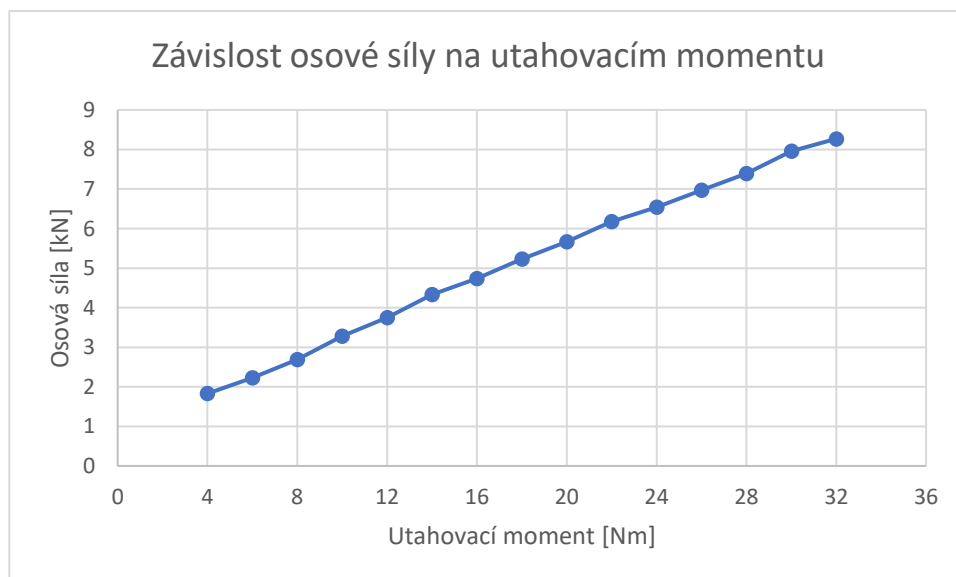


Graf 13: Průměrné hodnoty koeficientu tření, šroub M8

2.4.3 Šroub M10

Tab. 17: Naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M10 bez maziva

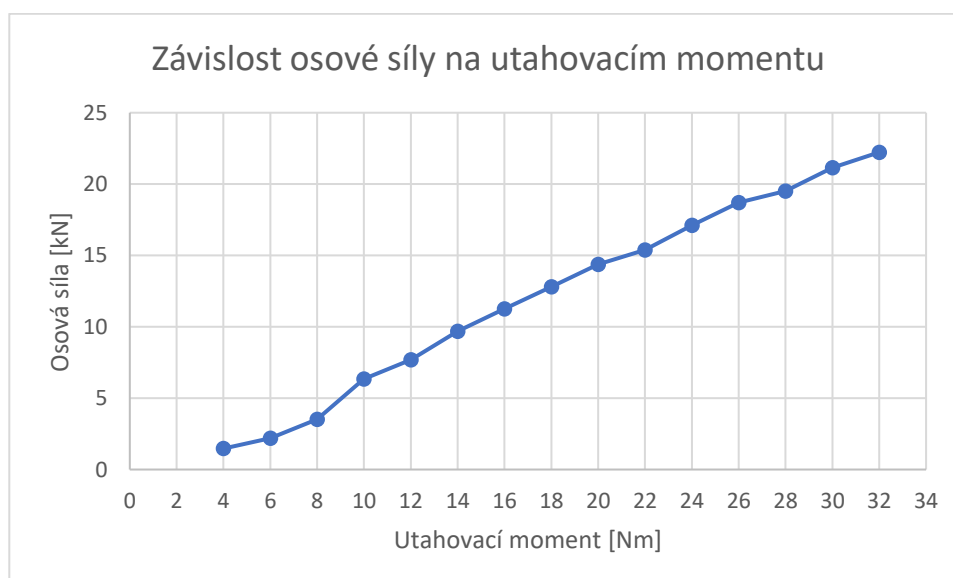
| Šroub M10 x 50 - 8.8 | | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|---------------------------|---|--------------------------|------------------|
| Matice M10 - 08 | | | | | |
| Bez maziva | | | | | |
| Utahovací moment M_k [Nm] | Osová síla F_0 [kN] | Třecí úhel φ' [°] | Koeficient tření v ostrém závitě f' [-] | Koeficient tření f [-] | Prodloužení [mm] |
| 4 | 1,83 | 22,814 | 0,421 | 0,364 | - |
| 6 | 2,23 | 27,775 | 0,527 | 0,456 | 0,015 |
| 8 | 2,69 | 30,356 | 0,586 | 0,507 | 0,017 |
| 10 | 3,28 | 31,013 | 0,601 | 0,521 | 0,021 |
| 12 | 3,75 | 32,311 | 0,632 | 0,548 | 0,023 |
| 14 | 4,33 | 32,591 | 0,639 | 0,554 | 0,025 |
| 16 | 4,74 | 33,767 | 0,669 | 0,579 | 0,026 |
| 18 | 5,23 | 34,302 | 0,682 | 0,591 | 0,030 |
| 20 | 5,67 | 34,983 | 0,700 | 0,606 | 0,031 |
| 22 | 6,18 | 35,238 | 0,706 | 0,612 | 0,034 |
| 24 | 6,54 | 36,088 | 0,729 | 0,631 | 0,035 |
| 26 | 6,97 | 36,548 | 0,741 | 0,642 | 0,037 |
| 28 | 7,39 | 36,987 | 0,753 | 0,652 | 0,040 |
| 30 | 7,96 | 36,837 | 0,749 | 0,649 | 0,041 |
| 32 | 8,27 | 37,581 | 0,770 | 0,666 | 0,041 |
| Průměrná hodnota | | 33,279 | 0,660 | 0,572 | |
| Směrodatná odchylka | | 3,885 | 0,093 | 0,080 | |



Graf 14: Závislost osová síly na utahovacím momentu, šroub M10 bez maziva

Tab. 18: Naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M10 mazáno – parafínový olej

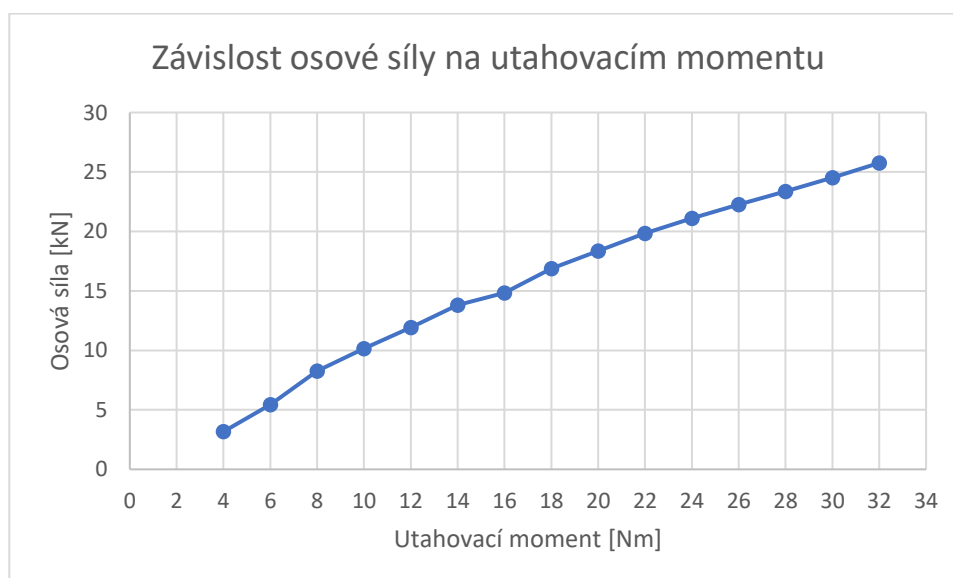
| Šroub M10 x 50 - 8.8 | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|---------------------------|---|--------------------------|
| Matice M10 - 08 | | | | |
| Parafínový olej | | | | |
| Utahovací moment M_K [Nm] | Osová síla F_0 [kN] | Třecí úhel φ' [°] | Koeficient tření v ostrém závitu f' [-] | Koeficient tření f [-] |
| 4 | 1,47 | 28,060 | 0,533 | 0,462 |
| 6 | 2,2 | 28,117 | 0,534 | 0,463 |
| 8 | 3,53 | 23,636 | 0,438 | 0,379 |
| 10 | 6,34 | 16,236 | 0,291 | 0,252 |
| 12 | 7,69 | 16,046 | 0,288 | 0,249 |
| 14 | 9,68 | 14,741 | 0,263 | 0,228 |
| 16 | 11,26 | 14,449 | 0,258 | 0,223 |
| 18 | 12,81 | 14,266 | 0,254 | 0,220 |
| 20 | 14,37 | 14,111 | 0,251 | 0,218 |
| 22 | 15,38 | 14,558 | 0,260 | 0,225 |
| 24 | 17,12 | 14,228 | 0,254 | 0,220 |
| 26 | 18,71 | 14,086 | 0,251 | 0,217 |
| 28 | 19,52 | 14,604 | 0,261 | 0,226 |
| 30 | 21,15 | 14,420 | 0,257 | 0,223 |
| 32 | 22,23 | 14,663 | 0,262 | 0,227 |
| Průměrná hodnota | | 17,082 | 0,310 | 0,269 |
| Směrodatná odchylka | | 4,891 | 0,098 | 0,085 |



Graf 15: Závislost osově síly na utahovacím momentu, šroub M10 mazáno – parafínový olej

Tab. 19: Naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M10 mazáno – olej 10W – 40

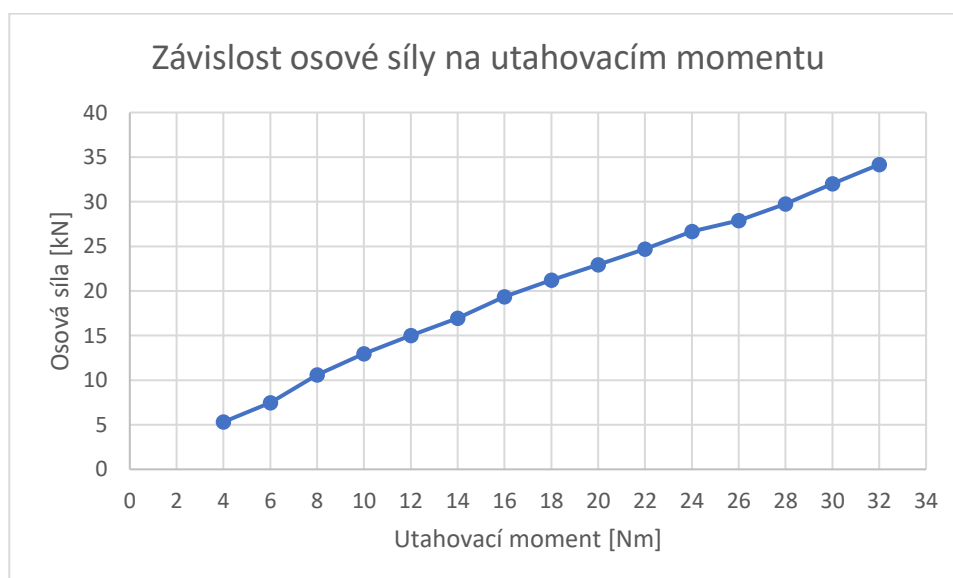
| Šroub M10 x 50 - 8.8 | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|---------------------------|---|--------------------------|
| Matice M10 - 08 | | | | |
| Olej 10W - 40 | | | | |
| Utahovací moment M_K [Nm] | Osová síla F_0 [kN] | Třecí úhel φ' [°] | Koeficient tření v ostrém závitu f' [-] | Koeficient tření f [-] |
| 4 | 3,17 | 12,593 | 0,223 | 0,193 |
| 6 | 5,43 | 10,730 | 0,189 | 0,164 |
| 8 | 8,27 | 9,070 | 0,160 | 0,138 |
| 10 | 10,16 | 9,275 | 0,163 | 0,141 |
| 12 | 11,92 | 9,547 | 0,168 | 0,146 |
| 14 | 13,82 | 9,623 | 0,170 | 0,147 |
| 16 | 14,83 | 10,417 | 0,184 | 0,159 |
| 18 | 16,89 | 10,259 | 0,181 | 0,157 |
| 20 | 18,36 | 10,542 | 0,186 | 0,161 |
| 22 | 19,85 | 10,770 | 0,190 | 0,165 |
| 24 | 21,12 | 11,105 | 0,196 | 0,170 |
| 26 | 22,26 | 11,482 | 0,203 | 0,176 |
| 28 | 23,36 | 11,846 | 0,210 | 0,182 |
| 30 | 24,53 | 12,135 | 0,215 | 0,186 |
| 32 | 25,76 | 12,362 | 0,219 | 0,190 |
| Průměrná hodnota | | 10,784 | 0,191 | 0,165 |
| Směrodatná odchylka | | 1,091 | 0,020 | 0,017 |



