



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**POROVNÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ ŠROUBŮ S
RŮZNOU POVRCHOVOU ÚPRAVOU A PŘI UVÁŽENÍ
JEJICH POUŽITÍ NA HRANICI BEZPEČNOSTI**

COMPARISON OF MECHANICAL PROPERTIES OF BOLTS WITH VARIOUS SURFACE TREATMENT AND
UPON CONSIDERATION OF THEIR OPERATION ON THE SAFETY LIMIT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Peter Krško

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Oldřich Ševeček, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Peter Krško**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Oldřich Ševeček, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

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

Porovnání mechanických vlastností šroubů s různou povrchovou úpravou a při uvážení jejich použití na hranici bezpečnosti

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Šrouby jsou strojní součásti sloužící ke spojení dvou a více součástí v jeden funkční celek. Při konstrukci strojních zařízení jsou na šroubové spoje kladeny požadavky pevnostní a životnostní dle charakteru zatížení. Z tohoto důvodu musí být šroubové spoje dotaženy dotahovacím momentem s ohledem na jejich pevnost charakterizovanou pevnostní třídou a dle charakteru provozního zatížení šroubu. Na pevnost šroubu má vliv i jeho dodatečné tepelné ovlivnění v důsledku povrchových úprav šroubu, které musí být zohledněno v pevnostní třídě šroubu. Pro návrh co nejvhodnějšího šroubu a jeho povrchové úpravy pro danou aplikaci je tedy třeba znát dobře jeho mechanické charakteristiky a chování za podmínek blízkých hranici bezpečného provozu daného šroubového spoje, jejichž studium bude zároveň předmětem této bakalářské práce.

Cíle bakalářské práce:

Cílem bakalářské práce je objasnit silově–deformační chování šroubů v mezních zatěžovacích podmínkách s ohledem na jejich materiál, pevnostní třídu a povrchové zpracování. Dílčí úkoly lze rozvrhnout následovně:

- S využitím analytických vztahů posoudit napěťový stav uvnitř zadaného šroubového spoje v závislosti na jeho utažení.
- Navrhnout experiment pro zkoušku šroubového spoje u konkrétní strojní aplikace.
- Experimentálně stanovit mezní stavy plasticity a porušení u šroubů s různou povrchovou úpravou, vyvolané procesem dotahování.
- Porovnat výsledky plynoucí z analytického řešení a experimentu.
- Navrhnout nejvhodnější technické řešení daného šroubového spoje a jeho povrchové úpravy.

Seznam doporučené literatury:

BUDYNAS, R. G., NISBETT, J. K.: Shigley's Mechanical Engineering Design, 8th Edition, (2008) McGraw-Hill, ISBN: 0-390-76487-6

KULAK, G.L., FISHER, J.W., STRUIK, J.H.A.: Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted joints 2nd Edition, (2001), American institute of steel construction, Inc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zaoberá problematikou ut'ahovania skrutkových spojov na hranici bezpečnosti. Cieľom tejto práce je nájsť optimálnu povrchovú úpravu skrutky pre spoľahlivú aplikáciu do priemyselných vývev a objasniť jej silovo-deformačné chovanie pri použití rôznych povrchových úprav a rôznej čistoty povrchu. Ďalšia časť pozostáva z určovania maximálnych hodnôt ut'ahovacieho momentu vedúceho k porušeniu skrutky vývevy. K tomuto účelu je na jednej strane využitý analytický model skrutkového spoja a na strane druhej experiment na reálnom skrutkovom spoji. Výstupy oboch prístupov sú následne vzájomne porovnané a na ich základe doporučená najvhodnejšia povrchová úprava skrutkového spoja pre danú priemyselnú vývevu s cieľom dosiahnuť maximálnu možnú bezpečnosť voči ut'ahovaciemu momentu aplikovanému na skrutku pri montáži zariadenia.

Abstract

This bachelor thesis deals with issues of critical bolt joints tightening on the safety limit. The aim of this work is to find the optimal surface treatment of the bolt for reliable application in industrial vacuum pumps and to clarify its stress-strain behaviour upon using various surface treatments and different surface lubrication. Next part consists of finding the maximum torque values causing a fracture in bolts of the vacuum pumps. For this purpose, on one hand, the analytical model of the bolt joint is used and, on the other hand, the experimental observations on the real bolt joint are utilized. The outputs of both approaches are then compared to each other and, on their basis, the most suitable surface treatment of the bolt joint for the given industrial pump is recommended in order to achieve the maximum possible safety against torque applied to the bolt when assembling the device.

Klíčové slová

uťahovací moment, skrutkový spoj , povrchová úprava, výveva

Keywords

tightening torque, bolt joint, surface treatment, vacuum pump

Bibliografická citácia

KRŠKO, P. *Porovnání mechanických vlastností šroubů s různou povrchovou úpravou a při uvážení jejich použití na hranici bezpečnosti*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Oldřich Ševeček, Ph.D..

Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu spracoval samostatne pod vedením Ing. Oldřicha Ševečka, Ph.D. s využitím uvedenej literatúry.

V Brne, dňa 24. mája 2018

.....

Peter Krško

PodĎakovanie

Chcel by som sa týmto poďakovať svojmu vedúcemu Ing. Oldřichovi Ševečkovi, Ph.D. za jeho odborné vedenie, cenné rady a priateľský prístup. Ďalej by som sa chcel poďakovať firme Edwards za vytvorenie tejto témy a poskytnutie materiálnych prostriedkov, špeciálne Ing. Jiřímu Zapletalovi za venovaný čas a ochotu. Nakoniec by som sa chcel poďakovať mojej rodine a priateľom za podporu počas celého štúdia.

Obsah

Použité veličiny	13
1. Úvod	14
1.1 Mechanizmus vývevy	15
1.2 Skrutkové spoje.....	16
1.3 Definícia hlavného cieľa práce	18
2. Rešerš	19
2.1 Povrchové úpravy skrutiek	19
2.2 Problematika ťahovania skrutiek	22
3. Experimentálne testovanie skrutkového spoja	26
3.1 Postup prípravy	26
3.2 Postup merania.....	26
3.3 Meracie zariadenie	28
3.4 Výsledky meraní	30
4. Analytický výpočet skrutkového spoja	32
4.1 Výpočtový model pre výpočet maximálneho ťahovacieho momentu	32
4.2 Výpočet maximálneho ťahovacieho momentu pri fosfátovaní.....	35
4.3 Výpočet maximálneho ťahovacieho momentu pri zinkovaní.....	37
4.4 Výpočet maximálneho ťahovacieho momentu pri čiernení.....	39
4.5 Zhrnutie výsledkov analytického modelu.....	41
5. Porovnanie výsledkov analytického modelu s experimentom	41
6. Záver.....	43
Použitá literatúra.....	44

Použité veličiny

Veličina	Jednotka	Popis veličiny
A_s	mm^2	Plocha jadra skrutky
d	mm	Priemer závitú skrutky
D	mm	Rozstupný priemer trecej plochy hlavy skrutky a podložky
d_2	mm	Stredný priemer závitú skrutky
d_3	mm	Malý priemer závitú skrutky
f_2	-	Súčiniteľ šmykového trenia v závite
f_3	-	Súčiniteľ šmykového trenia medzi hlavou skrutky a podložkou
f_{ef}	-	Efektívny súčiniteľ šmykového trenia
F_m	N	Ťahová sila pre dosiahnutie medze pevnosti
F_o	N	Osová sila
M_1	Nm	Trečí moment medzi hlavou skrutky a podložkou
M_2	Nm	Trečí moment v závite
M_3	Nm	Moment prevedený na osovú silu
M_D	Nm	Doporučený ťahovací moment
M_{nom}	Nm	Používaný ťahovací moment
M_u	Nm	Ťahovací moment
p	mm	Rozstup závitú
R_m	MPa	Medza pevnosti
$R_{p0,2}$	MPa	Dohodnutá medza sklzu
α	°	Vrcholový uhol závitú
β	°	Uhol stúpania závitú
φ	°	Uhol natočenia pri lome
ϑ	°	Trečí uhol

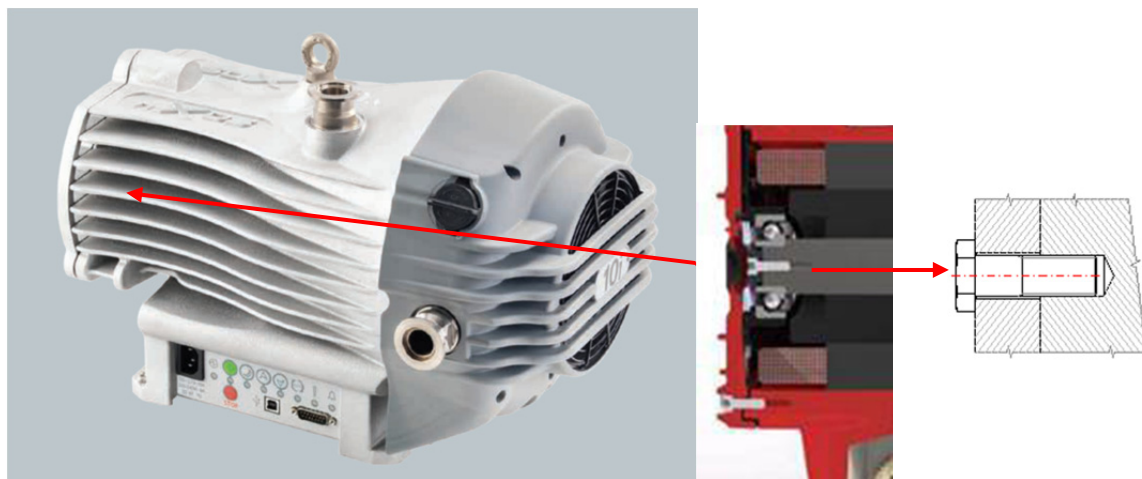
1. Úvod

Výveva je zariadenie na odčerpávanie plynov z uzavretého prostredia, čím v danom objeme vzniká vákuum. Využitie vývev v dnešnom svete moderných technológií, kde je čistota pri výrobných procesoch veľmi dôležitá, je značne vysoké. Čím vyššie sú nároky na kvalitu prostredia, tým sa zvyšujú aj na kvalitu a spoľahlivosť vývev. Avšak pri návrhu tak zložitého zariadenia, je nutné robiť určité kompromisy, ktoré sa môžu v bežnom používaní ukázať ako problematické.

Výveva s produktovým označením nXDS, ktorá bude rozoberaná v tejto bakalárskej práci, je suchý typ vývevy, čo znamená, že v zariadení sa nepoužíva žiadna tekutina, ktorá by potenciálne mohla narušiť vytvárané vákuum. V kombinácii s jej relatívne malou hmotnosťou a veľkým prietokom je jej využitie naozaj široké. Jej možné aplikácie zahŕňajú použitie v elektrónových mikroskopoch, urýchľovačoch častíc, časticovej fyzike a centrifúgach.

Pri navrhovanom dizajne vývevy sa kládol veľký dôraz na použitie rovnakých dielov v čo najväčšom rozsahu. Je to výsledok kombinácie viacerých faktorov. Z ekonomického hľadiska je najefektívnejšie zvoliť čo najmenšie súčiastky kvôli nízkej cene. Z hľadiska ľahkej manipulácie je rozhodujúca hmotnosť celého zariadenia, ktorá je pri danom produkte výrazne ovplyvnená spojovacím materiálom. Vzhľadom na veľký výkon, relatívne malú veľkosť a špecifické hodnoty pretlaku boli taktiež vysoké požiadavky na mechanické vlastnosti skrutiek. Technologický faktor je pri danom probléme kľúčový. Musí byť zaistený špecifický postup pri montáži a demontáži vývevy. Táto podmienka je docielená vysokou hodnotou ťahovacích momentov na použitých skrutkách.

Téma tejto bakalárskej práce bola vytvorená v spolupráci so spoločnosťou Edwards. Pri výrobe a servise vývev typu nXDS sa začal objavovať problém lomu skrutiek v zadnej časti vývevy. Keďže je momentálne používaný typ skrutky za hranicou bezpečnosti, úlohou tejto bakalárskej práce je nájsť skrutku s vhodnou povrchovou úpravou, ktorá bude spĺňať vyššie zmienené požiadavky. Povrchová úprava skrutiek je totiž jedným z dôležitých parametrov, ktoré môžu pevnosť skrutky ovplyvniť.