Graf 16: Závislost osově síly na utahovacím momentu, šroub M10 mazáno – olej 10W – 40

Tab. 20: Naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M10 mazáno – MOGUL G3

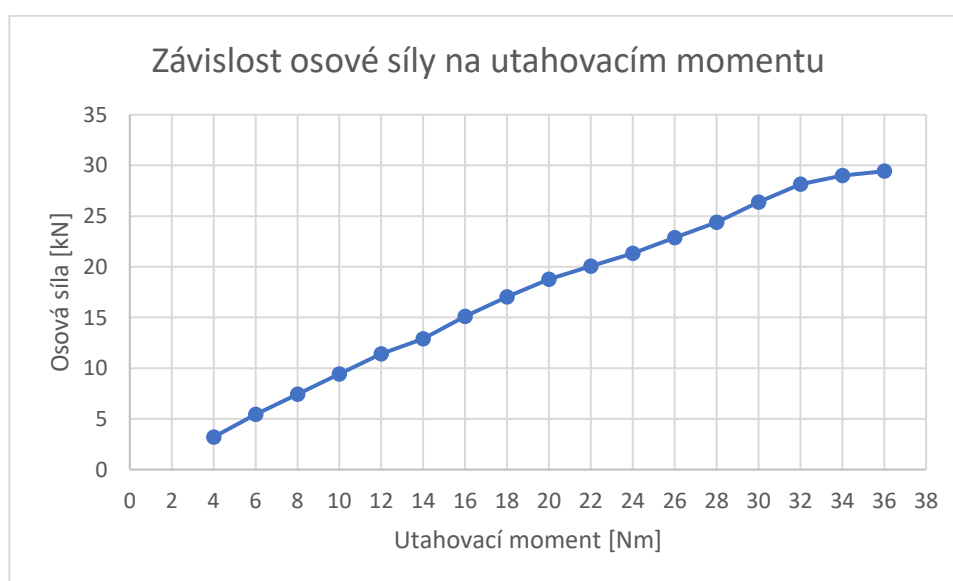
| Šroub M10 x 50 - 8.8 | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|---------------------------|---|--------------------------|
| Matice M10 - 08 | | | | |
| MOGUL G3 | | | | |
| Utahovací moment M_K [Nm] | Osová síla F_0 [kN] | Třecí úhel φ' [°] | Koeficient tření v ostrém závitu f' [-] | Koeficient tření f [-] |
| 4 | 5,31 | 6,448 | 0,113 | 0,098 |
| 6 | 7,47 | 7,064 | 0,124 | 0,107 |
| 8 | 10,58 | 6,483 | 0,114 | 0,098 |
| 10 | 12,97 | 6,667 | 0,117 | 0,101 |
| 12 | 15,02 | 7,011 | 0,123 | 0,107 |
| 14 | 16,94 | 7,349 | 0,129 | 0,112 |
| 16 | 19,35 | 7,355 | 0,129 | 0,112 |
| 18 | 21,2 | 7,627 | 0,134 | 0,116 |
| 20 | 22,94 | 7,906 | 0,139 | 0,120 |
| 22 | 24,71 | 8,132 | 0,143 | 0,124 |
| 24 | 26,67 | 8,249 | 0,145 | 0,126 |
| 26 | 27,9 | 8,639 | 0,152 | 0,132 |
| 28 | 29,76 | 8,748 | 0,154 | 0,133 |
| 30 | 32,02 | 8,700 | 0,153 | 0,133 |
| 32 | 34,18 | 8,692 | 0,153 | 0,132 |
| Průměrná hodnota | | 7,671 | 0,135 | 0,117 |
| Směrodatná odchylka | | 0,805 | 0,014 | 0,012 |



Graf 17: Závislost osové síly na utahovacím momentu, šroub M10 mazáno – MOGUL G3

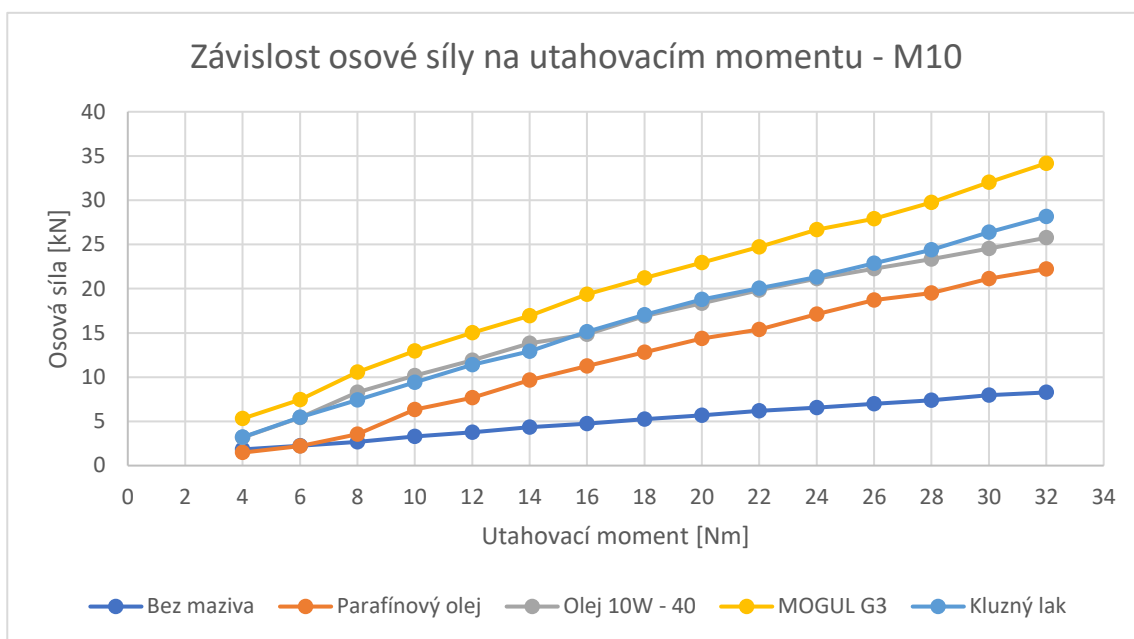
Tab. 21: Naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M10 kluzný lak

| Šroub M10 x 50 - 8.8 | | | | | |
|-----------------------------|-----------------------|---------------------------|---|--------------------------|------------------|
| Matice M10 - 08 | | | | | |
| Kluzný lak | | | | | |
| Utahovací moment M_k [Nm] | Osová síla F_0 [kN] | Třecí úhel φ' [°] | Koeficient tření v ostrém závitu f' [-] | Koeficient tření f [-] | Prodloužení [mm] |
| 4 | 3,21 | 12,408 | 0,220 | 0,191 | - |
| 6 | 5,46 | 10,657 | 0,188 | 0,163 | 0,025 |
| 8 | 7,43 | 10,391 | 0,183 | 0,159 | 0,031 |
| 10 | 9,42 | 10,209 | 0,180 | 0,156 | 0,036 |
| 12 | 11,4 | 10,101 | 0,178 | 0,154 | 0,046 |
| 14 | 12,91 | 10,483 | 0,185 | 0,160 | 0,052 |
| 16 | 15,12 | 10,168 | 0,179 | 0,155 | 0,062 |
| 18 | 17,04 | 10,146 | 0,179 | 0,155 | 0,075 |
| 20 | 18,78 | 10,250 | 0,181 | 0,157 | 0,088 |
| 22 | 20,06 | 10,631 | 0,188 | 0,163 | 0,100 |
| 24 | 21,32 | 10,978 | 0,194 | 0,168 | 0,114 |
| 26 | 22,89 | 11,099 | 0,196 | 0,170 | 0,128 |
| 28 | 24,38 | 11,250 | 0,199 | 0,172 | 0,142 |
| 30 | 26,38 | 11,115 | 0,196 | 0,170 | 0,162 |
| 32 | 28,15 | 11,110 | 0,196 | 0,170 | 0,185 |
| 34 | 28,99 | 11,539 | 0,204 | 0,177 | 0,215 |
| 36 | 29,43 | 12,137 | 0,215 | 0,186 | 0,274 |
| 38 | strženo | - | - | - | - |
| Průměrná hodnota | | 10,733 | 0,190 | 0,164 | |
| Směrodatná odchylka | | 0,596 | 0,011 | 0,009 | |

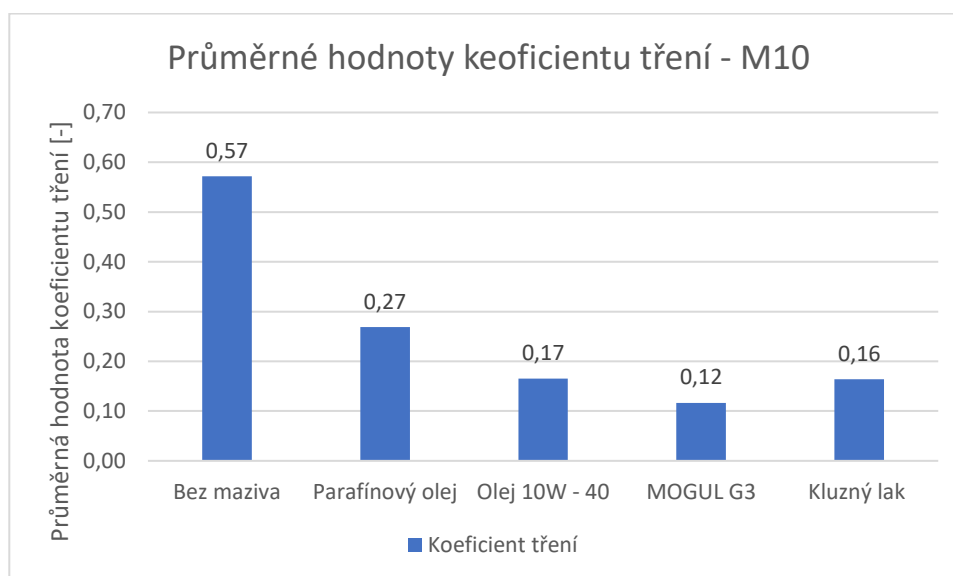


Graf 18: Závislost osově síly na utahovacím momentu, šroub M10 kluzný lak

2.4.3.1 Porovnání naměřených hodnot – šroub M10



Graf 19: Porovnání závislostí osová síly na utahovacím momentu, šroub M10



Graf 20: Průměrné hodnoty koeficientu tření, šroub M10

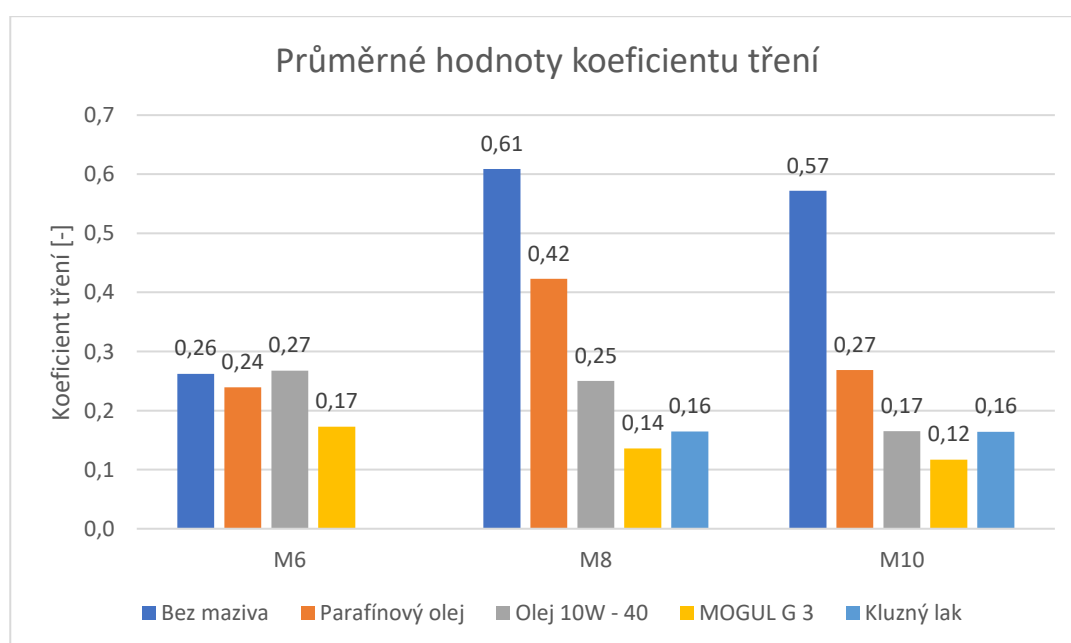
2.4.4 Vyhodnocení naměřených dat

Naměřená a vypočtená data lze vzájemně porovnat, protože ve všech případech byly použity stejné podmínky lišící se pouze přítomností maziva a velikostí šroubu.