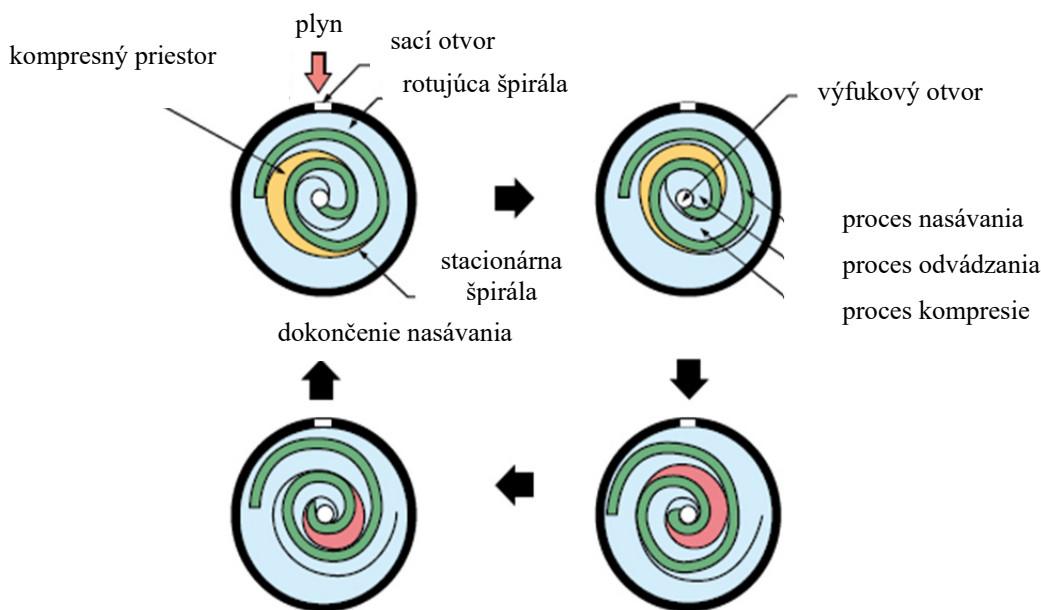
Obrázok 1. Výveva typu nXDS v reze s pohľadom na problematickú časť [1].

V úvodnej časti budú priblížené základné časti riešeného problému ako rozdelenie priemyselných vákuových púmp, technologický princíp vývevy typu nXDS a použitého spojovacieho materiálu. Rešerš bude rozdelený na niekoľko častí, ktoré budú obsahovať najrozšírenejšie povrchové úpravy a uvedenie do problematiky utáhovania skrutiek. V časti experimentálneho testovania bude opísaný postup experimentu skúšania skrutiek, testovacej zostavy, momentový kľúč STwrench s príslušným softvérom. K daným testom bude pridaná fotodokumentácia s vykreslenými priebehmi zaťažovania s číselným a slovným zhodnotením. Analytický výpočet skrutkového spoja bude kapitola zaoberajúca sa posudzovaním napäťového stavu vo vnútri skrutky v závislosti na jeho utiahnutí. V predposlednej kapitole bude grafické porovnanie výsledkov z experimentálneho testovania a analytických výpočtov s diskusiou nad získanými výsledkami. Na záver bude zvolená najvhodnejšia kombinácia povrchovej úpravy a čistoty skrutky vedúcej k najvyššej bezpečnosti voči porušeniu zadaného skrutkového spoje.

1.1 Mechanizmus vývevy

Vývevy sa môžu deliť podľa typu mechanizmu vytvárajúceho vákuum na niekoľko skupín: piestová, hadicová, kvapalinová, rotačná, difúzna, špirálová a turbomolekulárna. Výveva typu nXDS používa špirálový mechanizmus, čo jej ako suchej výveve umožňuje dosiahnuť najvyššie rýchlosti. Navyše je jej konštrukcia zabezpečuje vysokú životnosť vzhľadom na minimálny počet pohyblivých častí.

Mobilná špirála je poháňaná kľukovým hriadeľom s malou kľukou a pohybuje sa excentrickým pohybom vzhľadom na stred špirály umiestnenej v pevnej polohe. Prívod vzduchu je umiestnený v hornej časti krytu kompresného prvku – vid' Obrázok 2.

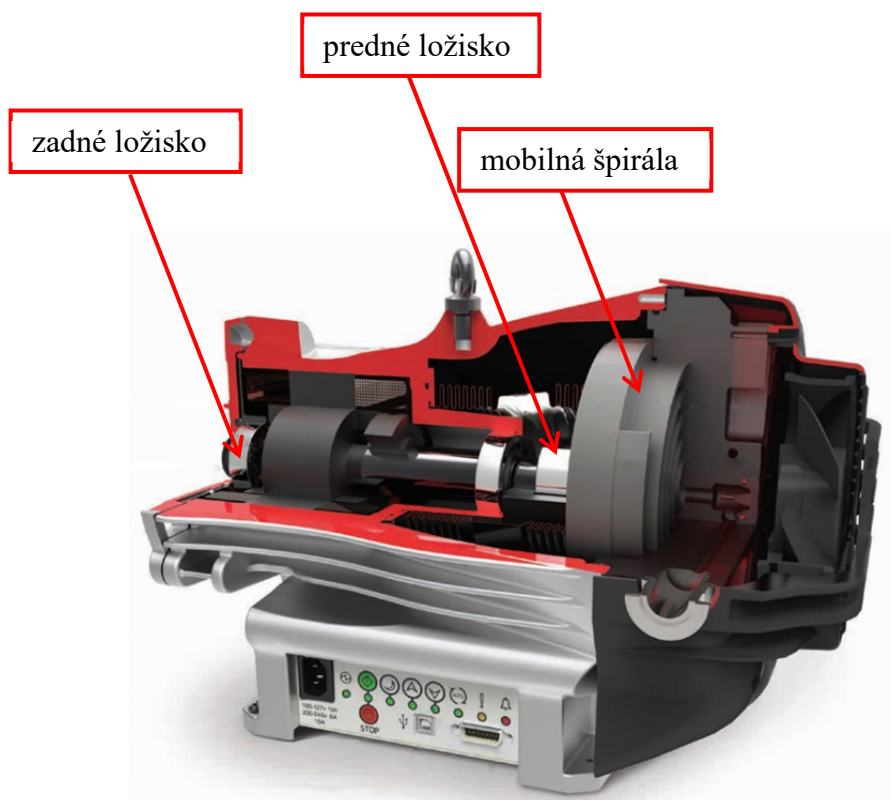


Obrázok 2. Popis cyklu špirálovej vývevy [3].

Ak sa rotujúca špirála pohybuje, nasávaný vzduch je uzavretý v jednej vzduchovej kapsule a stlačený smerom k stredu špirály, kde je umiestnený výstup a spätný ventil. Kompresný cyklus trvá 2,5 otáčky, čo prakticky spôsobuje konštantný prúd vzduchu bez pulzovania. Proces je pomerne tichý, nevytvára vibrácie, pretože v prvku nie je takmer žiadna

zmena ťahovacieho momentu v porovnaní napríklad s piestovou vývevou. Vzhľadom na to, že medzi kovovými povrchmi špirál nie je žiadny kontakt, nie je potrebné olejové mazanie v kompresnej komore.

Vo výveve daného typu sú použité dve hlavné ložiská (viď Obrázok 3). Jedno ložisko sa nachádza v prednej časti vývevy na ktorom je osadená pohyblivá časť mechanizmu – mobilná špirála, ktorá rotačným pohybom vytvára vákuum. Skrutka na tomto ložisku má presne definovaný ťahovací moment, aby bolo pomocou podložky vymedzené predpätie daného ložiska a zároveň aby bola utiahnutá mobilná špirála k hriadeľu vývevy v axiálnom smere. Druhé ložisko sa nachádza v zadnej časti, kde je utiahnuté k hriadeľu rovnakou skrutkou ako prvé ložisko. Podmienka je, aby sa pri montáži a demontáži vývevy uvoľnilo ako prvé ložisko to, na ktorom je osadená mobilná špirála. To znamená, že ťahovací moment na zadnom ložisku musí byť väčší ako na prednom ložisku.



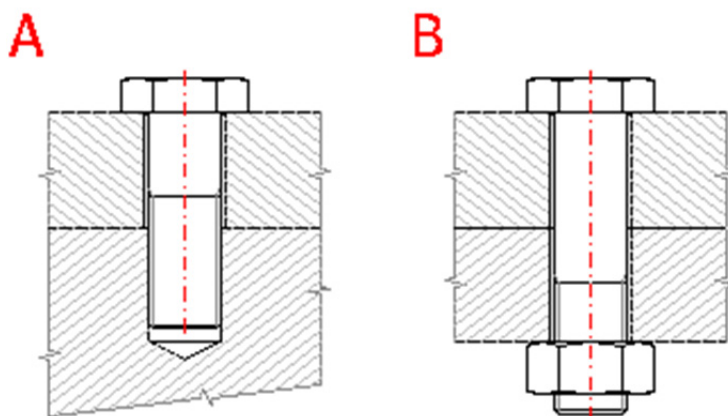
Obrázok 3. 3D model vývevy s popisom základných častí rotorovej časti [1].

1.2 Skrutkové spoje

Skrutkové spoje sa používajú hlavne k prenosu síl pôsobiacich v ose skrutky. Tvoria tvarový spoj, pretože sila sa z jednej súčasti do druhej prenáša tvarovou spojovacou súčasťou, t.j. skrutkou. Časté sú aj prípady, kedy pôsobí sila kolmo k ose skrutky. Pre tieto tvarové spojenia sa používajú lícované skrutky alebo skrutky voľne prechádzajúce vnútorným priemerom lícovanej trubky. Tieto spojenia sú vhodné hlavne pre prenášanie veľkých síl alebo pri striedavom dynamickom zaťažovaní. Silové spojenie pomocou predpätých skrutkových spojov sa používa hlavne pre spojenie pásov v oceľových konštrukciách. Utiahnutím skrutky

pred prevádzkovým zaťažením sa vytvorí predpätie v skrutke aj v spojovaných súčiastiach a tým aj trenie v spoji. Z konštrukčného hľadiska rozlišujeme dva základné spôsoby prevedenia skrutkového spoja [4]:

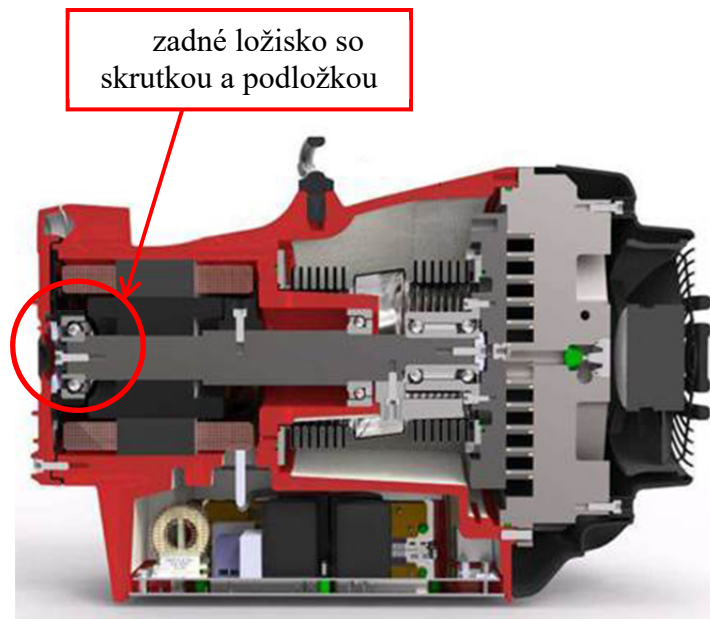
- A. Skrutkový spoj so závrtnou skrutkou
- B. Skrutkový spoj s priechodnou skrutkou



Obrázok 4. Druhy skrutkového spoja [5].

Skrutky sú často utiahnuté pôsobením ťahovacieho momentu na hlavu alebo maticu čo spôsobuje jej natiahnutie. Natiahnutie spôsobuje pnutie alebo predpätie v skrutke, čo je sila, ktorá drží spoj vcelku. Ťahovací moment je relatívne ľahko merateľný pomocou momentového kľúča, preto je to najčastejšie používaný indikátor napätia skrutiek. Bohužiaľ, momentový kľúč nemeria presné napätie skrutiek, hlavne preto, lebo nezohľadňuje trenie. Trenie závisí od skrutky, matice a podložky, hladkosti povrchu, presnosti obrábania, stupňa mazania a počtu prípadov, kedy bola skrutka použitá. Výrobcovia spojovacích materiálov často poskytujú informácie na určenie ťahovacieho momentu na utiahnutie rôznych skrutiek, ktoré zohľadňujú trenie a iné účinky. [6]

V tejto bakalárskej práci budeme používať a analyzovať skrutkový spoj so závrtnou skrutkou, čiže variantu A (viď Obrázok 4), umiestnený v zadnej časti vývevy (viď Obrázok 5). Konkrétne pôjde o skrutku s označením M5x20 s vnútorným šesťhranom v triede G12.9 vo viacerých povrchových úpravách. Označenie G12.9 značí najvyššiu pevnostnú triedu skrutky, kde je pevnosť v ťahu $R_m=1220\text{MPa}$ a dohodnutá medza sklzu je $R_{p0,2}=1100\text{MPa}$. Pre skrutky s priemerom $d=5\text{mm}$ je doporučený ťahovací moment daný výrobcom $M_D=11,2\text{Nm}$. Tu nastáva problém, keďže z technologického hľadiska potrebujeme danú skrutku na zadnom ložisku zaťažiť ťahovacím momentom až o veľkosti $M_{nom}=12\text{Nm}$. Vzhľadom na mierne odlišnosti skutočného chovania skrutky a tabuľkových hodnôt, ktoré sú vypočítané s koeficientom trenia $\mu=0,14$ a 90% medze sklzu, budeme predpokladať, že pri iných podmienkach, skrutka v rovnakej pevnostnej triede bude môcť byť zaťažená momentom M_{nom} bez toho, aby došlo k medznému stavu pružnosti.



Obrázok 5. Rez modelu vývevy [1].

1.3 Definícia hlavného cieľa práce

Cieľom bakalárskej práce je objasniť silovo-deformačné správanie skrutiek vývevy v medzných zaťažovacích podmienkach s ohľadom na materiál, pevnostnú triedu a povrchové spracovanie, porovnať analytický výpočet s experimentálnym meraním a na ich základe zvoliť najvhodnejšie riešenie skrutkového spoja (danej vývevy), u ktorého bude pre požadovaný ťahovací moment zaistená najvyššia bezpečnosť voči porušeniu.

2. Rešerš

2.1 Povrchové úpravy skrutiek

V tejto kapitole sa budeme zaoberať povrchovými úpravami spojovacích materiálov. V prvých 3 podkapitolách budú opísané povrchové úpravy s ktorými sa budeme stretávať počas celej práce. Povrchové úpravy môžu mať významný vplyv na vlastnosti spojovacích prvkov, čím sa stávajú vhodnejšími pre špecifické aplikácie. Povrchové úpravy sa používajú na zlepšenie trvanlivosti (odolnosť proti opotrebeniu a odolnosť proti korózii) alebo na dekoratívne účely. Spojovacie prvky, ktoré sa majú používať v podmienkach, kde sú vystavené vysokej záťaži, korózii alebo extrémnym teplotám môžu mať značný úžitok z pokovovania/poťahovania.

2.1.1 Čierny fosfát

Fosfátovanie tiež známe ako *parkerizácia* je proces chemického fosfátového konverzného povlaku, pri ktorom je mikroskopická vrstva železa odstránená a nahradená porovnateľne tenkou vrstvou zinku alebo oxidu manganičitého z dôvodu vytvorenia ocele s vyššou odolnosťou proti korózii a opotrebeniu. Konečným výsledkom je atraktívny a odolný šedo-čierny povrch. Proces parkerizácie nie je možný pri neželezných kovoch, ako je hliník, mosadz alebo meď. Nie je ho možné použiť ani na ocele, ktoré obsahujú veľké množstvo niklu, alebo na nehrdzavejúcu oceľ. Čierny fosfátový povlak sa často používa na zvýšenie odolnosti proti korózii. Avšak, samotný fosfátový povlak neposkytuje ochranu kvôli poréznej povahe povlaku. Preto sa na dosiahnutie strednej úrovne odolnosti proti korózii používa dodatočná úprava s olejom alebo inými substanciami. Fosfátové nátery sa zvyčajne používajú na pomoc pri zabíjaní komponentov, ktoré sú vystavené opotrebeniu, a pomáhajú predchádzať poškodeniu. Je to tiež povrchová úprava, ktorá sa používa na prípravu povrchov na ďalšie nanášanie/lakovanie. Porézná povaha fosfátovej povrchovej úpravy umožňuje materiálom preniknúť do povlaku, čím sa dosiahne vynikajúca adhézna báza pre sekundárne spracovanie. Jeho chemická povaha elektricky izoluje povrch súčasti znižujúcorozíu, ktorá sa vyskytuje pri rozhraní kovu a náteru/povrchovej úpravy. [10]

2.1.2 Zinkovanie

Oceľové spojovacie prvky môžu byť elektrolyticky pokovované zinkom pre lepšiu odolnosť proti korózii. Spojovacie prvky, ktoré boli pozinkované, majú lesklý strieborný povrch. Je to *obetná* úprava, keďže vytvorený galvanický článok koroduje pred podkladovou oceľou. Pozinkované spojovacie prvky sú pomerne odolné voči korózii, ale budú hrdzavieť, ak je náter poškodený alebo vystavený nepriaznivým podmienkam (napr. morské prostredie). Druh tohto pokovovania nebude poskytovať viac ako 12 hodín ochrany proti soľnému postreku. Odolnosť proti korózii zinku závisí od hrúbky povlaku a môže byť ďalej zvýšená aplikáciou konverzného povlaku. Zinková úprava tiež poskytuje istú estetickú hodnotu, zvyšuje odolnosť proti opotrebeniu a poskytuje vynikajúcu priľnavú plochu pre lakovanie.

Číry zinok: Nanášaním číreho chromátového povlaku na zinkovaný povrch sa ochrana proti soli sa zvyšuje na 24-36 hodín.

Žlté pozinkovanie: Aplikuje sa žltý dichromát na zinok, čo výrazne zlepšuje odolnosť voči korózii približne na 96 hodín pri postreku soľou.

Čierne pozinkovanie: Sekundárne spracovanie po ukončení prvotného zinkovania, používané na vytvorenie čierneho povrchu. Tento proces zvyšuje odolnosť samotného pokovovania proti korózii (podobne ako žltý zinok) a mení vzhľad z lesklého strieborného povrchu na lesklý čierny povrch.

Galvanizácia za tepla: Galvanizácia zahŕňa aplikáciu vrstvy zinku. Zinkovanie ponorom za tepla vytvára najhrubší možný povlak na kov, čo vedie k veľmi vysokej odolnosti voči korózii. Vzhľadom na hrúbku vrstvy, galvanizované skrutky nie sú zvyčajne kompatibilné so štandardnými maticami. Galvanizované matice sú o niečo väčšie ako bežné matice, aby sa vyrovnal rozdiel z dôvodu hrúbky povlaku. Galvanizované spojovacie prvky sa často používajú v pobrežných oblastiach. [10]

2.1.3 Čierny oxid

Čierny oxid je nízko nákladový konverzný povlak, kde sa oxidujúce soli používajú na reakciu so železom v zliatinách ocele vytvárajúc magnetit, čierny oxid železa. Výsledkom je atraktívny a odolný matný čierny povrch. Zatiaľ čo oceľ je zvyčajne podklad, iné materiály vrátane nehrdzavejúcej ocele, zliatiny, medi, mosadze, bronzu, tlakovo liateho zinku a liatiny reagujú rovnako dobre. Reakcia vytvára mikroskopickú oxidačnú vrstvu bez ovplyvnenia rozmerových aspektov súčasti. Pretože je oxidačná vrstva vytvorená reakciou úplne integrovaná s kovovým substrátom, je veľmi stabilná aj pri teplotách nad 500 stupňov Celzia. Navyše, povrch nie je náchylný na opotrebenie, odlupovanie alebo ošúpanie. Odolnosť voči opotrebeniu má lepšiu než veľa galvanizovaných povlakov. Jediný spôsob ako odstrániť povlak, sú mechanické alebo chemické metódy. Oxidované povrchy majú vynikajúcu schopnosť absorbovať oleje, vosky a laky, ktoré zlepšujú vzhľad, ako aj ďalej chránia upravený kov alebo zliatinu. Súčasti z čierneho oxidu sa často používajú v prevodových a hydraulických systémoch, kde je hotová časť neustále ponorená do oleja, alebo pre pohyblivé časti, ktoré nemôžu tolerovať zmenu rozmeru pri použití viac odolných povrchových úprav proti korózii. Čierny oxid sám o sebe neposkytuje prakticky žiadnu ochranu pred koróziou prostredím a preto si vyžaduje ďalšie ošetrovanie s cieľom zlepšiť odolnosť proti korózii (ako olej alebo vosk). Aj keď je povrch naolejovaný alebo voskovaný, čierny oxid ponúka len miernu ochranu a tak je ideálny pre vnútorné aplikácie. Dôležitou črtou čierneho oxidu je, že netvorí bielu hrdzu - vlastnosť spoločná pre niektoré galvanizované povrchy. Pretože tvorba bielych kryštálov hrdze je rizikovým faktorom pre elektrické skraty, spojovací materiál z čierneho oxidu je často preferovaný v elektronickom priemysle. Riziko zlyhania materiálu v dôsledku vodíkovej krehkosti v prípade tvrdených spojovacích materiálov sa po dokončení prakticky eliminuje s čiernym oxidom. Proces konverzného potažovania nezahŕňa žiadnu galvanickú aktiváciu alebo použitie kyseliny - dva primárne rizikové faktory, ktoré prispievajú k vodíkovej krehkosti. Následne tvrdené spojovacie prvky dokončené v čiernom oxide nevyžadujú vysokú teplotu pečenia rovnako ako ich galvanizované náprotivky, aby sa minimalizovala vodíková krehkosť. [10]

2.1.4 Ostatné povrchové úpravy

Eloxovanie

Elektrolytický proces pasivácie, ktorý vytvorí tenkú priehľadnú vrstvu oxidu, ktorá chráni kovový substrát. Eloxovanie modifikuje povrch kovu tak, že vytvorí dekoračnú, trvanlivú a odolnú povrchovú úpravu voči korózii a opotrebeniu. Na rozdiel od pokovovania alebo potažovania, oxidová úprava sa stáva integrovanou s kovovým podkladom, takže sa nedá ošúpať ani odlúpiť a minimálne mení rozmerové aspekty súčasti. Fyzikálne vlastnosti tejto vrstvy oxidu tiež poskytujú vynikajúcu príľnavosť pre sekundárne procesy ako napr. farbenie.

Pojem *anodizácia* opisuje proces, ktorým kovová časť tvorí anódu elektrického obvodu ponoreného do elektrolytického kúpeľa. Prúd uvoľní vodík na katódu (zápornú elektródu) a kyslík na povrch hliníkovej anódy - tvorenej z oxidu hlinitého.

Kadmiovanie

Kadmiové pokovovanie poskytuje vynikajúcu odolnosť voči korózii aj v nepriaznivom prostredí (napr. soľné prostredie). To poskytuje dobrú základňu pre farby vďaka vynikajúcim vlastnostiam priľnavosti laku a je odolnejšia voči odlupovaniu ako zinkové pokovovanie. Kadmium je tiež vynikajúce na pokovovanie nehrdzavejúcej ocele a hliníka na zabránenie galvanickej korózie. Kadmiové pokovovanie je vo všeobecnosti jasne striebrobieleho vzhľadu. Ďalšie ošetrovanie môže vytvoriť dúhovú, čiernu, zlatú, jantárovú alebo olivovú farbu a zvýšiť odolnosť voči korózii.

Chrómovanie

Chróm sa používa pri pokovovaní spojovacích prvkov predovšetkým na estetické účely. Poskytuje porovnateľnú odolnosť proti korózii ako zinkové pokovovanie, ale za oveľa vyššie náklady. Ak je potrebná väčšia odolnosť voči korózii, nehrdzavejúca oceľ môže byť pochrómovaná, zabraňujúc akejkoľvek korózii, ak by bola poškodená chrómová vrstva.

Konverzný povlak

Konverzné povlaky sa vzťahujú na povlaky vytvorené chemickou zmenou povrchu kovového substrátu. Naproti pokovovaniu, čo je nanášanie povlaku, ktorý sa viaže na kovový substrát a chemicky s ním nereaguje. [10]

Niklovanie

V závislosti od použitého procesu a zamýšľanej aplikácie, môže byť nikel nanášaný ako mäkký alebo tvrdý, matný alebo svetlý. Niklovanie sa často používa na dekoratívnu úpravu. Svetlé pokovovanie niklom je vysoko reflexná úprava podobná nehrdzavejúcej oceli, ale je veľmi tvrdá s relatívne nízkou ťažnosťou. Z tohto dôvodu by mali byť diely vytvarované do konečného tvaru predtým, než je aplikované svetlé niklovanie. Mäkké niklovanie (polosvetlý alebo matný nikel) má hladší povrch než jasný nikel a je viac tvárnejší. Súčiastky, ktoré môžu byť vystavené tepelnému šoku alebo menšiemu ohýbaniu, by mali byť pokovované mäkkým niklom, aby sa znížila možnosť ošupovania alebo odlupovania.