Tab. 22: Srovnání průměrných hodnot koeficientu tření v závitu

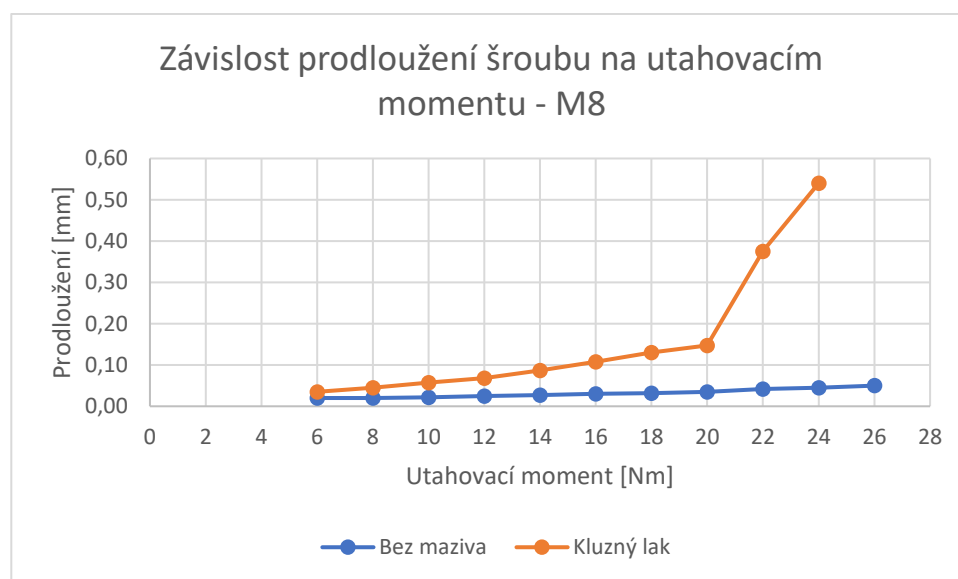
| Průměrné hodnoty koeficientu tření | | | | | |
|------------------------------------|------------|-----------------|---------------|-----------|------------|
| Šroub | Bez maziva | Parafínový olej | Olej 10W - 40 | MOGUL G 3 | Kluzný lak |
| M6 | 0,262 | 0,239 | 0,267 | 0,173 | - |
| M8 | 0,609 | 0,423 | 0,250 | 0,136 | 0,165 |
| M10 | 0,572 | 0,269 | 0,165 | 0,117 | 0,164 |

Ve výše uvedené tabulce jsou shrnuty průměrné hodnoty koeficientu tření v závitu všech testovaných šroubů. Jak ukazují výsledky provedených měření, použití maziva má zásadní vliv na snížení hodnoty koeficientu tření, obzvláště je to patrné v případě šroubů M8 a M10. V případě šroubu M6 mělo použití tekutého maziva (parafínový olej a motorový olej 10W – 40) minimální vliv na velikost koeficientu tření. Důvodem je špatná odolnost proti tlakům, které vznikají při utahování šroubového spoje. Nejlepších třecích vlastností bylo ve všech případech dosaženo použitím plastického maziva MOGUL G3, které obsahuje částice grafitu. Tuhá složka maziva v podobě částic grafitu odolává vysokým tlakům a zajišťuje dobré kluzné vlastnosti při utahování šroubového spoje. V případě použití kluzného laku GLEIT – μ GL220 bylo dosaženo mírně vyšších hodnot koeficientu tření než v případě plastického maziva MOGUL G3. Jeho výhodou je však suchý mazací film, který umožňuje bezproblémové skladování spojovacího materiálu a časovou stabilitu tohoto maziva ve spoji, a tím vhodné parametry pro povolení spoje.

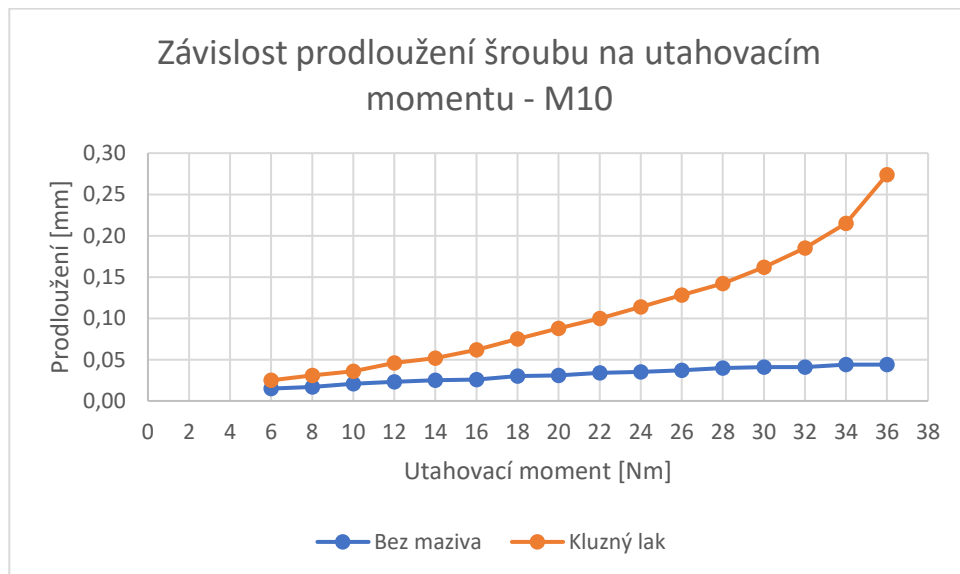


Graf 21: Srovnání průměrných hodnot koeficientu tření v závitu

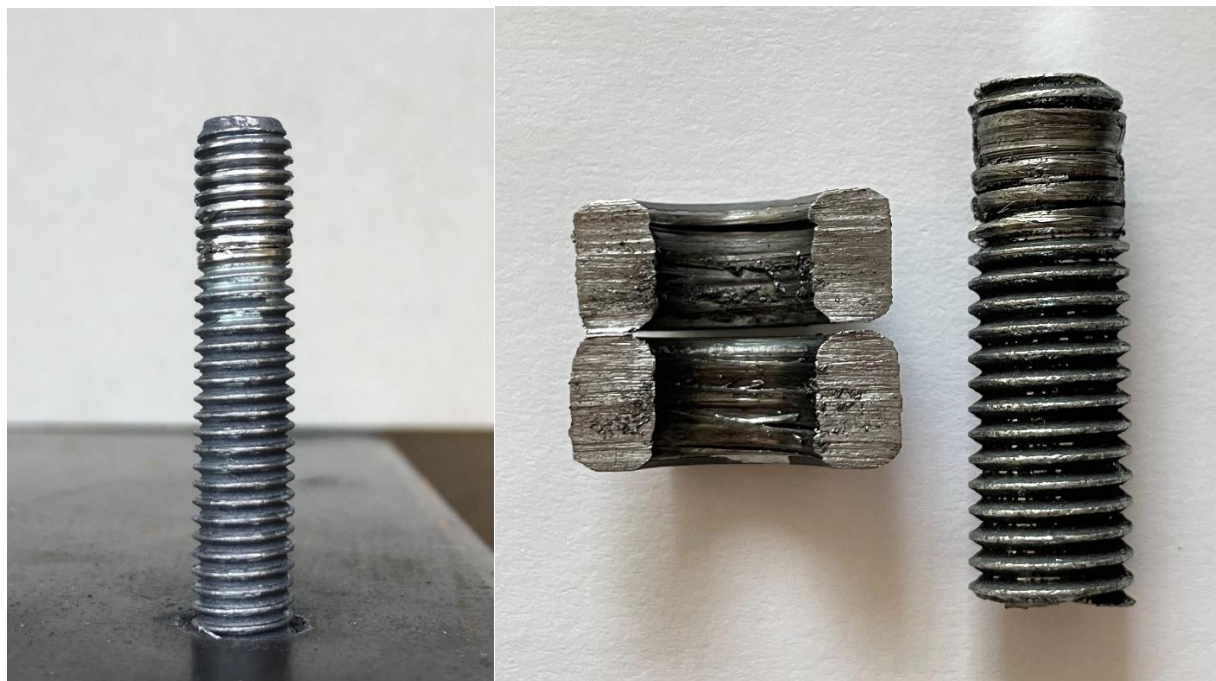
Velikost koeficientu tření přímo souvisí se závislostí osově síly na utahovacím momentu, což je patrné na srovnávacích grafech jednotlivých šroubů. Například v případě šroubu M8 je při stejném utahovacím momentu v případě mazání plastickým mazivem MOGUL G3 dosaženo až 3x vyšších hodnoty osově síly, než je tomu bez použití maziva. Minimalizováním tření pod maticí díky konstrukci měřícího zařízení a použití maziva MOGUL G3 a GLEIT – μ GL220 bylo dosaženo tak velké osově síly, že došlo v případě M8 a M10 k selhání šroubového spoje ještě před dosažením maximálního doporučeného utahovacího momentu. Selhání šroubového spoje je patrné například z grafu závislosti osově síly na utahovacím momentu, kde při zvyšování hodnoty utahovacího momentu již nedochází k růstu osově síly, případně dochází naopak k jejímu poklesu. Selhání spoje je také patrné například z průběhu závislosti prodloužení šroubu M8 a M10 na utahovacím momentu při použití kluzného laku, viz graf 22 a 23. V případě šroubu M8 došlo ke skokovému nárůstu prodloužení, zatímco co u šroubu M10 rostlo prodloužení exponenciálně, což vedlo v obou případech k porušení závitu šroubu.



Graf 22: Závislost prodloužení na utahovacím momentu, šroub M8



Graf 23: Závislost prodloužení na utahovacím momentu, šroub M10



Obr. 30: Porušený závit šroubu M8 (vlevo) a M10 (vpravo)

2.5 Výsledky měření koeficientu tření pod maticí

2.5.1 Šroub M8

Tab. 23: Tření pod maticí – naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M8 bez maziva

| Šroub M8 x 50 - 8.8 | | | | | |
|-----------------------|-----------------|--------------------|-------------------|------------------|----------------------|
| Matice M8 - 08 | | | | | |
| Bez maziva | | | | | |
| Utahovací moment [Nm] | Osová síla [kN] | Síla na rameni [N] | Třecí moment [Nm] | Prodloužení [mm] | Koeficient tření [-] |
| 4 | 0,87 | 5,7 | 1,824 | 0 | 0,412 |
| 6 | 1,43 | 9,2 | 2,944 | 0,002 | 0,405 |
| 8 | 1,82 | 12,3 | 3,936 | 0,005 | 0,425 |
| 10 | 2,16 | 15,3 | 4,896 | 0,007 | 0,446 |
| 12 | 2,55 | 18,1 | 5,792 | 0,01 | 0,446 |
| 14 | 2,89 | 20,2 | 6,464 | 0,01 | 0,440 |
| 16 | 3,16 | 23,4 | 7,488 | 0,012 | 0,466 |
| 18 | 3,48 | 26,7 | 8,544 | 0,012 | 0,483 |
| 20 | 3,88 | 30,6 | 9,792 | 0,012 | 0,496 |
| 22 | 4,11 | 32,7 | 10,464 | 0,012 | 0,500 |
| 24 | 4,41 | 36,1 | 11,552 | 0,015 | 0,515 |
| 26 | 4,67 | 39,3 | 12,576 | 0,015 | 0,529 |
| Průměrná hodnota | | | | | 0,464 |
| Směrodatná odchylka | | | | | 0,039 |

Tab. 24: Tření pod maticí – naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M8 parafínový olej

| Šroub M8 x 50 - 8.8 | | | | | |
|-----------------------|-----------------|--------------------|-------------------|------------------|----------------------|
| Matice M8 - 08 | | | | | |
| Parafínový olej | | | | | |
| Utahovací moment [Nm] | Osová síla [kN] | Síla na rameni [N] | Třecí moment [Nm] | Prodloužení [mm] | Koeficient tření [-] |
| 4 | 0,79 | 5,6 | 1,792 | 0 | 0,446 |
| 6 | 1,32 | 9,7 | 3,104 | 0,002 | 0,462 |
| 8 | 1,81 | 12,3 | 3,936 | 0,005 | 0,427 |
| 10 | 2,19 | 14,6 | 4,672 | 0,007 | 0,419 |
| 12 | 2,73 | 18,2 | 5,824 | 0,012 | 0,419 |
| 14 | 3,07 | 20,4 | 6,528 | 0,012 | 0,418 |
| 16 | 3,49 | 23,2 | 7,424 | 0,015 | 0,418 |
| 18 | 3,88 | 26 | 8,32 | 0,015 | 0,421 |
| 20 | 4,19 | 28,8 | 9,216 | 0,017 | 0,432 |
| 22 | 4,67 | 30,7 | 9,824 | 0,02 | 0,413 |
| 24 | 5,16 | 34,1 | 10,912 | 0,02 | 0,416 |
| 26 | 5,42 | 36,4 | 11,648 | 0,02 | 0,422 |
| Průměrná hodnota | | | | | 0,426 |
| Směrodatná odchylka | | | | | 0,014 |

Tab. 25: Tření pod maticí – naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M8 olej 10W-40

| Šroub M8 x 50 - 8.8 | | | | | |
|-----------------------|-----------------|--------------------|-------------------|------------------|----------------------|
| Matice M8 - 08 | | | | | |
| Olej 10W-40 | | | | | |
| Utahovací moment [Nm] | Osová síla [kN] | Síla na rameni [N] | Třecí moment [Nm] | Prodloužení [mm] | Koeficient tření [-] |
| 4 | 1,11 | 6,6 | 2,112 | 0 | 0,374 |
| 6 | 1,99 | 9,8 | 3,136 | 0 | 0,310 |
| 8 | 2,56 | 13 | 4,16 | 0,002 | 0,319 |
| 10 | 3,02 | 15,8 | 5,056 | 0,005 | 0,329 |
| 12 | 3,56 | 18,7 | 5,984 | 0,007 | 0,330 |
| 14 | 4,12 | 22,6 | 7,232 | 0,01 | 0,345 |
| 16 | 4,41 | 24,5 | 7,84 | 0,01 | 0,349 |
| 18 | 4,86 | 27,7 | 8,864 | 0,012 | 0,358 |
| 20 | 5,41 | 31,4 | 10,048 | 0,012 | 0,365 |
| 22 | 5,79 | 34,2 | 10,944 | 0,017 | 0,372 |
| 24 | 6,18 | 36,3 | 11,616 | 0,02 | 0,369 |
| 26 | 6,61 | 39,7 | 12,704 | 0,02 | 0,378 |
| Průměrná hodnota | | | | | 0,350 |
| Směrodatná odchylka | | | | | 0,022 |

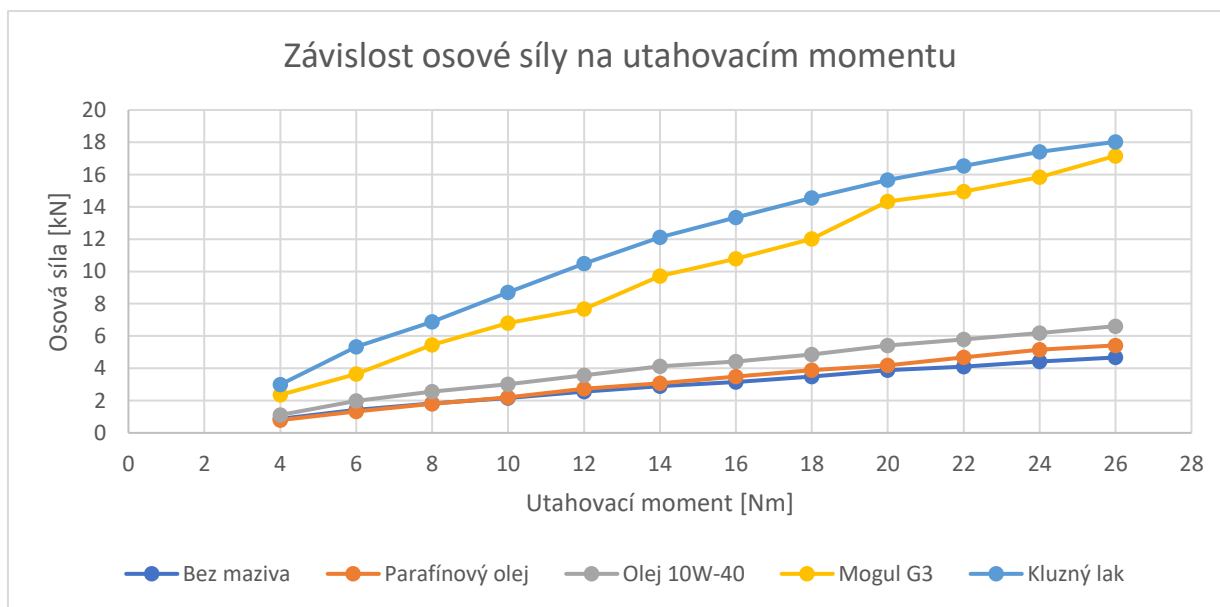
Tab. 26: Tření pod maticí – naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M8 MOGUL G3

| Šroub M8 x 50 - 8.8 | | | | | |
|-----------------------|-----------------|--------------------|-------------------|------------------|----------------------|
| Matice M8 - 08 | | | | | |
| MOGUL G3 | | | | | |
| Utahovací moment [Nm] | Osová síla [kN] | Síla na rameni [N] | Třecí moment [Nm] | Prodloužení [mm] | Koeficient tření [-] |
| 4 | 2,35 | 5,1 | 1,632 | 0 | 0,137 |
| 6 | 3,64 | 7,2 | 2,304 | 0,005 | 0,124 |
| 8 | 5,46 | 9,9 | 3,168 | 0,01 | 0,114 |
| 10 | 6,79 | 11,4 | 3,648 | 0,017 | 0,106 |
| 12 | 7,68 | 13,7 | 4,384 | 0,022 | 0,112 |
| 14 | 9,72 | 16,3 | 5,216 | 0,027 | 0,105 |
| 16 | 10,78 | 17,2 | 5,504 | 0,035 | 0,100 |
| 18 | 12,02 | 19,3 | 6,176 | 0,04 | 0,101 |
| 20 | 14,33 | 21,4 | 6,848 | 0,05 | 0,094 |
| 22 | 14,95 | 23,1 | 7,392 | 0,055 | 0,097 |
| 24 | 15,84 | 25,3 | 8,096 | 0,06 | 0,100 |
| 26 | 17,16 | 28,7 | 9,184 | 0,07 | 0,105 |
| Průměrná hodnota | | | | | 0,108 |
| Směrodatná odchylka | | | | | 0,012 |

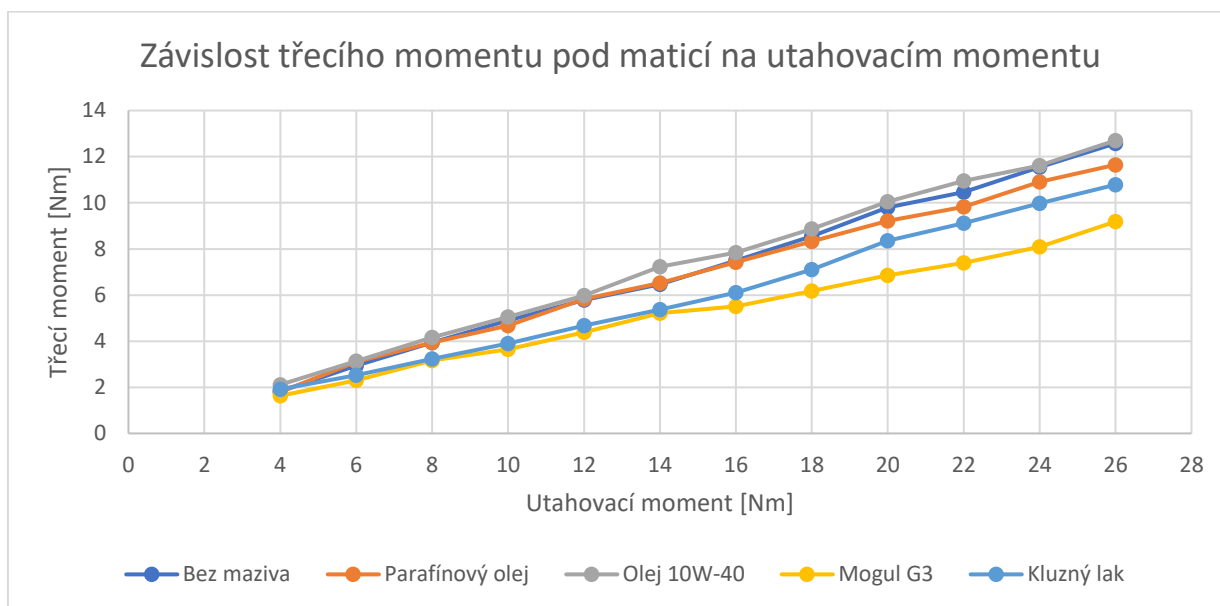
Tab. 27: Tření pod maticí – naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M8 kluzný lak

| Šroub M8 x 50 - 8.8 | | | | | |
|-----------------------|-----------------|--------------------|-------------------|------------------|----------------------|
| Matice M8 - 08 | | | | | |
| Kluzný lak | | | | | |
| Utahovací moment [Nm] | Osová síla [kN] | Síla na rameni [N] | Třecí moment [Nm] | Prodloužení [mm] | Koeficient tření [-] |
| 4 | 2,99 | 6 | 1,92 | 0 | 0,126 |
| 6 | 5,34 | 7,9 | 2,528 | 0,005 | 0,093 |
| 8 | 6,87 | 10,1 | 3,232 | 0,007 | 0,092 |
| 10 | 8,7 | 12,2 | 3,904 | 0,015 | 0,088 |
| 12 | 10,49 | 14,6 | 4,672 | 0,022 | 0,088 |
| 14 | 12,12 | 16,8 | 5,376 | 0,027 | 0,087 |
| 16 | 13,35 | 19,1 | 6,112 | 0,032 | 0,090 |
| 18 | 14,55 | 22,2 | 7,104 | 0,04 | 0,096 |
| 20 | 15,66 | 26,1 | 8,352 | 0,045 | 0,105 |
| 22 | 16,54 | 28,5 | 9,12 | 0,048 | 0,108 |
| 24 | 17,41 | 31,2 | 9,984 | 0,055 | 0,113 |
| 26 | 18,03 | 33,7 | 10,784 | 0,062 | 0,118 |
| Průměrná hodnota | | | | | 0,100 |
| Směrodatná odchylka | | | | | 0,013 |