Pasivácia

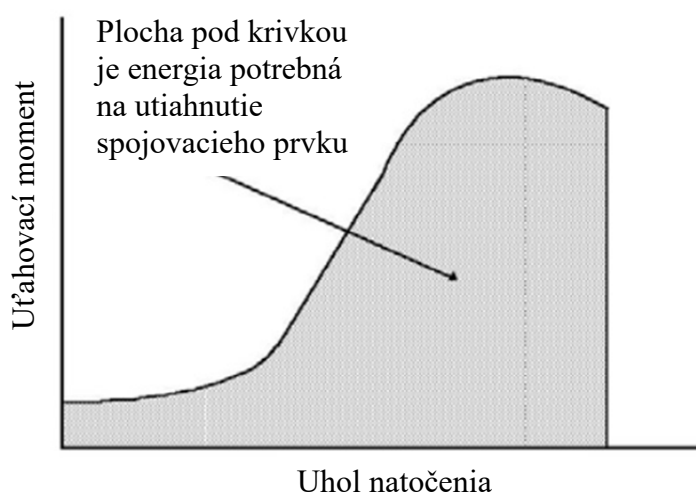
Pasivácia je proces, pri ktorom sa z povrchu nehrdzavejúcej ocele odstráni exogénne železo alebo zlúčeniny železa pomocou chemického rozpúšťania. To sa dosiahne úpravou kovu roztokom kyseliny, ktorý odstraňuje akékoľvek povrchové nečistoty ale neovplyvní samotnú nehrdzavejúcu oceľ. Tieto nečistoty sú potenciálne miesta korózie ktoré majú za následok predčasnú koróziu a ak nie sú odstránené, spôsobia v konečnom dôsledku zlyhanie súčasti. Navyše, proces pasivácie uľahčuje tvorbu tenkého priehľadného oxidačného filmu, ktorý chráni nehrdzavejúcu oceľ pred koróziou. [10]

2.2 Problematika uťahovania skrutiek

Spôsob uťahovania závitových zostáv upevnenia, najmä pre kritické skrutkové spoje, zahŕňa kontrolu uťahovacieho momentu a uhla otáčania, aby sa dosiahol požadovaný výsledok správneho predpätia skrutky. Pochopenie úlohy trenia v oblastiach pod hlavou skrutky a závitovým kontaktom je kľúčom k definovaniu vzťahu medzi uťahovacím momentom, uhlom a napätím. Pri uťahovaní môže byť až 200 faktorov ovplyvňujúcich napätie vytvorené v skrutke pomocou uťahovacieho momentu. Spojením kriviek uťahovacieho momentu v závislosti na uhle otočenia s niekoľkými jednoduchými výpočtami a základným chápaním technickej mechaniky závitových spojovacích prvkov, môžeme získať praktické informácie potrebné na hodnotenie charakteristiky jednotlivých procesov uťahovania upevňovacích prvkov. [11]

2.2.1 Prenos energie

Uťahnutie závitových spojovacích prvkov je v podstate proces prenosu energie, ako je znázornené na Obrázok 6. Plocha pod krivkou uťahovacieho momentu je úmerná energii potrebnej na utiahnutie skrutkového spoja.



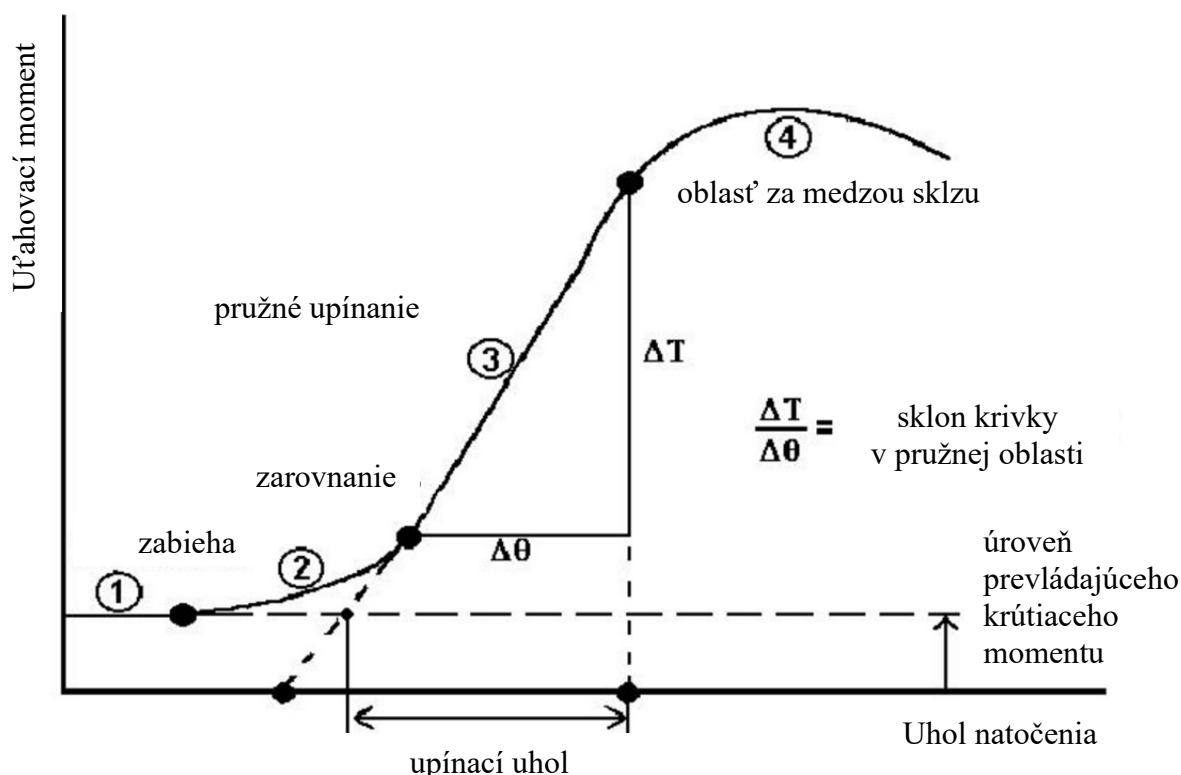
Obrázok 6. Závislosť krútiaceho momentu na uhle otočenia skrutkového spoja [11].

2.2.2 Modelovanie procesu uťahovania

Dosiahnutie riadnej kontroly procesu uťahovania je možné iba vtedy, ak porozumieme vzťahu medzi uťahovacím momentom a otáčaním s rastom napätia. Pred štúdiom metód uťahovania je potrebné zoznámiť sa s tým, čo sa skutočne stane, keď je spojovací materiál utiahnutý. Proces uťahovania zahŕňa otáčanie, posun skrutky, zvyšovanie točivého momentu, takže sa v skrutke vytvára napätie. Požadovaný výsledok je upínacia sila v osi spojovacieho materiálu.

Všeobecný model závislosti ťahovacieho momentu na uhle otočenia pre spojovací materiál má 4 odlišné zóny znázornené na Obrázok 7:

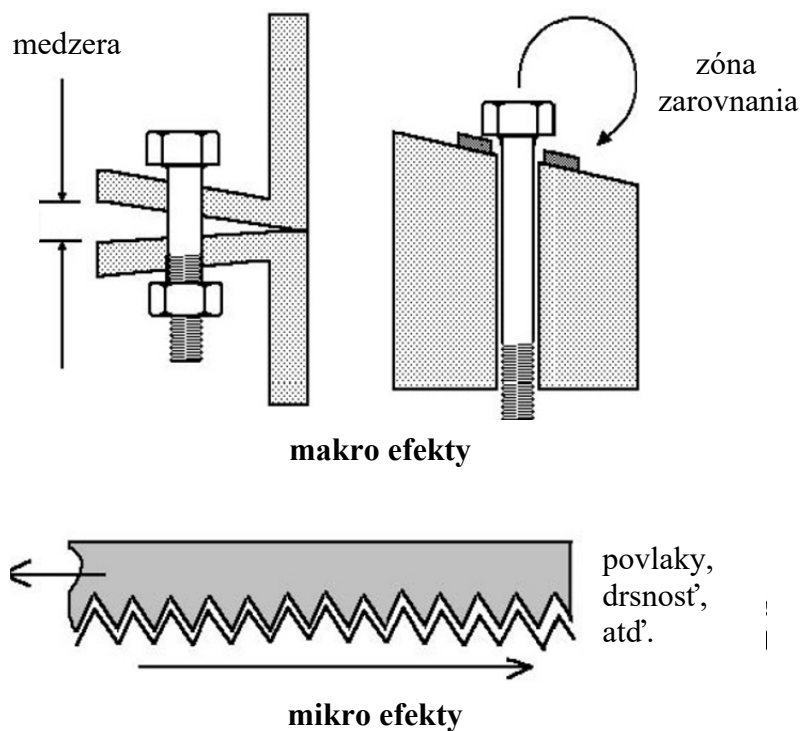
- Prvá zóna je zabíhanie alebo zóna prevládajúceho ťahovacieho momentu, ktorá sa objaví predtým ako sa hlava skrutky alebo matica dotkne povrchu časti so závitom.
- Druhá zóna je zarovnanie alebo zóna priliehavosti, kde sú spojovací prvok a dosadacia plocha zarovnané a dosiahnu tesné spojenie.
- Tretia zóna je pružný rozsah upínania, kde je sklon krivky závislosti ťahovacieho momentu na uhle otočenia konštantný.
- Štvrtá zóna je oblasť za medzou sklzu, ktorá začína za inflexným bodom na konci elastickej zóny. [11]



Obrázok 7. Model závislosti krútiaceho momentu na uhle otočenia so 4 odlišnými zónami chovania [11].

Vo zvláštnom prípade, kde sa používa funkcia zamykania pomocou prevládajúceho ťahovacieho momentu napr. poistná matica, model obsahuje dodatočnú zónu prevládajúceho ťahovacieho momentu. Vo všeobecnejšom zmysle môže byť prevládajúci ťahovací moment výsledkom trenia na drieku skrutky alebo v závitoch v dôsledku nesprávneho zarovnania častí, cudzích materiálov v závitoch alebo v dôsledku závitov s nesprávnou toleranciou.

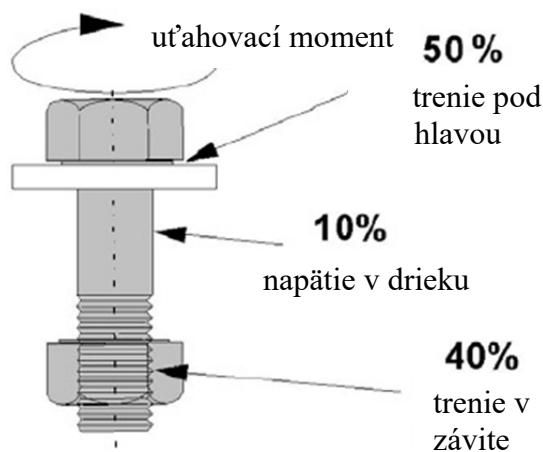
Nelineárna zóna zarovnania je komplexný proces pozostávajúci zo spojenia závitov, ohýbania spojovacích prvkov a styčných plôch ako výsledok nerovnobežnosti hlavy spojovacieho materiálu a dosadacej plochy. Tieto faktory nazývame aj ako makro efekty. Zóna zarovnania má taktiež to, čo označujeme ako mikro efekty. Medzi mikro efekty patrí kontakt poruchy napätia pokovovania a povlakov, ako aj deformácie povrchu a závitu. Tieto účinky sú ilustrované na Obrázok 8.



Obrázok 8. Zobrazenie makro a mikro efektov v 2. zóne uťahovania spojovacieho prvku [11].

2.2.3 Rozdelenie uťahovacieho momentu

Základné rozdelenie uťahovacieho momentu pre spojovací materiál je znázornené na Obrázok 9. Uťahovací moment pôsobiaci na spojovací materiál je možné rozdeliť do troch hlavných oblastí.

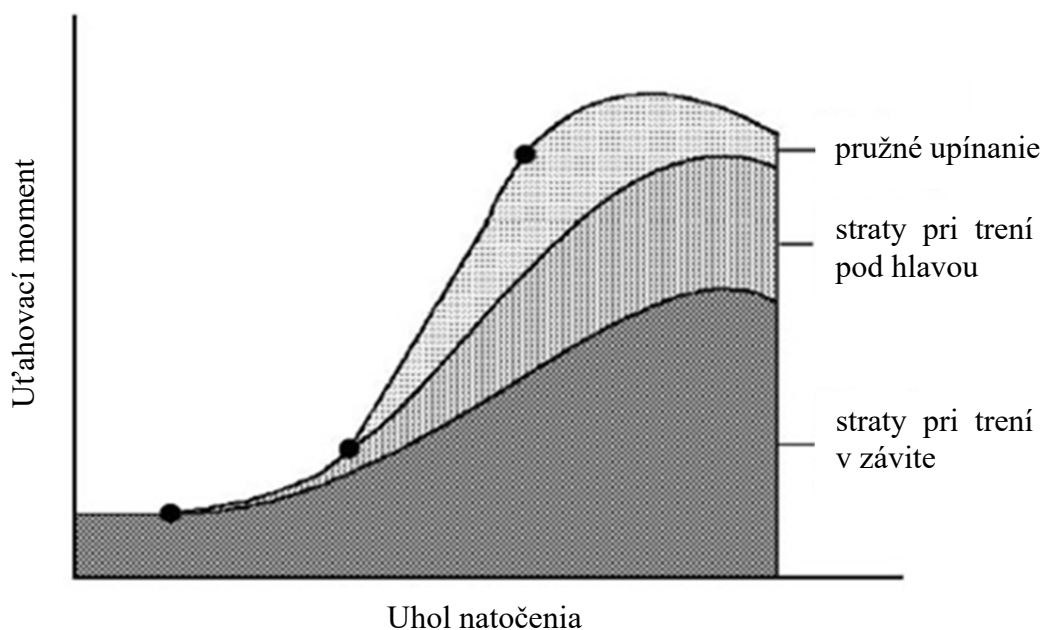


Obrázok 9. Popis rozdelenia celkového krútiaceho momentu v spojovacom prvku [11].

Prvá oblasť je trenie pod hlavou skrutky, ktoré dokáže absorbovať až 50% z celkového uťahovacieho momentu. Trenie v závite môže absorbovať až 40% z uťahovacieho momentu.

Zvyšných 10% z použitého ťahovacieho momentu vytvára upínaciu silu, ktorá drží komponenty vcelku. Ak sa teda zvýši trecia zložka v ktorejkoľvek časti o 5%, tak celkové napätie sa zmenší o polovicu.

Ako bolo uvedené vyššie, oblasť v grafe pod krivkou závislosti ťahovacieho momentu na uhle otočenia predstavuje celkovú energiu potrebnú na utiahnutie spojovacieho prvku. Ako je zobrazené na Obrázok 10, horných 10% plochy pod krivkou predstavuje pružnú upínaciu energiu, ktorá tvorí upínaciu silu držiacu komponenty spolu.



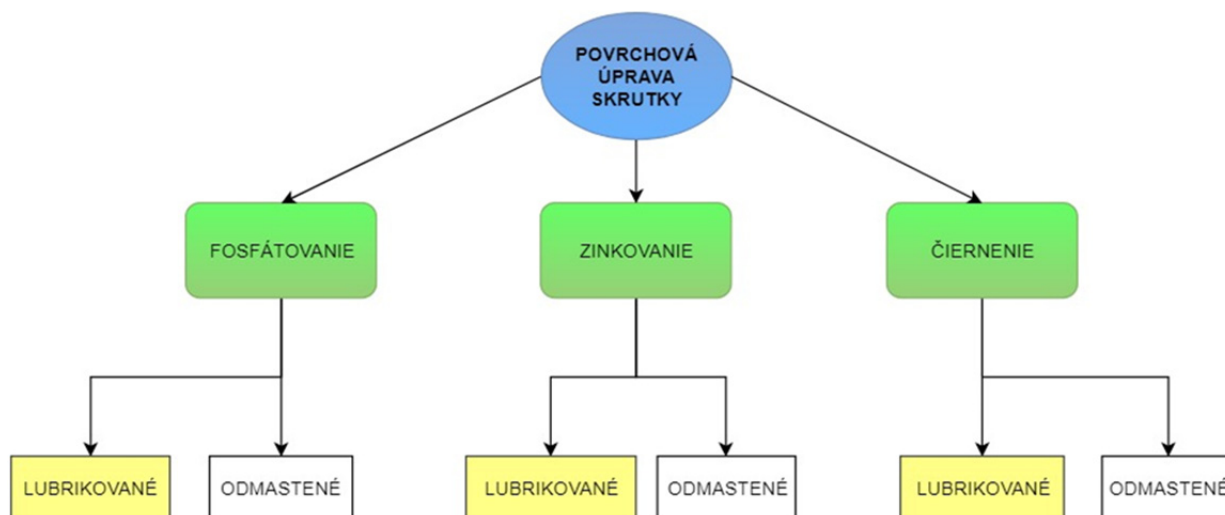
Obrázok 10. Grafické zobrazenie rozdelenia krútiaceho momentu v závislosti na uhle na otočenia [11].

3. Experimentálne testovanie skrutkového spoja

V tejto kapitole bude prezentované experimentálne meranie skrutkových spojov všetkých kombinácií povrchových úprav a čistoty s opisom princípu merania, použitých nástrojov a fotografickou dokumentáciou. V závere tejto kapitoly budú znázornené grafy zo záznamu merania pre lepšiu predstavu chovania danej súčiastky a slúžiaci ako podklad k vyhodnoteniu meraní.

3.1 Postup prípravy

Existuje 6 kombinácií skrutiek, ktoré boli testované a ich prehľad je zobrazený na Obrázok 11. Všetky kombinácie boli testované pomocou rovnakých zariadení pre zaručenie rovnakých podmienok. Z každej kombinácie bolo zmeraných minimálne 6 vzoriek. Všetky skrutky a podložky boli pôvodne lubrikované výrobcom kvôli zamedzeniu hrdzavenia pri preprave. Všetky podložky sú chemicky čiernené. Následne bola polovica z každej meranej skupiny ponorená do isopropanolu na 15 minút a jemne očistená priemyselnou utierkou nezanechávajúcou vlákna.



Obrázok 11. Prehľad testovaných kombinácií skrutiek v daných povrchových úpravách.

3.2 Postup merania

Skrutka s podložkou je upnutá v hriadeli, na ktorom je osadené radiálne ložisko, pomocou mechanického momentového kľúča momentom $M_{nom}=12Nm$. Hriadeľ je následne upevnený vo zveráku. Testovacia zostava je zobrazená na Obrázok 12. Meranie prebieha pomocou modulového kľúča STwrench, ktorý pomocou viacerých senzorov dokáže zaznamenať množstvo veličín, podľa ktorých budeme dané kombinácie skrutiek hodnotiť. Na Obrázok 13 je prehľadne zobrazený postup merania.



a)



b)

Obrázok 12. Testovacia zostava pred meraním: a) Prípravok s ložiskom; b) Použité nástroje a testované skrutky s podložkami.



a)



b)

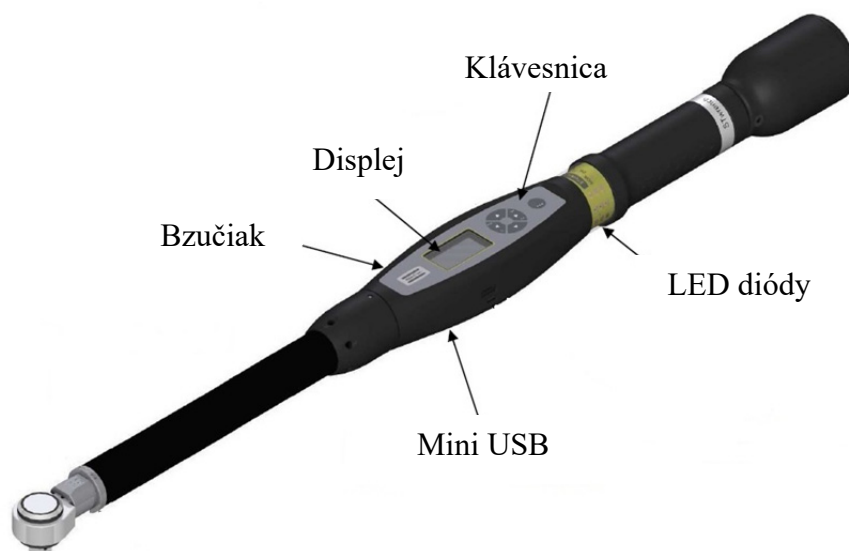


c)

Obrázok 13. Postup merania: a) voľné dotiahnutie skrutky s podložkou; b) dotiahnutie skrutky momentovým kľúčom na 12Nm; c) preťažovanie skrutky kľúčom STwrench so záznamom dát až do jej lomu.

3.3 Meracie zariadenie

Kľúč STwrench je modulový momentový kľúč, ktorý je vybavený gyroskopom spolu s viacerými senzormi, vlastným softvérom pre výpočet a vykreslenie kriviek a rôznymi nastavcami pre široké použitie v oblasti presného uťahovania skrutiek. Vzhľad so základným opisom funkčných častí kľúča môžeme vidieť na Obrázok 14.

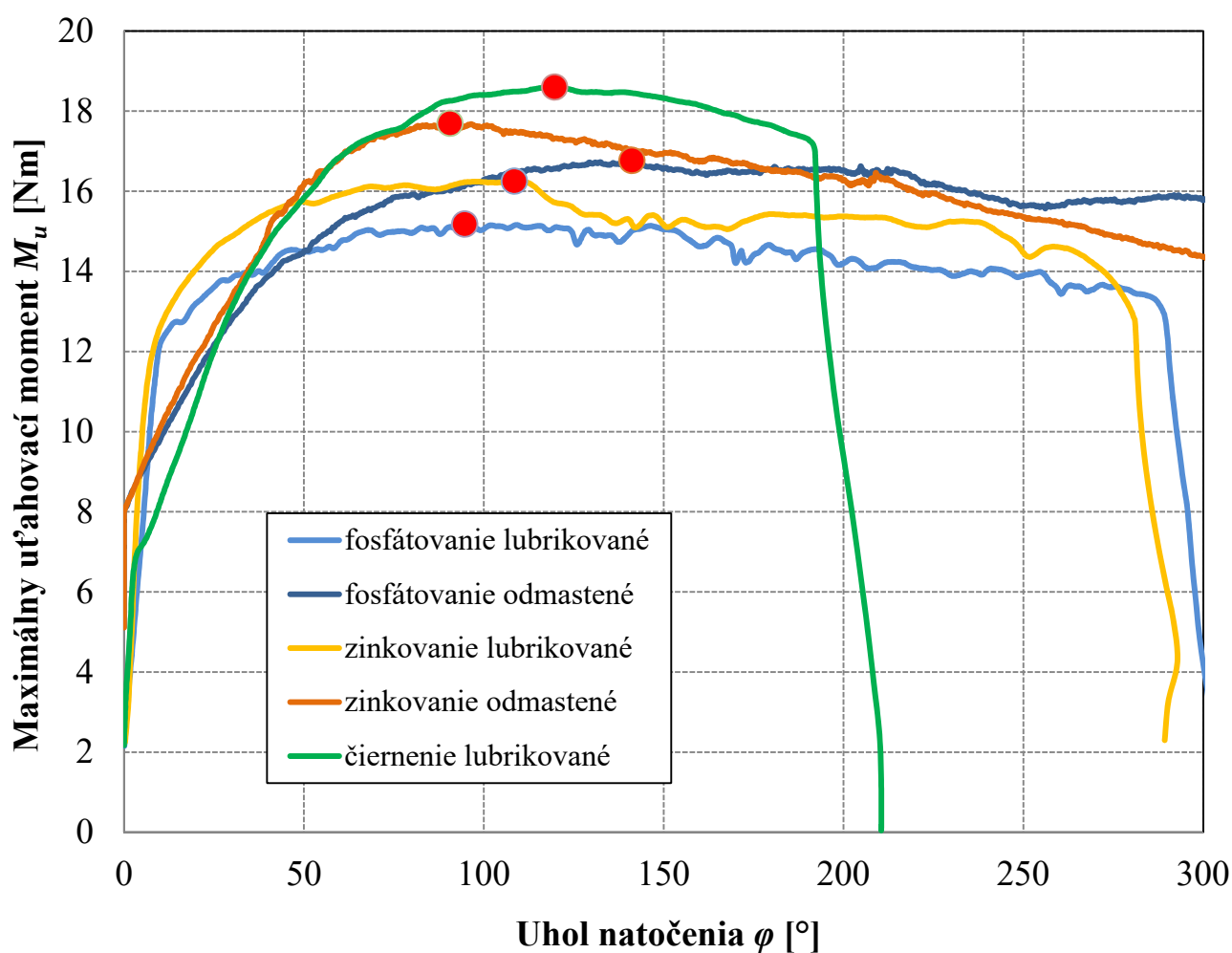


Obrázok 14. Modulový kľúč STwrench použitý k preťaženiu a záznamu chovania skrutiek [12].

Použitý kľúč má vďaka množstvu senzorov a priloženému softvéru širokú škálu predprogramovaných módov merania. V našom prípade bol použitý mód s názvom *Residual torque/angle*. V tomto nastavení meria kľúč závislosť uťahovacieho momentu na uhle otočenia spolu s vyznačením zvyškového uťahovacieho momentu. Pri vykresľovaní záťažovej krivky je možnosť zobrazit' maximálny uťahovací moment, ktorý je pre naše testovanie kľúčový z hľadiska porovnania s analytickou časťou tejto práce. Priebežné hodnoty merania sú prehľadne zobrazované na displeji kľúča, ktorý je zobrazený na Obrázok 15.



Obrázok 15. Displej kľúča STwrench zobrazujúci základné informácie pri meraní [12].



Obrázok 16. Experimentálne namerané priebehy ťahovacích momentov porovnávaných skrutiek s rôznou povrchovou úpravou. Červené body vyznačujú maximum ťahovacieho momentu.