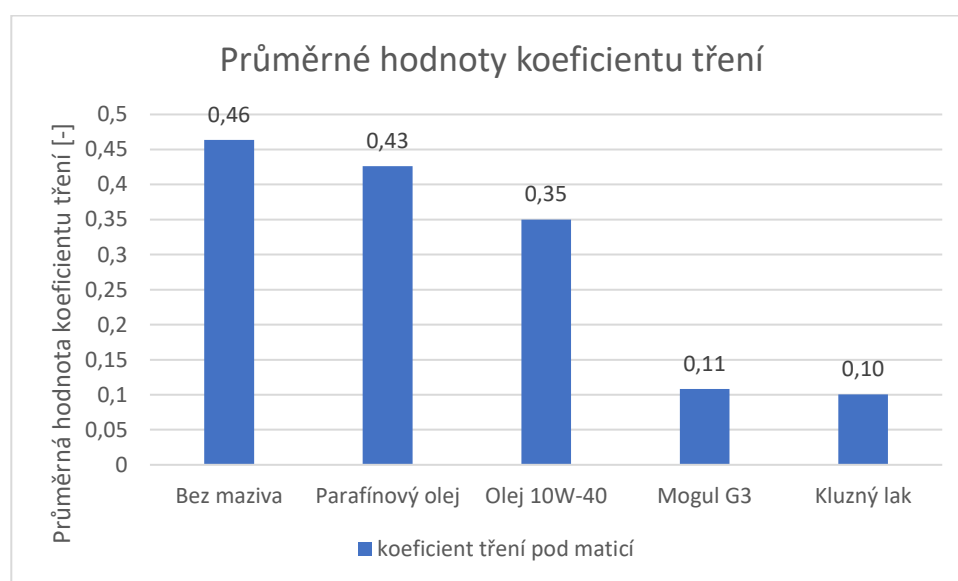
2.5.1.1 Porovnání naměřených hodnot



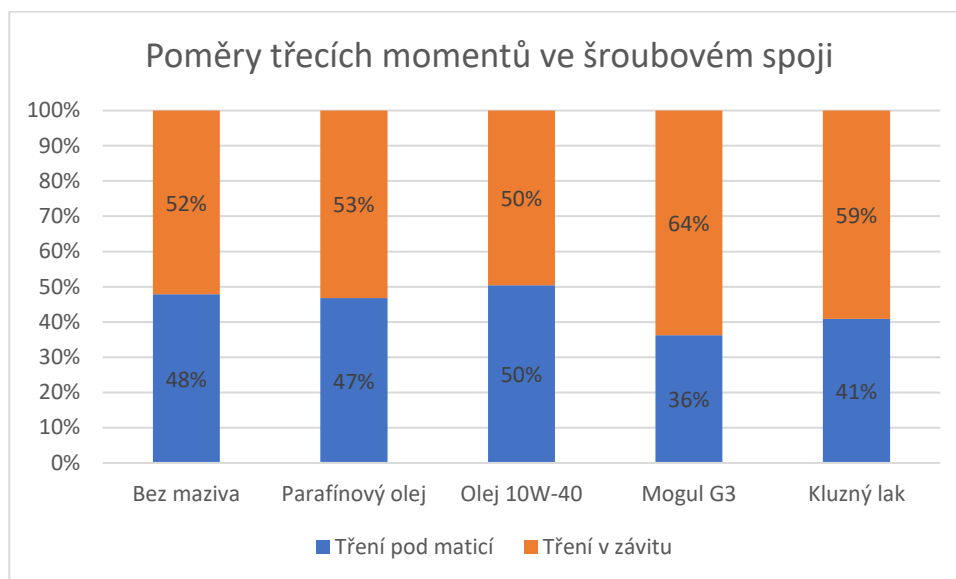
Graf 24: Porovnání závislosti osově síly na utahovacím momentu, šroub M8



Graf 25: Porovnání závislosti třecího momentu pod maticí na utahovacím momentu, šroub M8



Graf 26: Průměrné hodnoty koeficientu tření pod maticí, šroub M8



Graf 27: Poměry třecích momentů ve šroubovém spoji M8

2.5.2 Šroub M10

Tab. 28: Tření pod maticí – naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M10 bez maziva

| Šroub M10 x 50 - 8.8 | | | | | |
|-----------------------|-----------------|--------------------|-------------------|------------------|----------------------|
| Matice M10 - 08 | | | | | |
| Bez maziva | | | | | |
| Utahovací moment [Nm] | Osová síla [kN] | Síla na rameni [N] | Třecí moment [Nm] | Prodloužení [mm] | Koeficient tření [-] |
| 4 | 0,8 | 8,5 | 2,72 | 0 | 0,535 |
| 6 | 1,27 | 11,9 | 3,808 | 0 | 0,472 |
| 8 | 1,73 | 15,6 | 4,992 | 0,005 | 0,454 |
| 10 | 2,08 | 19 | 6,08 | 0,005 | 0,460 |
| 12 | 2,55 | 22,8 | 7,296 | 0,005 | 0,451 |
| 14 | 3,06 | 25,6 | 8,192 | 0,005 | 0,422 |
| 16 | 3,57 | 29,2 | 9,344 | 0,01 | 0,412 |
| 18 | 3,98 | 32,9 | 10,528 | 0,01 | 0,417 |
| 20 | 4,38 | 36,1 | 11,552 | 0,01 | 0,415 |
| 22 | 4,79 | 40,2 | 12,864 | 0,01 | 0,423 |
| 24 | 5,26 | 43,8 | 14,016 | 0,01 | 0,420 |
| 26 | 5,64 | 46,7 | 14,944 | 0,01 | 0,417 |
| 28 | 6,07 | 49,9 | 15,968 | 0,01 | 0,414 |
| 30 | 6,48 | 54,3 | 17,376 | 0,01 | 0,422 |
| 32 | 6,96 | 57,1 | 18,272 | 0,01 | 0,413 |
| 34 | 7,09 | 60,3 | 19,296 | 0,015 | 0,429 |
| 36 | 8 | 66,4 | 21,248 | 0,015 | 0,418 |
| 38 | 8,41 | 69,8 | 22,336 | 0,015 | 0,418 |
| 40 | 8,91 | 75,2 | 24,064 | 0,015 | 0,425 |
| 42 | 9,45 | 80,5 | 25,76 | 0,02 | 0,429 |
| 44 | 9,88 | 85,8 | 27,456 | 0,02 | 0,438 |
| 46 | 10,27 | 89,3 | 28,576 | 0,02 | 0,438 |
| 48 | 10,54 | 94,7 | 30,304 | 0,025 | 0,453 |
| Průměrná hodnota | | | | | 0,435 |
| Směrodatná odchylka | | | | | 0,027 |

Tab. 29: Tření pod maticí – naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M10 parafínový olej

| Šroub M10 x 50 - 8.8 | | | | | |
|-----------------------|-----------------|--------------------|-------------------|------------------|----------------------|
| Matice M10 - 08 | | | | | |
| Parafínový olej | | | | | |
| Utahovací moment [Nm] | Osová síla [kN] | Síla na rameni [N] | Třecí moment [Nm] | Prodloužení [mm] | Koeficient tření [-] |
| 4 | 0,51 | 4,6 | 1,472 | 0 | 0,455 |
| 6 | 0,83 | 7,7 | 2,464 | 0 | 0,468 |
| 8 | 1,08 | 10,6 | 3,392 | 0 | 0,495 |
| 10 | 1,25 | 14,2 | 4,544 | 0 | 0,572 |
| 12 | 1,58 | 16,9 | 5,408 | 0,005 | 0,539 |
| 14 | 1,88 | 20,02 | 6,4064 | 0,005 | 0,537 |
| 16 | 2,12 | 23,01 | 7,3632 | 0,005 | 0,547 |
| 18 | 2,29 | 26,9 | 8,608 | 0,007 | 0,592 |
| 20 | 2,51 | 30 | 9,6 | 0,007 | 0,602 |
| 22 | 2,8 | 33,1 | 10,592 | 0,01 | 0,596 |
| 24 | 3,07 | 36,4 | 11,648 | 0,01 | 0,598 |
| 26 | 3,29 | 39,6 | 12,672 | 0,012 | 0,607 |
| 28 | 3,55 | 43,1 | 13,792 | 0,015 | 0,612 |
| 30 | 3,86 | 47,3 | 15,136 | 0,015 | 0,618 |
| 32 | 4,05 | 50,2 | 16,064 | 0,015 | 0,625 |
| 34 | 4,38 | 54,5 | 17,44 | 0,015 | 0,627 |
| 36 | 4,62 | 57,7 | 18,464 | 0,017 | 0,629 |
| 38 | 5 | 62,1 | 19,872 | 0,017 | 0,626 |
| 40 | 5,13 | 69,8 | 22,336 | 0,022 | 0,686 |
| 42 | 5,34 | 73,6 | 23,552 | 0,025 | 0,695 |
| 44 | 5,6 | 76,9 | 24,608 | 0,027 | 0,692 |
| 46 | 5,82 | 80,7 | 25,824 | 0,03 | 0,699 |
| 48 | 6,13 | 82,9 | 26,528 | 0,032 | 0,682 |
| Průměrná hodnota | | | | | 0,600 |
| Směrodatná odchylka | | | | | 0,068 |

Tab. 30: Tření pod maticí – naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M10 olej 10W-40

| Šroub M10 x 50 - 8.8 | | | | | |
|-----------------------|-----------------|--------------------|-------------------|------------------|----------------------|
| Matice M10 - 08 | | | | | |
| Olej 10W-40 | | | | | |
| Utahovací moment [Nm] | Osová síla [kN] | Síla na rameni [N] | Třecí moment [Nm] | Prodloužení [mm] | Koeficient tření [-] |
| 4 | 0,85 | 6,2 | 1,984 | 0 | 0,368 |
| 6 | 1,4 | 10,9 | 3,488 | 0 | 0,392 |
| 8 | 1,7 | 14,3 | 4,576 | 0 | 0,424 |
| 10 | 2,05 | 18,2 | 5,824 | 0,002 | 0,447 |
| 12 | 2,35 | 21,5 | 6,88 | 0,005 | 0,461 |
| 14 | 2,61 | 25,2 | 8,064 | 0,005 | 0,487 |
| 16 | 2,98 | 28,4 | 9,088 | 0,007 | 0,480 |
| 18 | 3,28 | 32,6 | 10,432 | 0,01 | 0,501 |
| 20 | 3,61 | 36,3 | 11,616 | 0,015 | 0,507 |
| 22 | 3,98 | 39,8 | 12,736 | 0,02 | 0,504 |
| 24 | 4,44 | 44,1 | 14,112 | 0,022 | 0,501 |
| 26 | 4,69 | 46,7 | 14,944 | 0,025 | 0,502 |
| 28 | 5,09 | 50,6 | 16,192 | 0,027 | 0,501 |
| 30 | 5,3 | 53,8 | 17,216 | 0,03 | 0,512 |
| 32 | 5,77 | 57,9 | 18,528 | 0,035 | 0,506 |
| 34 | 6,17 | 62,1 | 19,872 | 0,035 | 0,507 |
| 36 | 6,51 | 66,3 | 21,216 | 0,04 | 0,513 |
| 38 | 7,01 | 70,2 | 22,464 | 0,045 | 0,505 |
| 40 | 7,37 | 73,4 | 23,488 | 0,047 | 0,502 |
| 42 | 7,75 | 77,9 | 24,928 | 0,052 | 0,507 |
| 44 | 8,27 | 82,8 | 26,496 | 0,055 | 0,505 |
| 46 | 8,58 | 86,2 | 27,584 | 0,06 | 0,506 |
| 48 | 8,98 | 90,4 | 28,928 | 0,065 | 0,507 |
| Průměrná hodnota | | | | | 0,484 |
| Směrodatná odchylka | | | | | 0,039 |