Na Obrázok 16 je vykreslená závislosť ťahovacieho momentu na uhle natočenia pre 5 skrutiek reprezentujúcich všetky povrchové úpravy. Okamihy maximálneho ťahovacieho momentu sú vyznačené červenými bodkami na zaťažujúcich krivkách. V tomto okamihu dochádza v skrutke k už výrazným plastickým deformáciám. Pri bližšom pohľade na graf môžeme vidieť vysokú presnosť daného merania aj na rozdielnom tvare kriviek lubrikovaných a odmastených skrutiek, kde lubrikované skrutky majú hladšie krivky. Tento fakt je spôsobený vysokým vzorkovaním meracieho zariadenia, ktoré je až 100 Hz.

Na nasledujúcom Obrázok 17 môžeme vidieť detail skrutky s podložkou po zaťažení v povrchovej úprave fosfátovanie. Pri všetkých testovaných skrutkách došlo k lomu medzi prvým a tretím závitom, bez ohľadu na povrchovú úpravu alebo čistotu.



Obrázok 17. Skrutka s podložkou po zaťažení.

3.4 Výsledky meraní

Výsledné namerané hodnoty maximálneho ťahovacieho momentu spolu s uhlami natočenia kľúča, pri ktorom došlo k lomu skrutky, sú uvedené v Tabuľka 1. Výsledky sú uvedené so smerodajnou odchýlkou pre lepšiu predstavu o rozložení nameraných veličín.

Tabuľka 1. Hodnoty ťahovacích momentov a natočení skrutiek pre rôzne povrchové úpravy.

Povrchová úprava	Maximálny ťahovací moment M_u [Nm]		Uhol natočenia pri lome ϕ [°]	
	lubrikované	odmastené	lubrikované	odmastené
fosfátovanie	$15,66 \pm 0,96$	$16,41 \pm 0,52$	278 ± 101	232 ± 54
zinkovanie	$16,24 \pm 1,14$	$17,93 \pm 0,35$	217 ± 79	98 ± 12
čiernenie	$18,25 \pm 0,68$	> 25	77 ± 17	-

Experimentálne meranie splňa predpoklad, kde pri odmastenej variante skrutky je vyšší maximálny ťahovací moment. Tento jav je spôsobený vyšším trením pod hlavou skrutky a v závite, kde je ťahovací moment absorbovaný takmer z 90% z celkového ťahovacieho momentu. Bližšie bol tento jav vysvetlený v podkapitole 2.2.3 Rozdelenie ťahovacieho momentu.

Taktiež môžeme konštatovať, že pri lubrikovanej variante skrutky je vyšší uhol otočenia pri lome. Tento jav je spôsobený väčšou zónou priliehavosti, kde sú spojovací prvok

a dosadacia plocha zarovnané a dosiahnu tesné spojenie, z dôvodu nižšieho trenia (viď podkapitola 2.2.2 Modelovanie procesu uťahovania).

Pri meraní varianty odmastenej skrutky v povrchovej úprave černenie, kde bol predpoklad najvyššieho uťahovacieho momentu zo všetkých kombinácií, sa pri prvom meraní zlomil inbusový bit pri hodnote $\pm 21\text{Nm}$ - viď Obrázok 18a). Pri druhom a treťom pokuse sa drážka skrutky zdeformovala bez toho aby došlo k jej lomu pri hodnote $\pm 25\text{Nm}$ - viď Obrázok 18b). Uvedené hodnoty sú orientačné, pretože boli odčítané priamo pri meraní. Keďže softvér v kľúči STwrench vyhodnotil dané meranie ako chybné, nebolo možné získať presnú hodnotu. Odhliadnuc od tohto faktu, pri testovaných skrutkách nedošlo k medznému stavu porušenia pri tak vysokej hodnote uťahovacieho momentu, ktorá je viac ako dvojnásobok požadovanej hodnoty pri montáži vývevy.



a)



b)

Obrázok 18. Testovanie čiernej skrutky: a) zdeformované drážky pri testovaní čiernej, odmastenej skrutky (predpoklad najvyššej hodnoty krútiaceho momentu); b) poškodený bit pri testovaní čiernej, odmastenej skrutky.

Z prevedených experimentálnych meraní sa javí ako najvhodnejšia pre danú aplikáciu (z hľadiska mechanických vlastností) černená skrutka v odmastenom stave. Oproti ostatným kombináciám sa vyznačuje najvyššou pevnosťou a nízkou húževnatosťou. V očistenom stave navyše nie je riziko kontaminácie vákuového priestoru pri montáži vývev, čo hrá významnú úlohu pri našom rozhodovaní. Jediná nevýhoda tohto riešenia oproti zvyšným alternatívam je minimálna ochrana voči korózii. Pri fosfátovaní a zinkovaní sa vysokou teplotou zhoršujú mechanické vlastnosti materiálu a následný proces, ktorý by zvrátil tieto negatívne účinky, dodávateľ nie je schopný garantovať vo výrobe. Keďže černenie je iba chemický proces, ktorý nezasahuje do mechanických vlastností materiálu, môžeme predpokladať vyššiu spoľahlivosť a stálosť pri zavedení do trvalej výroby. Túto domnienku podporujú aj veľmi nízke hodnoty smerodajných odchýlok pri oboch meraných veličinách. Vyššie zmienené faktory výrazne prevažujú nad negatívom nízkej odolnosti voči korózii, preto je táto voľba najpriateľnejšia.

4. Analytický výpočet skrutkového spoja

4.1 Výpočtový model pre výpočet maximálneho ťahovacieho momentu

V nasledujúcej kapitole budeme vychádzať zo vzťahu, kde celkový ťahovací moment, ktorý pôsobí na skrutku je možné rozdeliť na 3 zložky:

- trecí moment medzi hlavou skrutky a podložkou
- trecí moment v závite
- moment prevedený na osovú silu v drieku skrutky

Teda môžeme napísať základnú rovnicu: $M_u = M_1 + M_2 + M_3$. Ďalej budeme používať symboly z kapitoly Použité veličiny, kde je ich detailný popis.

Výpočtový model pre určenie ťahovacieho momentu sa skladá z nasledujúcich rovníc:

- prvá momentová zložka
$$M_1 = F_O \cdot f_3 \cdot \frac{D}{2} \quad (1)$$

- druhá momentová zložka
$$M_2 = F_O \cdot \frac{f_2}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \cdot \frac{d_2}{2} \quad (2)$$

- efektívny súčiniteľ trenia
$$f_{ef} = \left(\frac{f_2}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right) \quad (3)$$

- trecí uhol
$$\vartheta = \tan^{-1}(f_{ef}) \quad (4)$$

- tretia momentová zložka
$$M_3 = F_O \cdot \tan(\beta) \cdot \frac{d_2}{2} \quad (5)$$

- uhol stúpania závitu
$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{p}{\pi \cdot d_2}\right) \quad (6)$$

- celkový ťahovací moment
$$M_u = F_O \cdot \left(f_3 \cdot \frac{D}{2} + \tan(\vartheta + \beta) \cdot \frac{d_2}{2} \right) \quad (7)$$

Keďže vo všetkých prípadoch porovnávame skrutku jednej veľkosti a rovnakej pevnostnej triedy, jediné premenné budú pre nás súčinitele šmykového trenia. Pre každý typ povrchovej úpravy sa ich intervaly odlišujú a taktiež sa ich hodnoty menia v závislosti či boli skrutky odmastené alebo nie.

Obsah tejto kapitoly spočíva v analytickom výpočte intervalov maximálneho ťahovacieho momentu M_u (7), pri daných povrchových úpravách. Vzhľadom na experimentálnu časť, kde sme merali hodnotu ťahovacieho momentu pri ktorom došlo k medznému stavu pevnosti

skrutky, budeme v tejto kapitole počítat' so silou na medzi pevnosti F_m , ktorá je vypočítaná ako súčin plochy jadra skrutky A_s s medzou pevnosti v ťahu R_m . Túto silu potom dosadíme miesto veličiny F_O vo vzťahoch (1)-(7). Pre výpočty budeme používať mechanické vlastnosti a rozmery skrutky podľa normy ISO 898-1:2009(E) - viď Tabuľka 2.

Tabuľka 2. Charakteristiky analyzovanej skrutky[8].

Priemer skrutky (závit) d [mm]	Plocha jadra A_s [mm ²]	Medza pevnosti R_m [MPa]	Ťahová sila pre dosiahnutie medze pevnosti $F_m (A_s \times R_m)$ [N]
5	14,2	1220	17300

Podstatou tejto časti je ukázať problematickosť analytického riešenia skrutkových spojov. Uťahovací moment prenesený pomocou momentového kľúča na skrutku nezobrazuje jeho skutočné napätie, ktoré musí byť vypočítané pre špecifické podmienky.

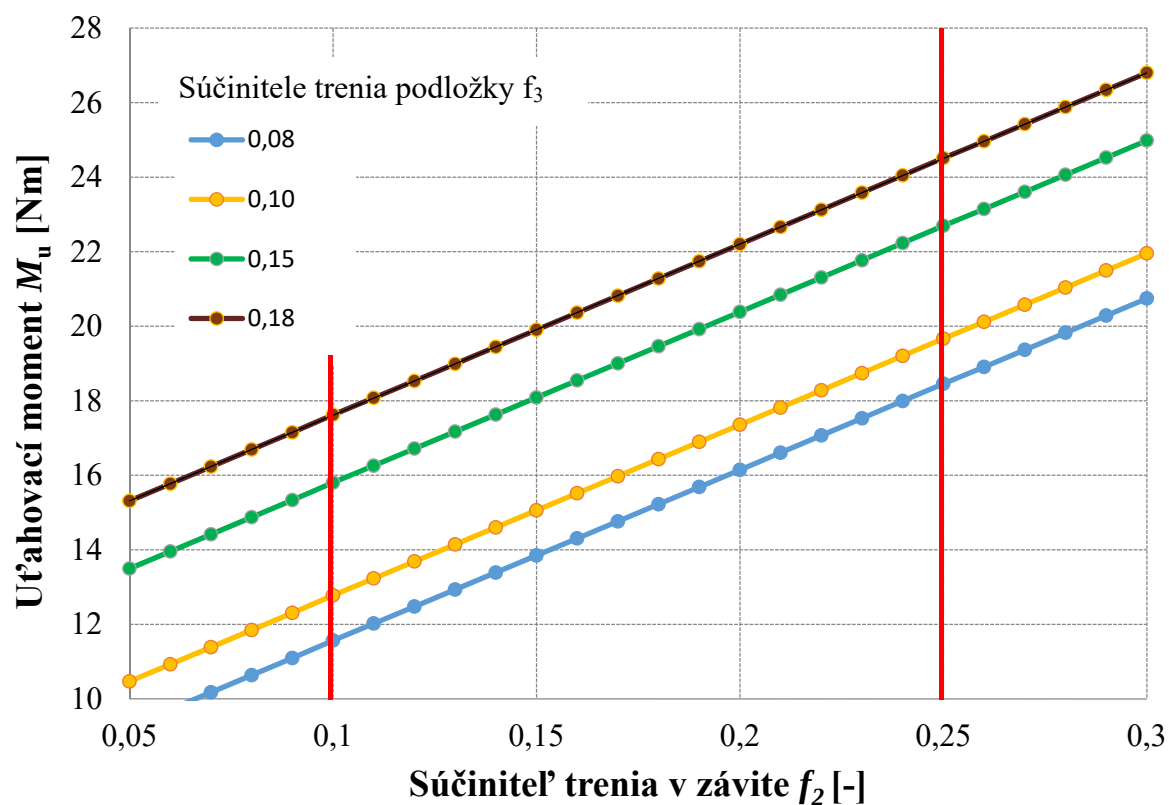
Pre prehľadnosť, vo výpočtoch budeme používať nižšie uvedenú tabuľku (viď Tabuľka 3), ktorá priradzuje súčinitele šmykového trenia k daným povrchovým úpravám a takisto zohľadňuje lubrikovaný/odmastený stav skrutky a podložky, ktorá je v každom prípade čiernená.

Tabuľka 3. Koeficienty trenia v závite a pod podložkou pre rôzne povrchové úpravy [9].

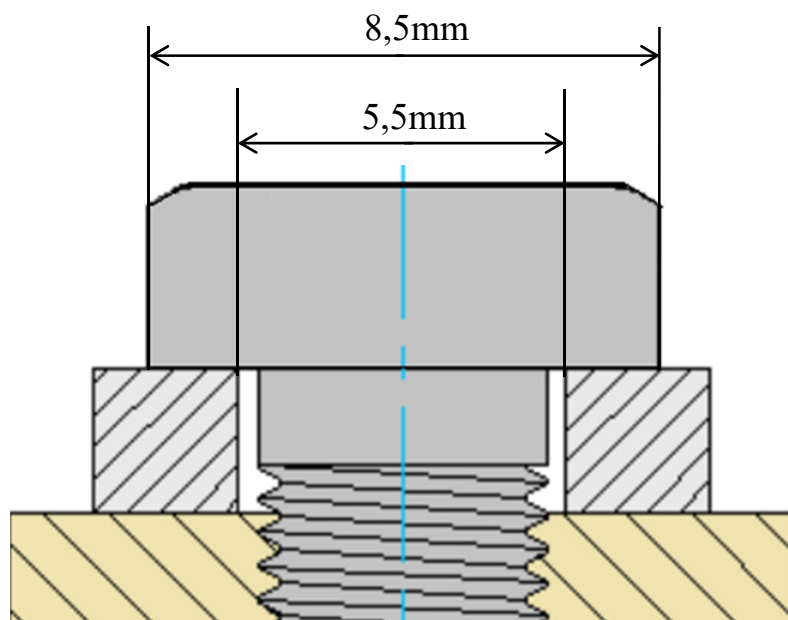
Povrchová úprava	lubrikované				odmastené			
	závit (f_2)		podložka (f_3)		závit (f_2)		podložka (f_3)	
	min	max	min	max	min	max	min	max
fosfátovanie	0,10	0,17	0,08	0,15	0,12	0,18	0,10	0,18
zinkovanie	0,12	0,20	0,08	0,15	0,14	0,23	0,10	0,18
čiernenie	0,10	0,17	0,08	0,15	0,19	0,25	0,10	0,18

S využitím rovníc (1)-(7) a charakteristík uvedených v Tabuľka 2, sa dá spočítať závislosť uťahovacieho momentu na súčiniteľoch trenia (v závite aj pod podložkou), ktorá je ilustrovaná v nasledujúcom Obrázok 19. Z rovnice (1) aj (2) je zrejmé, že závislosť uťahovacieho momentu na uvedených súčiniteľoch je lineárny. Keďže používame podložku len v jednej povrchovej úprave, naša premenná hodnota bola súčiniteľ trenia v závite. Ako fixné hodnoty sme zvolili krajné hodnoty intervalov pre súčinitele trenia pod podložkou. Červené čiary na obrázku ohraničujú náš výpočetný interval súčiniteľov trenia v závite.

Vzhľadom na špecifické rozmery podložky, ktorá je vyrábaná na zákazku, sú na Obrázok 20 zobrazené rozmery, ktoré budú použité vo výpočtoch v nasledujúcej kapitole.



Obrázok 19. Závislosť úťahovacieho momentu na veľkosti súčiniteľa trenia v závite a medzi hlavou skrutky a podložkou s vyznačením intervalu hodnôt uvažovaných v tejto práci pre reálny skrutkový spoj.



Obrázok 20. Zjednodušený rez skrutky s podložkou s okótovanými rozmermi potrebnými pre výpočet prvej momentovej zložky M_1 [13].

4.2 Výpočet maximálneho ťahovacieho momentu pri fosfátovaní

4.2.1 fosfátovanie - lubrikovaná skrutka

Zadanie

$F_O = 17300 \text{ N}$ (sila v skrutke pri dosiahnutí medze pevnosti)

$$\alpha = 60^\circ$$

$$p = 0,8 \text{ mm}$$

$$d_2 = 4,480 \text{ mm}$$

$$d_3 = 4,019 \text{ mm}$$

$$D = 7 \text{ mm}$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{p}{\pi \cdot d_2} \right) = 3,253^\circ$$

Súčinitele šmykového trenia:

- závit $f_{2min} = 0,10$ $f_{2max} = 0,17$
- podložka $f_{3min} = 0,08$ $f_{3max} = 0,15$

Výpočet:

$$f_{efmin} = \left(\frac{f_{2min}}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right) = 0,115$$

$$f_{efmax} = \left(\frac{f_{2max}}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right) = 0,196$$

$$\vartheta_1 = \tan^{-1}(f_{efmin}) = 0,115$$

$$\vartheta_2 = \tan^{-1}(f_{efmax}) = 0,194$$

$$M_{u1} = F_O \cdot \left(f_{3min} \cdot \frac{D}{2} + \tan(\vartheta_1 + \beta) \cdot \frac{d_2}{2} \right)$$

$$M_{u2} = F_O \cdot \left(f_{3max} \cdot \frac{D}{2} + \tan(\vartheta_2 + \beta) \cdot \frac{d_2}{2} \right)$$

$$M_{u1} = 11,57 \text{ Nm}$$

$$M_{u2} = 19,00 \text{ Nm}$$

Interval pre maximálny ťahovací moment [Nm] pre skrutku v povrchovej úprave fosfátovanie - lubrikované je $M_u \in \langle 11,57; 19,00 \rangle$.

4.2.2 fosfátovanie - odmastená skrutka

Súčinitele šmykového trenia:

- závit $f_{2min} = 0,12$ $f_{2max} = 0,18$
- podložka $f_{3min} = 0,10$ $f_{3max} = 0,18$

Výpočet:

$$f_{efmin} = \left(\frac{f_{2min}}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right) = 0,139$$

$$f_{efmax} = \left(\frac{f_{2max}}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right) = 0,208$$

$$\vartheta_1 = \tan^{-1}(f_{efmin}) = 0,138$$

$$\vartheta_2 = \tan^{-1}(f_{efmax}) = 0,205$$

$$M_{u1} = F_O \cdot \left(f_{3min} \cdot \frac{D}{2} + \tan(\vartheta_1 + \beta) \cdot \frac{d_2}{2} \right)$$

$$M_{u2} = F_O \cdot \left(f_{3max} \cdot \frac{D}{2} + \tan(\vartheta_2 + \beta) \cdot \frac{d_2}{2} \right)$$

$$M_{u1} = 13,69 \text{ Nm}$$

$$M_{u2} = 21,28 \text{ Nm}$$

Interval pre maximálny ťahovací moment [Nm] pre skrutku v povrchovej úprave fosfátovanie - odmastené je $M_u \in \langle 13,69; 21,28 \rangle$.

4.3 Výpočet maximálneho ťahovacieho momentu pri zinkovaní

4.3.1 zinkovanie - lubrikovaná skrutka

Zadanie:

$F_O = 17300 \text{ N}$ (sila v skrutke pri dosiahnutí medze pevnosti)

$\alpha = 60^\circ$

$p = 0,8 \text{ mm}$

$d_2 = 4,480 \text{ mm}$

$d_3 = 4,019 \text{ mm}$

$D = 7 \text{ mm}$

$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{p}{\pi \cdot d_2}\right) = 3,253^\circ$

Súčinitele šmykového trenia:

- závit $f_{2min} = 0,12$ $f_{2max} = 0,20$
- podložka $f_{3min} = 0,08$ $f_{3max} = 0,15$

Výpočet:

$$f_{efmin} = \left(\frac{f_{2min}}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}\right) = 0,139$$

$$f_{efmax} = \left(\frac{f_{2max}}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}\right) = 0,231$$

$$\vartheta_1 = \tan^{-1}(f_{efmin}) = 0,138$$

$$\vartheta_2 = \tan^{-1}(f_{efmax}) = 0,227$$

$$M_{u1} = F_O \cdot \left(f_{3min} \cdot \frac{D}{2} + \tan(\vartheta_1 + \beta) \cdot \frac{d_2}{2}\right)$$

$$M_{u2} = F_O \cdot \left(f_{3max} \cdot \frac{D}{2} + \tan(\vartheta_2 + \beta) \cdot \frac{d_2}{2}\right)$$

$$M_{u1} = 12,45 \text{ Nm}$$

$$M_{u2} = 20,38 \text{ Nm}$$

Interval pre maximálny ťahovací moment [Nm] pre skrutku v povrchovej úprave zinkovanie - lubrikované je $M_u \in \langle 12,45; 20,38 \rangle$.

4.3.2 zinkovanie - odmastená skrutka

Súčinitele šmykového trenia:

- závit $f_{2min} = 0,14$ $f_{2max} = 0,23$
- podložka $f_{3min} = 0,10$ $f_{3max} = 0,18$

Výpočet:

$$f_{efmin} = \left(\frac{f_{2min}}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right) = 0,162$$

$$f_{efmax} = \left(\frac{f_{2max}}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right) = 0,266$$

$$\vartheta_1 = \tan^{-1}(f_{efmin}) = 0,16$$

$$\vartheta_2 = \tan^{-1}(f_{efmax}) = 0,26$$

$$M_{u1} = F_O \cdot \left(f_{3min} \cdot \frac{D}{2} + \tan(\vartheta_1 + \beta) \cdot \frac{d_2}{2} \right)$$

$$M_{u2} = F_O \cdot \left(f_{3max} \cdot \frac{D}{2} + \tan(\vartheta_2 + \beta) \cdot \frac{d_2}{2} \right)$$

$$M_{u1} = 14,60 \text{ Nm}$$

$$M_{u2} = 23,59 \text{ Nm}$$

Interval pre maximálny ťahovací moment [Nm] pre skrutku v povrchovej úprave zinkovanie - odmastené je $M_u \in \langle 14,60; 23,59 \rangle$.

4.4 Výpočet maximálneho ťahovacieho momentu pri číernení

4.4.1 číernenie - lubrikovaná skrutka

Zadanie:

$F_O = 17300 \text{ N}$ (sila v skrutke pri dosiahnutí medze pevnosti)

$\alpha = 60^\circ$

$p = 0,8 \text{ mm}$

$d_2 = 4,480 \text{ mm}$

$d_3 = 4,019 \text{ mm}$

$D = 7 \text{ mm}$

$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{p}{\pi \cdot d_2}\right) = 3,253^\circ$

Súčinitele šmykového trenia:

- závit $f_{2min} = 0,10$ $f_{2max} = 0,17$
- podložka $f_{3min} = 0,08$ $f_{3max} = 0,15$

Výpočet:

$$f_{efmin} = \left(\frac{f_{2min}}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}\right) = 0,115$$

$$f_{efmax} = \left(\frac{f_{2max}}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}\right) = 0,196$$

$$\vartheta_1 = \tan^{-1}(f_{efmin}) = 0,115$$

$$\vartheta_2 = \tan^{-1}(f_{efmax}) = 0,194$$

$$M_{u1} = F_O \cdot \left(f_{3min} \cdot \frac{D}{2} + \tan(\vartheta_1 + \beta) \cdot \frac{d_2}{2}\right)$$

$$M_{u2} = F_O \cdot \left(f_{3max} \cdot \frac{D}{2} + \tan(\vartheta_2 + \beta) \cdot \frac{d_2}{2}\right)$$

$$M_{u1} = 11,57 \text{ Nm}$$

$$M_{u2} = 19,00 \text{ Nm}$$

Interval pre maximálny ťahovací moment [Nm] pre skrutku v povrchovej úprave číernenie - lubrikované je $M_u \in \langle 11,57; 19,00 \rangle$.

4.4.2 čiernenie - odmastená skrutka

Zadanie:

$$F_O = 17300 \text{ N}$$

$$\alpha = 60^\circ$$

$$p = 0,8 \text{ mm}$$

$$d_2 = 4,480 \text{ mm}$$

$$d_3 = 4,019 \text{ mm}$$

$$D = 7 \text{ mm}$$

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{p}{\pi \cdot d_2}\right) = 3,253^\circ$$

Súčinitele šmykového trenia:

- závit $f_{2min} = 0,19$

$$f_{2max} = 0,25$$

- podložka $f_{3min} = 0,10$

$$f_{3max} = 0,18$$

Výpočet:

$$f_{efmin} = \left(\frac{f_{2min}}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}\right) = 0,219$$

$$f_{efmax} = \left(\frac{f_{2max}}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}\right) = 0,289$$

$$\vartheta_1 = \tan^{-1}(f_{efmin}) = 0,216$$

$$\vartheta_2 = \tan^{-1}(f_{efmax}) = 0,281$$

$$M_{u1} = F_O \cdot \left(f_{3min} \cdot \frac{D}{2} + \tan(\vartheta_1 + \beta) \cdot \frac{d_2}{2}\right)$$

$$M_{u2} = F_O \cdot \left(f_{3max} \cdot \frac{D}{2} + \tan(\vartheta_2 + \beta) \cdot \frac{d_2}{2}\right)$$

$$M_{u1} = 16,90 \text{ Nm}$$

$$M_{u2} = 24,51 \text{ Nm}$$

Interval pre maximálny ťahovací moment [Nm] pre skrutku v povrchovej úprave čiernenie - lubrikované je $M_u \in \langle 16,90; 24,51 \rangle$.

4.5 Zhrnutie výsledkov analytického modelu

Na základe vypočítaných intervalov (viď Tabuľka 4), môžeme povedať, že čím vyššiu hodnotu majú súčinitele šmykového trenia, tým sa nám zvýši maximálny ťahovací moment na skrutkovom spoji. Zároveň môžeme zhodnotiť, že pri povrchovej úprave zinkovaním dosiahneme takisto vyššie hodnoty ťahovacieho momentu ako pri použití fosfátovaného povrchu. Pri povrchovej úprave čiernením v odmastenom stave dosiahneme celkovo najvyššie hodnoty maximálneho ťahovacieho momentu.

Tabuľka 4. Analyticky vypočítané intervaly maximálneho ťahovacieho momentu potrebného pre dosiahnutie medze pevnosti v ťahu v skrutke pre rôzne povrchové úpravy.