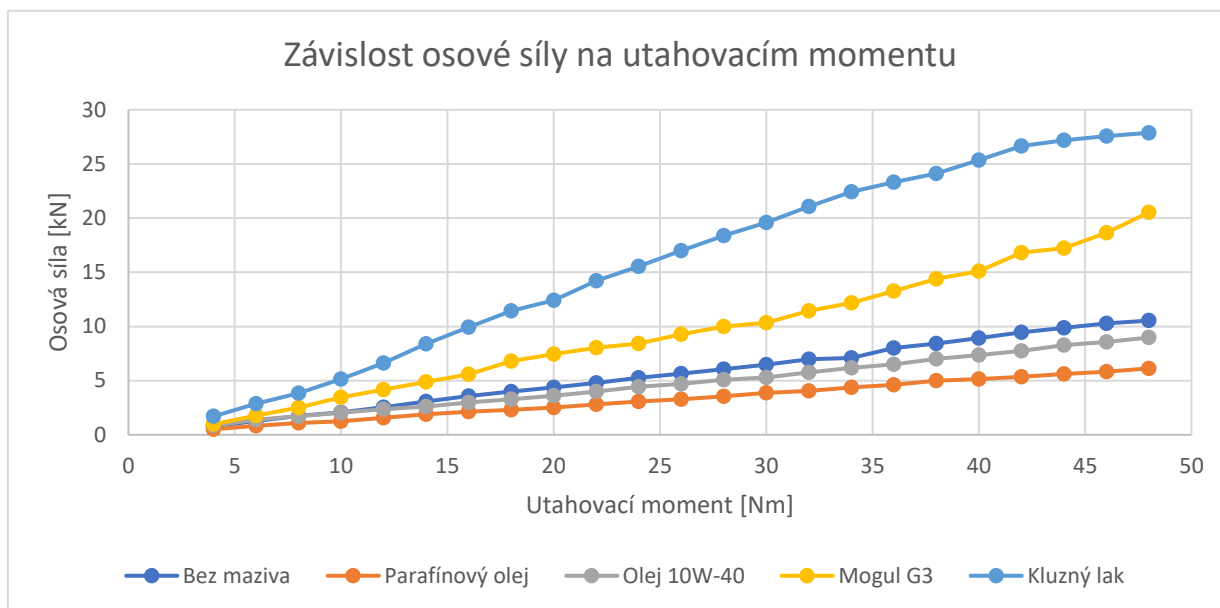
Tab. 31: Tření pod maticí – naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M10 MOGUL G3

| Šroub M10 x 50 - 8.8 | | | | | |
|-----------------------|-----------------|--------------------|-------------------|------------------|----------------------|
| Matice M10 - 08 | | | | | |
| MOGUL G3 | | | | | |
| Utahovací moment [Nm] | Osová síla [kN] | Síla na rameni [N] | Třecí moment [Nm] | Prodloužení [mm] | Koeficient tření [-] |
| 4 | 0,97 | 7,1 | 2,272 | 0 | 0,369 |
| 6 | 1,77 | 10,2 | 3,264 | 0 | 0,290 |
| 8 | 2,52 | 13,4 | 4,288 | 0,002 | 0,268 |
| 10 | 3,47 | 16,8 | 5,376 | 0,005 | 0,244 |
| 12 | 4,16 | 19,7 | 6,304 | 0,01 | 0,239 |
| 14 | 4,89 | 22,4 | 7,168 | 0,015 | 0,231 |
| 16 | 5,59 | 24,8 | 7,936 | 0,02 | 0,224 |
| 18 | 6,79 | 28,6 | 9,152 | 0,022 | 0,212 |
| 20 | 7,45 | 32,2 | 10,304 | 0,025 | 0,218 |
| 22 | 8,03 | 35,4 | 11,328 | 0,03 | 0,222 |
| 24 | 8,42 | 37,9 | 12,128 | 0,032 | 0,227 |
| 26 | 9,28 | 41,6 | 13,312 | 0,035 | 0,226 |
| 28 | 9,99 | 44,9 | 14,368 | 0,035 | 0,226 |
| 30 | 10,34 | 47,1 | 15,072 | 0,037 | 0,230 |
| 32 | 11,43 | 51,2 | 16,384 | 0,042 | 0,226 |
| 34 | 12,16 | 53,8 | 17,216 | 0,046 | 0,223 |
| 36 | 13,26 | 56,4 | 18,048 | 0,05 | 0,214 |
| 38 | 14,39 | 58,7 | 18,784 | 0,055 | 0,206 |
| 40 | 15,1 | 60,3 | 19,296 | 0,06 | 0,201 |
| 42 | 16,8 | 62,7 | 20,064 | 0,067 | 0,188 |
| 44 | 17,22 | 64,2 | 20,544 | 0,067 | 0,188 |
| 46 | 18,66 | 66,4 | 21,248 | 0,072 | 0,179 |
| 48 | 20,54 | 69,8 | 22,336 | 0,075 | 0,171 |
| Průměrná hodnota | | | | | 0,227 |
| Směrodatná odchylka | | | | | 0,040 |

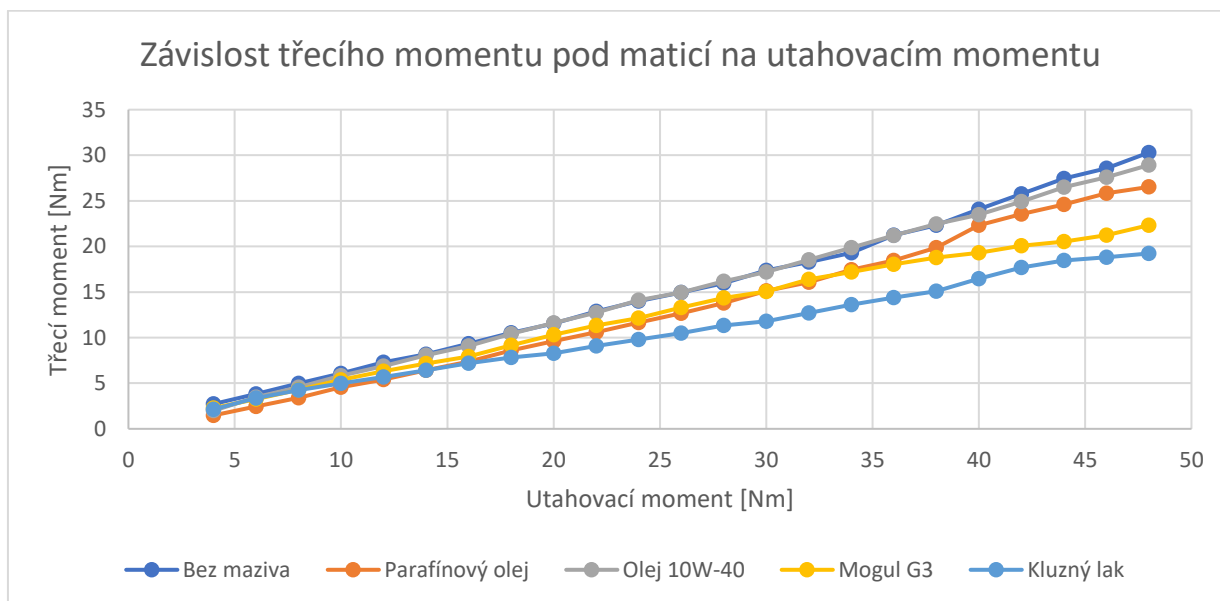
Tab. 32: Tření pod maticí – naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M10 kluzný lak

| Šroub M10 x 50 - 8.8 | | | | | |
|-----------------------|-----------------|--------------------|-------------------|------------------|----------------------|
| Matice M10 - 08 | | | | | |
| Kluzný lak | | | | | |
| Utahovací moment [Nm] | Osová síla [kN] | Síla na rameni [N] | Třecí moment [Nm] | Prodloužení [mm] | Koeficient tření [-] |
| 4 | 1,7 | 6,7 | 2,144 | | 0,199 |
| 6 | 2,86 | 10,5 | 3,36 | 0 | 0,185 |
| 8 | 3,85 | 13,3 | 4,256 | 0 | 0,174 |
| 10 | 5,13 | 15,6 | 4,992 | 0,005 | 0,153 |
| 12 | 6,61 | 17,8 | 5,696 | 0,01 | 0,136 |
| 14 | 8,38 | 20,1 | 6,432 | 0,015 | 0,121 |
| 16 | 9,93 | 22,5 | 7,2 | 0,02 | 0,114 |
| 18 | 11,45 | 24,5 | 7,84 | 0,025 | 0,108 |
| 20 | 12,4 | 25,9 | 8,288 | 0,032 | 0,105 |
| 22 | 14,22 | 28,4 | 9,088 | 0,04 | 0,101 |
| 24 | 15,55 | 30,6 | 9,792 | 0,047 | 0,099 |
| 26 | 16,99 | 32,8 | 10,496 | 0,052 | 0,097 |
| 28 | 18,37 | 35,4 | 11,328 | 0,057 | 0,097 |
| 30 | 19,6 | 36,9 | 11,808 | 0,062 | 0,095 |
| 32 | 21,07 | 39,7 | 12,704 | 0,07 | 0,095 |
| 34 | 22,42 | 42,6 | 13,632 | 0,077 | 0,096 |
| 36 | 23,32 | 45 | 14,4 | 0,08 | 0,097 |
| 38 | 24,1 | 47,2 | 15,104 | 0,087 | 0,099 |
| 40 | 25,35 | 51,4 | 16,448 | 0,095 | 0,102 |
| 42 | 26,66 | 55,3 | 17,696 | 0,105 | 0,105 |
| 44 | 27,19 | 57,7 | 18,464 | 0,11 | 0,107 |
| 46 | 27,56 | 58,8 | 18,816 | 0,115 | 0,108 |
| 48 | 27,87 | 60,1 | 19,232 | 0,122 | 0,109 |
| Průměrná hodnota | | | | | 0,117 |
| Směrodatná odchylka | | | | | 0,030 |