Povrchová úprava	M_u - Maximálny ťahovací moment [Nm]	
	lubrikované	odmastené
fosfátovanie	11,57 - 19,00	13,69 - 21,28
zinkovanie	12,48 - 20,38	14,60 - 23,59
čierne	11,57 - 19,00	16,90 - 24,51

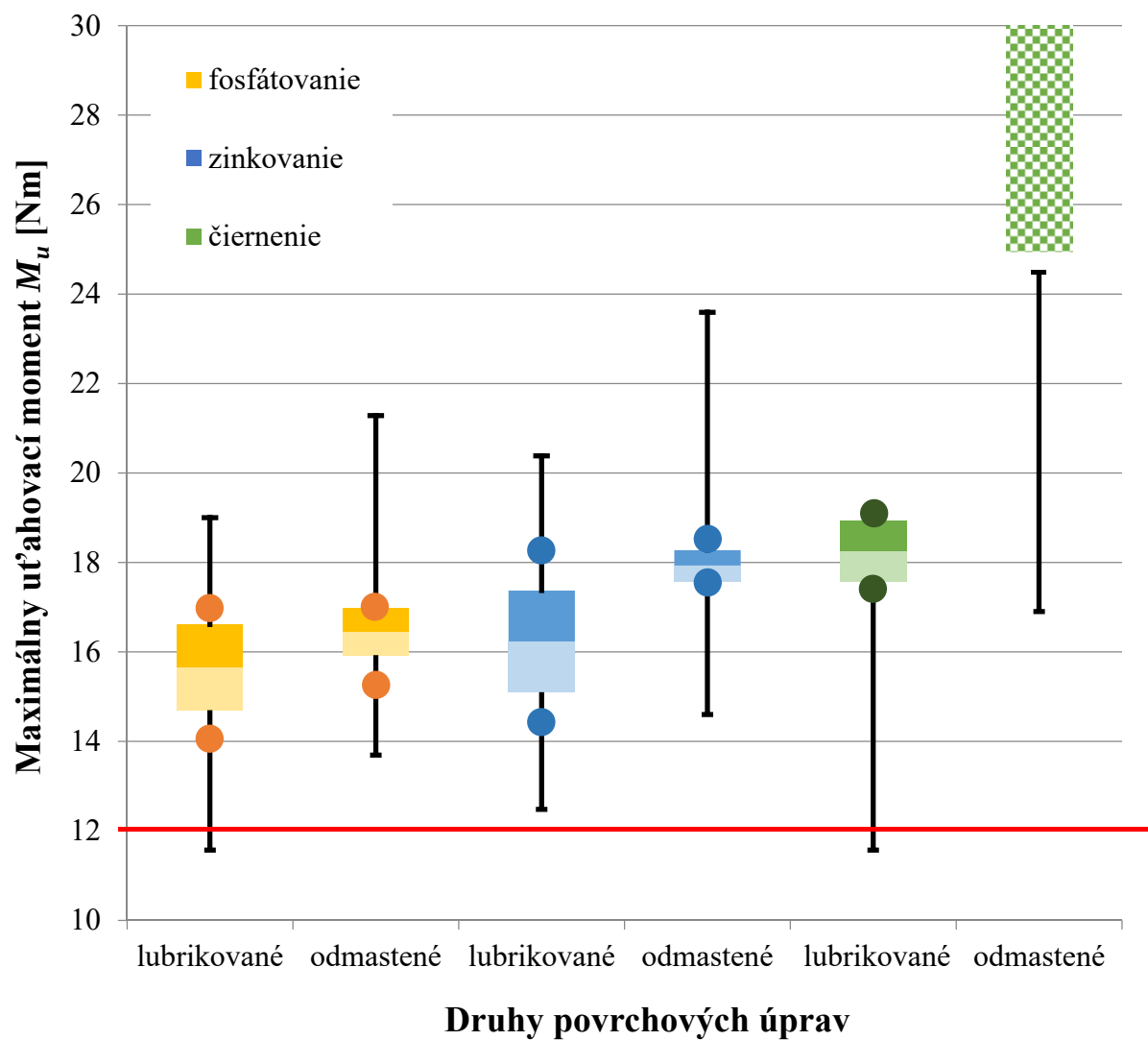
5. Porovnanie výsledkov analytického modelu s experimentom

V tejto kapitole budú graficky porovnané výsledky z analytickej a experimentálnej časti (viď Obrázok 21).

V grafe na horizontálnej osi je zobrazených 6 kombinácií povrchových úprav a čistoty. Všetky povrchové úpravy sú od seba farebne odlišené. Na vertikálnej osi je zobrazená hodnota ťahovacieho momentu. Hodnota 12 Nm je vyznačená červenou farbou a jedná sa o veľkosť ťahovacieho momentu pri montáži. Maximálny možný ťahovací moment skrutky sa teda musí vždy nachádzať nad touto hodnotou, aby bola zaistená bezpečnosť voči porušeniu skrutky. Analytické riešenie je v grafe zobrazené ako interval hodnôt medzi stopkami, ktoré sú vykreslené čiernou farbou a sú vo zvislej polohe. Experimentálne riešenie je v grafe zobrazené pomocou farebných obdĺžnikov a kruhov. Obdĺžniky sú rozdelené na dve časti. Os symetrie v každom obdĺžniku predstavuje aritmetický priemer a výška menších obdĺžnikov predstavuje hodnotu smerodajnej odchýlky. Farebné kruhy predstavujú minimálne a maximálne hodnoty nameraného ťahovacieho momentu.

Kombinácia odmastenej, čiernej skrutky, ktorá je na grafe prvá sprava, má ako jediná hodnoty experimentálneho merania mimo analyticky nájdený interval maximálneho ťahovacieho momentu. Experimentálne riešenie je zobrazené šrafovanou výplňou, keďže pri meraniach nedošlo k lomu skrutky (bližšie je tento fakt popísaný v podkapitole 3.4 Výsledky meraní), predpokladáme teda vyšší maximálny ťahovací moment ako uvedených 25Nm.

Na základe porovnania výsledkov, kde sa väčšina experimentálne získaných hodnôt nachádza v intervaloch analytického riešenia, môžeme konštatovať, že získané výsledky možno považovať za uspokojivé.



Obrázok 21. Grafické porovnanie analytického a experimentálneho riešenia.

6. Záver

Úlohou tejto bakalárskej práce bolo nájsť optimálnu povrchovú úpravu skrutky, ktorá zaručí bezpečnú funkciu skrutkového spoja (vo vývevách typu nXDS firmy Edwards) ťahovaného momentom mierne vyšším než je ťahovací moment doporučený výrobcom skrutiek.

V experimentálnej časti sa nám podarilo namerať hodnoty maximálneho ťahovacieho momentu (vedúceho k porušeniu skrutiek) pre všetky povrchové úpravy okrem čiernej skrutky v odmastenom stave (u ktorej došlo pred porušením skrutky k porušeniu ťahovacích nástrojov). Každá kombinácia povrchovej úpravy a čistoty skrutky mala minimálne 6 testovaných vzoriek. Na základe veľkých rozdielov maximálnych ťahovacích momentov medzi jednotlivými povrchovými úpravami sme sa rozhodli taktiež pre analytické druh riešenia.

Pri analytickom riešení nášho problému sme boli schopní nájsť hodnoty maximálneho ťahovacieho momentu pre všetky povrchové úpravy. Keďže sme pri výpočtoch použili krajné intervalové hodnoty súčiniteľov trenia v záвите a pod podložkou, ako výstup sme dostali intervaly s veľkým rozptylom minimálnych a maximálnych hodnôt.

Po grafickom vykreslení dát spolu so smerodajnou odchýlkou sme zistili, že experimentálne získané hodnoty maximálnych ťahovacích momentov sú spoľahlivejšie ako analytické, pretože vykazujú výrazne menší rozptyl. Porovnaním oboch prístupov sme teda dospeli k záveru, že pre reálnu aplikáciu bude vhodnejšie využiť výsledky z experimentálnej časti.

Podľa získaných výsledkov by každá kombinácia povrchovej úpravy a čistoty skrutkového spoja (lubrikovaný/odmastený povrch) bola vhodná pre danú aplikáciu. Keďže doporučený moment pre uvažovaný typ skrutky udávaný výrobcom bude prekročený, teda v skrutke pravdepodobne dôjde k medznému stavu pružnosti, potrebujeme nájsť riešenie s čo najvyššou bezpečnosťou voči porušeniu, ak navyše predpokladáme opätovné používanie skrutky.

Na základe získaných poznatkov, predovšetkým z experimentu bola ako najlepší variant zvolená *čiernená, odmastená* skrutka, keďže táto úprava viedla k najvyšším možným ťahovacím momentom. Aj napriek nízkemu počtu experimentálnych meraní a analytickému riešeniu, ktoré sa spolu neprekrývajú, sme boli nadmieru spokojní s hodnotami ťahovacieho momentu, pri ktorých došlo dokonca k zlomeniu inbusového bitu a deformáciám drážok na testovaných skrutkách. Túto skutočnosť si vysvetľujeme vyššou pevnosťou čiernej skrutky, ktorá ako jediná nie je teplotne ovplyvnená pri procese aplikácie povrchovej úpravy. Ak by sme chceli dostať relevantné analytické riešenie, museli by sme prepočítať osovú silu F_m pomocou vyššej medze pevnosti R_m . Keďže pri testovaní sa nám nepodaril docieľiť medzný stav lomu skrutky ako u jedinej kombinácie povrchovej úpravy a čistoty, predpokladáme, že pri rovnakom zaťažení na montážnej linke bude skrutka preukazovať rovnaké chovanie. Toto tvrdenie podporujú aj nízke hodnoty smerodajných odchýlok maximálneho ťahovacieho momentu a uhla natočenia pri lome v prípade lubrikovaného spoja (ktorý sa ako jediný u čiernej varianty podarilo namerať). Jediná nevýhoda nelubrikovanej čiernej varianty skrutkového spoja je nízka odolnosť voči korózii, ktorá je však v porovnaní s vyššie zmienenými pozitívami nepodstatná.

V priebehu písania tejto bakalárskej práce bolo vyššie zmienené riešenie aplikované do procesu výroby a do záveru jej písania nenastal prípad nefunkčnosti skrutkového spoja.

Použitá literatura

- [1] Edwards. *Products*. [online]. [cit: 2018-02-09]. Dostupné na: <https://www.edwardsvacuum.com/nXDS/>.
- [2] Pneumatyka. *Špirální kompresor*. [online]. [cit: 2018-02-12]. Dostupné na: <http://pneumatyka.com/sprezone-powietrze/sprezarka-spiralna/>
- [3] Across International. *Our Products*. [online]. [cit: 2018-02-13]. Dostupné na: <http://www.acrossinternational.com/Ai-CleanVac-51-cfm-Compact-Oil-Free-Dry-Scroll-Pump-w-Fittings-CV5.htm>
- [4] SVOBODA, P. et al. *Základy konstruování*. 3. vyd. Brno : CERM, 2009. 145 s. ISBN 978-80-7204-633-1.
- [5] Provedení šroubového spoje. [online]. [cit: 2018-02-11]. Dostupné na: <http://www.mitcalc.cz/doc/boltcon/help/cz/boltcontxt.htm>.
- [6] OBERG, E. et al. *Machinery's Handbook 28th Edition*, 28. vyd. New York : Industrial Press, 2008. 1428 s. ISBN 978-0-8311-2801-2.
- [7] KALÁB, Květoslav. *Návrh a výpočet dynamicky namáhaného šroubu přírubového spoje*. 2013, s. 11-12. Dostupné na: <https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/347/.content/files/predmety/kal01/prirucka-dynamickysroub.pdf>
- [8] Mechanical properties of fasteners made of carbon steel and alloy steel. ISO 898-1:2009(E)
- [9] Roymech. *Friction coefficient Bolted Joints*. [online]. [cit: 2018-02-18]. Dostupné na: http://www.roymech.co.uk/Useful_Tables/Tribology/co_of_frict.htm
- [10] Aspen Fasteners. *Surface finishing treatments*. [online]. [cit: 2018-02-27]. Dostupné na: http://www.aspenfasteners.com/v/vspfiles/files/docs/all_about_coating.pdf
- [11] PCB Load & Torque, Inc. *Engineering Fundamentals of Threaded Fastener Design and Analysis*. [online]. [cit: 2018-03-11]. Dostupné na: <http://www.hexagon.de/rs/engineering%20fundamentals.pdf>
- [12] EDLO Sales & Engineering. *STwrench User Guide*. [online]. [cit: 2018-04-11]. Dostupné na: http://www.edlosales.com/STwrench%20-%20User%20Manual_2010-05_ENG.pdf
- [13] Valvias. *Metric Thread ISO DIN 13 (M5)*. [online]. [cit: 2018-05-21]. Dostupné na: <http://www.valvias.com/miscellanea-metric-thread-din-13.php?m=5>