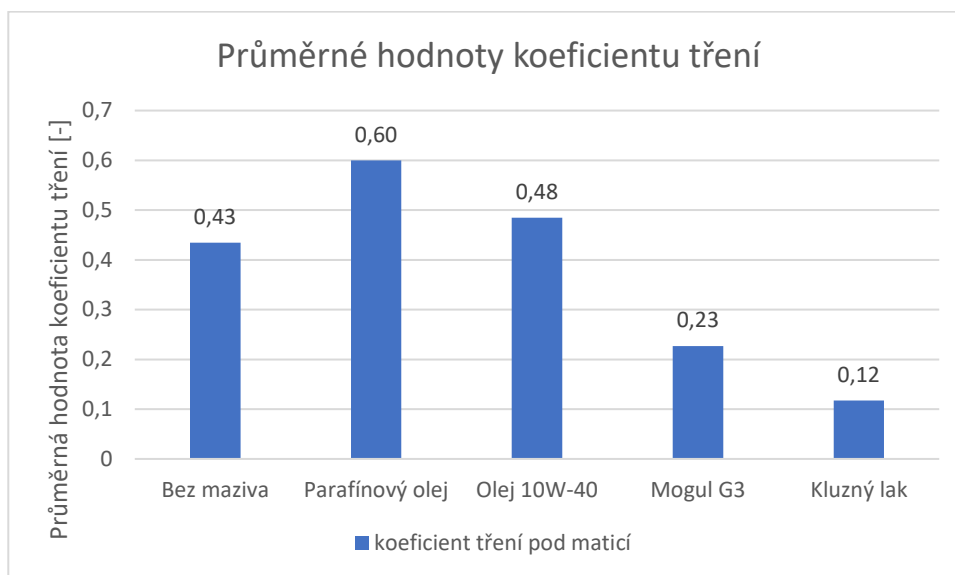
2.5.2.1 Porovnání naměřených hodnot



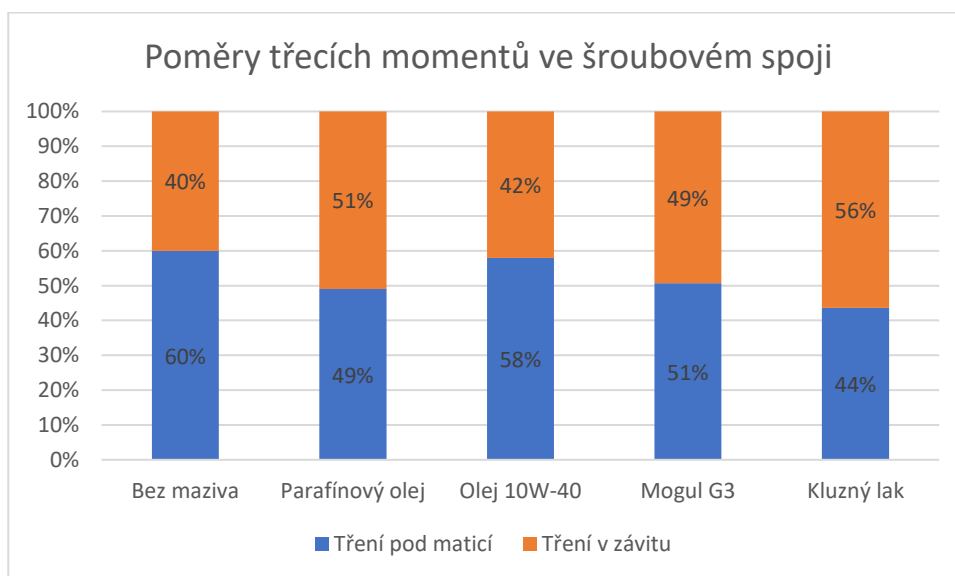
Graf 28: Porovnání závislosti osová síly na utahovacím momentu, šroub M10



Graf 29: Porovnání závislosti třecího momentu pod maticí na utahovacím momentu, šroub M10



Graf 30: Průměrné hodnoty koeficientu tření pod maticí, šroub M10



Graf 31: Poměry třecích momentů ve šroubovém spoji M10

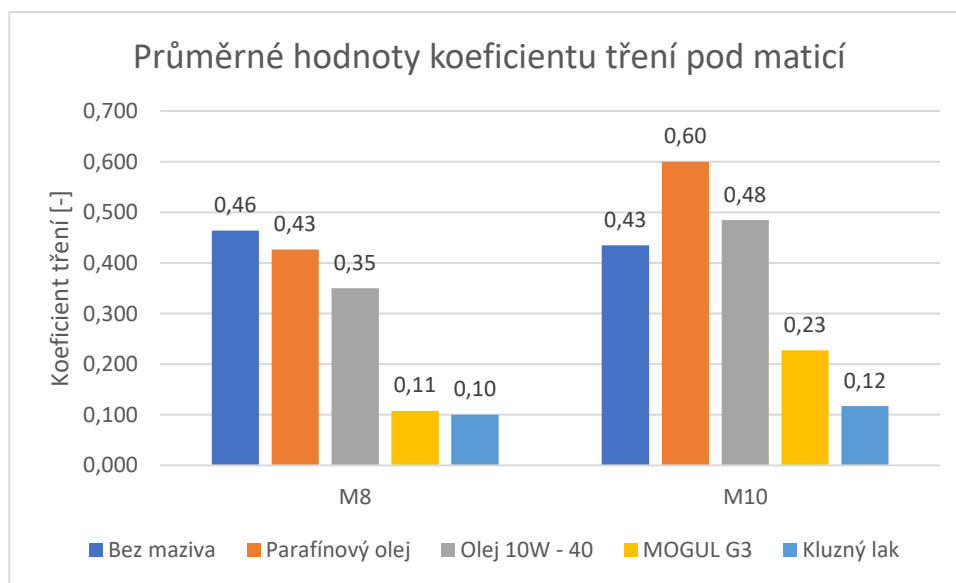
2.5.3 Vyhodnocení naměřených dat

Naměřená a vypočtená data lze vzájemně porovnat, protože ve všech případech byly použity stejné podmínky lišící se pouze přítomností maziva a velikostí šroubu.

Tab. 33: Průměrné hodnoty koeficientu tření pod maticí

| Průměrné hodnoty koeficientu tření pod maticí | | | | | |
|---|------------|-----------------|---------------|----------|------------|
| Šroub | Bez maziva | Parafínový olej | Olej 10W - 40 | MOGUL G3 | Kluzný lak |
| M8 | 0,464 | 0,426 | 0,350 | 0,108 | 0,100 |
| M10 | 0,435 | 0,600 | 0,484 | 0,227 | 0,117 |

Ve výše uvedené tabulce jsou shrnuty průměrné velikosti koeficientu tření pod maticí testovaných šroubů a maziv. Z výsledků je patrné, že na velikost koeficientu tření má značný vliv typ použitého maziva. Použití tekutých maziv (parafínový a motorový olej) se ukázalo jako nevhodné. V případě šroubu M10 mělo použití tekutých maziv negativní vliv na kluzné vlastnosti, přičemž byly naměřeny vyšší hodnoty koeficientu tření než v případě testovaných vzorků bez maziva. Naopak k zásadnímu snížení koeficientu tření došlo v případě použití plastického maziva MOGUL G3 a kluzného laku GLEIT – μ GL220, což mělo výrazný vliv na průběh závislosti osově síly na utahovacím momentu.



Graf 32: Srovnání hodnot koeficientu tření pod maticí

3 DISKUSE VÝSLEDKŮ

V rámci této diplomové práce byl proveden experiment za účelem určení velikosti koeficientu tření v závitě a pod maticí šroubového spoje a jeho vliv na bezpečnost. Experiment byl proveden s různými velikostmi šroubů a za použití různých maziv, přičemž byly stanoveny střední hodnoty koeficientu tření pro jednotlivé kombinace.

Z výsledků měření je patrné, že použití maziv má zásadní vliv na velikost koeficientu tření, což přímo souvisí s velikostí dosaženého předpětí. Velkou roli hraje ovšem typ maziva. V případě experimentu, kde bylo zohledněno pouze tření v závitě, dosahovala všechna testovaná maziva pozitivního vlivu na třecí vlastnosti. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při použití plastického maziva MOGUL G3, kde předpětí dosahovalo až 3x vyšších hodnot než bez použití maziva. Jen mírně vyšších hodnot koeficientu tření v závitě bylo dosaženo při použití kluzného laku GLEIT – μ GL220. Při experimentu, který zohledňuje i tření pod hlavou, se ukázala tekutá maziva jako nevhodná z důvodů zhoršení koeficientu tření pod maticí a s tím související velikosti předpětí oproti vzorkům bez použití maziva. Z tohoto experimentu vyplývá, že nejvhodnějším mazivem je kluzný lak GLEIT – μ GL220, pomocí kterého byl snížen koeficient tření pod maticí až o 400 %, což se v kombinaci se snížením koeficientu tření v závitě projevilo až trojnásobným zvýšením hodnoty předpětí.

Ve šroubovém spoji má vliv na velikost předpětí koeficient tření v závitě i koeficient tření pod maticí, jejich dopad na namáhání se ovšem liší. Tření v závitě ovlivňuje míru namáhání šroubu krutem, zatímco zvýšením tření pod maticí nedojde k většímu namáhání šroubu, ale pouze k poklesu účinnosti šroubového spoje. Z naměřených výsledků je patrné, že hodnoty koeficientu tření v závitě a pod maticí si nejsou rovny. Pokud by se při výpočtech utahovacího momentu počítalo s rovností koeficientu tření, pak by výsledný utahovací moment mohl být nedostatečný, anebo naopak přetěžující. Poměr koeficientů tření v závitě a pod maticí ovlivňuje i poměr příslušných třecích momentů. Zvýšení bezpečnosti šroubového spoje proti uvolnění je možné dosáhnout zvětšením podílu momentu tření pod maticí.

4 ZÁVĚR

Teoretická část diplomové práce se zabývá shrnutím základních poznatků rozsáhlé problematiky týkající se šroubových spojů včetně povrchových úprav spojovacího materiálu a příčin selhání šroubových spojů. Součástí práce je také rešerše tření a teorie mazání, která s daným tématem úzce souvisí.

V praktické části byly navrženy a zkonstruovány dvě zkušební zařízení na měření koeficientu tření v závitu a pod maticí šroubového spoje. Výstupními veličinami měřícího zařízení byly osová síla a třecí moment pod maticí, pomocí kterých byly vypočítány koeficienty tření. Společně s metodikou měření byl navržen rovněž jeho postup a pomocí experimentu došlo ke stanovení středních hodnot koeficientu tření v závitu a pod maticí pro konkrétní šroubové spoje za použití příslušných maziv.

Z experimentálně naměřených a vyhodnocených dat bylo dokázáno, že použitím vhodného maziva při montáži šroubového spoje lze snížit koeficient tření v závitu i pod maticí a tím dosáhnout výrazně vyšší velikosti předpětí při stejném utahovacím momentu než bez použití maziva, což se také projeví na bezpečnosti šroubového spoje.

5 SEZNAM ZDROJŮ A POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ABDELBARY, Ahmed. *Extreme tribology: fundamentals and challenges*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2020]. ISBN 9781138328150.
- [2] HELEBRANT, František, Jiří ZIEGLER a Daniela MARASOVÁ. *Technická diagnostika a spolehlivost*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2001. ISBN 8070788836.
- [3] BEČKA, Jan. *Tribologie*. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 8001016218.
- [4] KRÁLOVÁ, Magda. *Smykové tření*. [online]. Techmania [cit.16.3.2021]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/sila/odporove-sily/smykove-treni>
- [5] LEINVEBER, Jan, Jaroslav ŘASA a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky*. 3., dopl. vyd., dot. Praha: Scientia, 1999. ISBN 8071831646.
- [6] KRÁLOVÁ, Magda. *Valivé tření*. [online]. Techmania [cit.16.3.2021]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/sila/odporove-sily/valive-treni>
- [7] ČERNÝ, František, Ladislav SAMEK a Bruno SOPKO. *Fyzika I*. 5. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2018. ISBN 978-80-01-06358-3.
- [8] Types of lubrication – boundary, hydrostatic and hydrodynamic. Bright hub engineering. [online]. [cit.18.3.2021]. Dostupné z: <https://www.brighthubengineering.com/manufacturing-technology/73568-hydrostatic-lubrication/>
- [9] ZDRAVECKÁ, Eva. *Tribologické labororium – experimentálne metódy skúšania, opotrebenia materiálov, povrchových vrstiev a povlakov*. [online]. Tribotechnika [cit.20.5.2021]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12014/ribologicke-labororium-experimentalne-metody-skusania-trenia-opotrebe-nia-materialov-povrchovych-v.html>
- [10] What is friction? KYOWA. [online]. [cit.20.5.2021]. Dostupné z: https://www.facekyowa.co.jp/english/en_science/en_what_friction.html
- [11] ŠVEC, Vladimír. *Části a mechanismy strojů: spoje a části spojovací*. Vyd. 3. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 9788001041383.
- [12] BRYCHTA, Josef. *Technologie II*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1641-8
- [13] BOLEK, Alfred a Josef KOCHMAN. *Části strojů*. Vyd. 5., přeprac. (v SNTL 1. vyd.). Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989. Technický průvodce. ISBN 80-03-00046-7.

- [14] Mechanické vlastnosti šroubů. *KILLICH.cz*. [online]. [cit. 20.3.2021]. Dostupné z: <https://www.killich.cz/stranky/technicke-info/ocelovy-spojovaci-material/mechanicke-vlastnosti-sroubu>
- [15] GRABON, W.A., M. OSETEK a T.G. MATHIA. Friction of threaded fasteners. *Tribology International* [online]. 2018, **118**, 408-420 [cit. 2021-03-20]. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2017.10.014
- [16] Závitořezné nástroje. *Nakol* [online]. Nakol s.r.o, [cit. 2.4.2021]. Dostupné z: <https://www.nakol.cz/zavitnik-unc-hss-din-352-145000-sadovy>
- [17] Kreslení strojních součástí a spojů. *Eduka.spaco.cz* [online]. [cit. 2.4.2021]. Dostupné z: <http://eduka.spaco.cz/wp-content/5-kresleni-strojnich-soucasti-aspoju.pdf>
- [18] WALD, František, Luboš ROZLÍVKA, Zdeněk SOKOL a Hynek ŠERTLER. *Vliv maziva na utahování šroubů třecích spojů*. [online]. [cit. 5.4.2021]. Dostupné z: [http://people.fsv.cvut.cz/~wald/Clanky%20v%20Adobe%20\(Pdf\)/Vliv_maziva_na_VP_srouby.pdf](http://people.fsv.cvut.cz/~wald/Clanky%20v%20Adobe%20(Pdf)/Vliv_maziva_na_VP_srouby.pdf)
- [19] Jak mazat ložisko, převodovku nebo jiný strojní díl. Mm spektrum: Průmyslové kapaliny [online]. 2014 [cit.7.4.2021]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/potrebujete-namazat-lozisko-prevodovku-ci-jiny-strojni-dil>
- [20] GÄNSHEIMER, J., Zdeněk, NACHÁZEL. *Bílá tuhá maziva – správný krok v tribologii*. [online]. Tribotechnika. [cit.7.4.2021]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12010/bila-tuha-maziva-spravny-krok-v-tribologii.html>
- [21] Strojírenské, průmyslové a technické výpočty. MITCalc. [online]. [cit. 20.4.2021]. Dostupné z: https://www.mitcalc.cz/index_cz.htm
- [22] RÜEDY, Martin. *Proč je tření šroubového spoje zásadní z hlediska schopnosti procesu*. [online]. BOSSARD. [cit. 24.4.2021]. Dostupné z: https://media.bossard.com/cz-cs/cz-cs/-/media/bossard-group/website/documents/white-paper/bossard_white-paper-why-friction-in-screw_cz.pdf?la=cs
- [23] KREIBICH, Viktor. *Důsledky nevhodných povrchových úprav šroubů*. [online]. [cit. 2.5.2021]. Dostupné z: https://www.kreibichpovrchy.cz/?page_id=88
- [24] Pevnost při dynamickém zatížení. BOSSARD. [online]. [cit. 3.5.2021]. Dostupné z: https://media.bossard.com/cz-cs/-/media/bossard-group/website/documents/technical-resources/cz/f_038_cz.pdf

- [25] KUDLÁČEK, Jan, Viktor KREIBICH, Petr DRAŠNAR a Dana BENEŠOVÁ. Povrchové úpravy závitových dvojic. MM Průmyslové spektrum [online]. 14.12.2010 [cit. 10.5.2021]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/povrchove-upravy-zavitovych-dvojic.html>
- [26] Žárové zinkování. WIEGEL. [online]. [cit. 10.5.2021]. Dostupné z: https://wiegel.cz/fileadmin/redaktion/files-allgemein/Feuerverzinken/cz/WIEGEL_2013-11_InformaceProZaroveZinkovani_cz.pdf
- [27] Hot dip galvanizing. FABORY. [online]. [cit. 12.5.2021]. Dostupné z: https://www.fabory.com/en_GB/knowledge_center/technical/surface_treatments/hot_dip_galvanizing
- [28] Galvanické zinkování. Eurometal. [online]. [cit. 13.5.2021]. Dostupné z: <https://www.eurometal.cz/magazin/rozdil-mezi-zarovym-a-galvanickym-zinkovanim-detail-60>
- [29] HOUŠTĚK, Jan. Povrchové úpravy šroubů. MM Průmyslové spektrum [online]. 12.4.2006. [cit. 13.5.2021]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/povrchove-upravy-sroubu>
- [30] SANKARA NARAYANAN, T.S.N. Surface pretreatment by phoshate conversion coatings – a review. Reviews on Advanced Material Science. [online]. 2005 [cit. 15.5.2021]. Dostupné z: https://www.ipme.ru/e-journals/RAMS/no_2905/narayanan.pdf
- [31] ŽIVČÁK, Tomáš. Spoje a spojovací součásti. Stavba a provoz strojů I. [online]. [cit. 15.5.2021]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/208/01.html>
- [32] DOMINIK, Jozef. *Tribológia skrutkových spojů*. Žilina: Dr. Press, s.r.o., 2014. ISBfN 978-80-971501-0-5

6 SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1: Schematické zobrazení smykového tření [2]
- Obr. 2: Schematické zobrazení valivého tření [4]
- Obr. 3: Schematické zobrazení vnitřního tření [5]
- Obr. 4: Konfigurace třecích systémů [10]
- Obr. 5: Geometrie závitu [9]
- Obr. 6: Základní rozměry závitu [13]
- Obr. 7: Sada závitníků a závitová čelist [12]
- Obr. 8: Základní druhy šroubových spojů [27]
- Obr. 9: Předepjatý šroubový spoj [7]
- Obr. 10: Průběhy momentu v procesu utahování [7]
- Obr. 11: Diagram procesu utahování a povolování [7]
- Obr. 12: Dosedací mezikruhová plocha [7]
- Obr. 13: Rötšcherův diagram [7]
- Obr. 14: Oblasti tření ve šroubovém spoji [11]
- Obr. 15: Mikroskopický snímek šroubu a matice v řezu [11]
- Obr. 16: Krystalická struktura grafitu a sirníku molybdeničitého [15]
- Obr. 17: Únavová pevnost (směrnice VDI 2230) [20]
- Obr. 18: Schéma reakce zinku a oceli při porušení zinkové vrstvy [22]
- Obr. 19: Schéma zinkového povlaku a průběh křivky tvrdosti. [22]
- Obr. 20: Model zkušebního zařízení na určení vlivu tření v závitu
- Obr. 21: Zkušební zařízení na určení vlivu tření v závitu
- Obr. 22: Připravený testovaný vzorek včetně měření prodloužení
- Obr. 23: Model zkušebního zařízení na určení vlivu tření pod maticí
- Obr. 24: Model zkušebního zařízení na určení vlivu tření pod maticí, pohled shora
- Obr. 25: Zkušebního zařízení na určení vlivu tření pod maticí

Obr. 26: Zkušebního zařízení na určení vlivu tření pod maticí včetně měření prodloužení

Obr. 27: Testované šrouby a matice

Obr. 28: Šrouby a matice opatřené kluzným lakem

Obr. 29: Použitá maziva

Obr. 30: Porušený závit šroubu M8 a M10

7 SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Hodnoty koeficientu smykového tření [3]

Tab. 2: Hodnoty ramene valivého odporu [3]

Tab. 3: Značení závitů [3]

Tab. 4: Pevnostní třídy šroubů [10]

Tab. 5: Orientační hodnoty součinitele tření u povrchově neupravených (černých) šroubů [15]

Tab. 6: Druhy povrchových úprav [28]

Tab. 7: Utahovací momenty šroubů

Tab. 8: Naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M6 bez maziva

Tab. 9: Naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M6 mazáno – parafínový olej

Tab. 10: Naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M6 mazáno – olej 10W – 40

Tab. 11: Naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M6 mazáno – MOGUL G3

Tab. 12: Naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M8 bez maziva

Tab. 13: Naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M8 mazáno – parafínový olej

Tab. 14: Naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M8 mazáno – olej 10W – 40

Tab. 15: Naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M8 mazáno – MOGUL G3

Tab. 16: Naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M8 kluzný lak

Tab. 17: Naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M10 bez maziva

Tab. 18: Naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M10 mazáno – parafínový olej

Tab. 19: Naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M10 mazáno – olej 10W – 40

Tab. 20: Naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M10 mazáno – MOGUL G3

Tab. 21: Naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M10 kluzný lak

Tab. 22: Srovnání průměrných hodnot koeficientu tření v závitě

Tab. 23: Tření pod maticí – naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M8 bez maziva

Tab. 24: Tření pod maticí – naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M8 parafínový olej

Tab. 25: Tření pod maticí – naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M8 olej 10W-40

- Tab. 26: Tření pod maticí – naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M8 MOGUL G3
- Tab. 27: Tření pod maticí – naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M8 kluzný lak
- Tab. 28: Tření pod maticí – naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M10 bez maziva
- Tab. 29: Tření pod maticí – naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M10 parafínový olej
- Tab. 30: Tření pod maticí – naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M10 olej 10W-40
- Tab. 31: Tření pod maticí – naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M10 MOGUL G3
- Tab. 32: Tření pod maticí – naměřené a vypočtené hodnoty, šroub M10 kluzný lak
- Tab. 33: Průměrné hodnoty koeficientu tření pod maticí

8 SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Závislost osově síly na utahovacím momentu, šroub M6 bez maziva

Graf 2: Závislost osově síly na utahovacím momentu, šroub M6 mazáno – parafínový olej

Graf 3: Závislost osově síly na utahovacím momentu, šroub M6 mazáno – olej 10W – 40

Graf 4: Závislost osově síly na utahovacím momentu, šroub M6 mazáno – MOGUL G3

Graf 5: Porovnání závislostí osově síly na utahovacím momentu, šroub M6

Graf 6: Průměrné hodnoty koeficientu tření, šroub M6

Graf 7: Závislost osově síly na utahovacím momentu, šroub M8 bez maziva

Graf 8: Závislost osově síly na utahovacím momentu, šroub M8 mazáno – parafínový olej

Graf 9: Závislost osově síly na utahovacím momentu, šroub M8 mazáno – olej 10W – 40

Graf 10: Závislost osově síly na utahovacím momentu, šroub M8 mazáno – MOGUL G3

Graf 11: Závislost osově síly na utahovacím momentu, šroub M8 kluzný lak

Graf 12: Porovnání závislostí osově síly na utahovacím momentu, šroub M8

Graf 13: Průměrné hodnoty koeficientu tření, šroub M8

Graf 14: Závislost osově síly na utahovacím momentu, šroub M10 bez maziva

Graf 15: Závislost osově síly na utahovacím momentu, šroub M10 mazáno – parafínový olej

Graf 16: Závislost osově síly na utahovacím momentu, šroub M10 mazáno – olej 10W – 40

Graf 17: Závislost osově síly na utahovacím momentu, šroub M10 mazáno – MOGUL G3

Graf 18: Závislost osově síly na utahovacím momentu, šroub M10 kluzný lak

Graf 19: Porovnání závislostí osově síly na utahovacím momentu, šroub M10

Graf 20: Průměrné hodnoty koeficientu tření, šroub M10

Graf 21: Srovnání průměrných hodnot koeficientu tření v závitu

Graf 22: Závislost prodloužení na utahovacím momentu, šroub M8

Graf 23: Závislost prodloužení na utahovacím momentu, šroub M10

Graf 24: Porovnání závislosti osově síly na utahovacím momentu, šroub M8

Graf 25: Porovnání závislosti třecího momentu pod maticí na utahovacím momentu, šroub M8

Graf 26: Průměrné hodnoty koeficientu tření pod maticí, šroub M8

Graf 27: Poměry třecích momentů ve šroubovém spoji M8

Graf 28: Porovnání závislosti osově síly na utahovacím momentu, šroub M10

Graf 29: Porovnání závislosti třecího momentu pod maticí na utahovacím momentu, šroub M10

Graf 30: Průměrné hodnoty koeficientu tření pod maticí, šroub M10

Graf 31: Poměry třecích momentů ve šroubovém spoji M10

Graf 32: Srovnání hodnot koeficientu tření pod maticí