



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav konstruování a částí strojů

**Analýza samotvářecích šroubů v plastových
spojích**

**Thread Forming Screws Analysis in Plastic
Joints**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2017

Hynek STEHLÍK

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Vedoucí práce: Ing. Jan Kanaval Ph.D.



PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Analýza samotvářecích šroubů v plastových spojích“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jan Kanavala Ph.D. a literaturu k tomu použitou jsem řádně uvedl v seznamu použité literatury na konci práce.

V Praze dne 28.6.2017

Hynek Stehlík

.....

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu Ing. práce Janu Kanavalovi Ph.D. za ochotu, vstřícnost a pomoc při zpracování této práce.

Dále děkuji Ing. Pavlu Zemanovi, vedoucímu oddělení vývoje R&D firmy Automotive Lighting, že mi ve firmě umožnil stáž, v rámci které jsem se mohl tomuto zajímavému tématu věnovat. Děkuji také Ing. Bohuslavu Lysovi, který mě během stáže prováděl spletitým světem automobilového průmyslu. Děkuji svým kolegům za vřelé přijetí a zejména pak Ing. Lukáši Časarovi za profesionální tvorbu MKP simulací použitých v této práci.

V neposlední řadě děkuji své rodině za podporu ve všem, co dělám.

ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora:	Hynek Stehlík
Název:	Analýza samotvářecích šroubů v plastových spojích
Rok zpracování:	2017
Studijní program:	B2342 Teoretický základ strojního inženýrství
Obor studia:	2301R000 Studijní program je bezoborový
Ústav:	Ústav konstruování a částí strojů
Vedoucí BP:	Ing. Jan Kanaval Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran: 67 Počet obrázků: 57 Počet tabulek: 3 Počet příloh: 3
Anotace:	Tato bakalářská práce zkoumá části momentové charakteristiky samotvářecích šroubů pro použití v automobilovém průmyslu. Rozčleňuje proces šroubování na dílčí fáze (zavedení břitu, šroubování, předepínání) a ty podrobuje bližší analýze. Na základě teoretických poznatků sestavuje první verzi univerzálního vztahu pro výpočet dosedacího momentu, potažmo naznačuje způsob výpočtu celkového utahovacího momentu. Představený analytický model následně porovnává s experimentálním měřením reálných vzorků.
Abstract:	This bachelor thesis investigates parts of torque characteristics of thread forming screws in Automotive industry. It divides the screwing process onto specific phases (thread forming, screwing, thitening) and inspects them with further analysis. On the basis of the theoretical knowledge the first version of universal formula for defining seating torque is designed, in other words it appoints to the way of calculating tightening torque. This presented analytical formula is compared with experimenntaly gathered data of the real samples.
Klíčová slova:	Samotvářecí šrouby, automobilový průmysl, utahovací moment, dosedací moment, analytický model
Keywords:	Thread forming screws, Automotive industry, tightening torque, seating torque, analytical formula

OBSAH

1. Úvod	1
2. Teoretická část	2
2.1. Šroubovice	2
2.2. Tření a třecí síla	2
2.3. Výpočet předepínací síly	3
2.4. Výpočet předepínacího momentu	4
2.5. Definice závit-tvořících šroubů	5
2.5.1. Samořezné šrouby	6
2.5.2. Samotvářecí šrouby	6
2.5.2.1. Typy samotvářecích šroubů	7
2.6. Samotvářecí šrouby v Automotive Lighting	8
2.6.1. Nejčastější problémy	10
2.6.2. Rizikové faktory	11
3. Analýza samotvářecích šroubů	12
3.1. Možnosti přístupu	12
3.1.1. Experimentální přístup – měření průběhu momentu	12
3.1.2. Analytický přístup – výpočet utahovacího momentu	12
3.2. Modelový příklad	13
3.3. Základ pro tvorbu univerzálního vzorce u samotvářecích šroubů	13
3.4. Ideální momentová charakteristika a fáze šroubování	14
3.4.1. Momentové charakteristiky pro dané problémy a detekce chyb	15
3.5. Momentové poměry	16
3.6. Rozklad působících sil	19
3.6.1. Síly ve druhé fázi šroubování	19
3.6.1.1. Radiální tlak z odporu v materiálu – „lokální tlak na břit“	19
3.6.1.2. Radiální tlak z odporu domku – „skořepinový tlak“	24
3.6.2. Rozklad sil v první fázi	27
3.6.2.1. Využití vztahů pro obrábění	27
3.6.2.2. Experiment	28
3.6.2.3. MKP simulace	29
3.6.3. Rozklad sil ve třetí fázi	30
3.6.3.1. Tření pod hlavou	30
3.6.3.2. Tření v závitech od předepínací síly	30
3.7. Návrh výpočtu pro určení došedacího momentu	30
3.8. Pevnostní poměry samotvářecího šroubového spoje	32
3.9. Otláčení pod hlavou	33
3.10. Strhnutí závitu	33
3.11. Podélné prasknutí domku	34
3.12. Ukroucení domku	35
3.13. Namáhání šroubu	36
3.14. Tok materiálu při šroubování	37
3.15. Vliv rychlosti šroubování	38



3.16.	Vlastnosti polykarbonátu	42
3.16.1.	Vlivy na pevnostní vlastnosti polykarbonátu	43
3.16.2.	Vlivy na třecí vlastnosti polykarbonátu	43
3.17.	Experimentální měření.....	44
3.17.1.	Vzorky a použité přístroje	44
3.17.2.	Experiment č. 1.....	45
3.17.3.	Experiment č. 2.....	47
3.18.	Porovnání naměřených a vypočtených hodnot	50
4.	Závěr.....	51
5.	Seznam použitých zdrojů	52
6.	Seznam použitých zkratk a symbolů	54
7.	Seznam obrázků a grafů.....	57
8.	Seznam tabulek.....	59
9.	Seznam příloh	60

1. Úvod

Práce se zabývá problematikou závit tvořících šroubů, které jsou často používaným typem šroubu v automobilovém průmyslu pro spojování plastových komponent. Použití tohoto speciálního typu šroubu je velmi oblíbené zejména pro rychlost montáže. Téma vzniklo ve spolupráci s firmou Automotive Lighting Jihlava, předním výrobcem světlometů automobilů, a týká se právě jedné z fází průběhu utahovacího momentu šroubového spoje.

Díky samotvářecím popřípadě samořezným šroubům vytvářejícím předepjatý spoj odpadá jedna technologická operace ve formě vyřezávání závitů. Tím se podstatně zlevní výroba a cena výsledného produktu. U spojování plastových dílců komponent světlometů pomocí samotvářecích šroubů je používána utahovací strategie na bázi momentu.

Pro návrh šroubového spoje a teoretické ověření způsobilosti spoje je třeba znát hodnoty momentu v celém průběhu šroubování a předepínání spoje (momentová strategie).

Cílem této práce je určit momentové hodnoty spojené s jednotlivými fázemi průběhu utahovacího momentu v čase. Práce se zaměřuje na fázi šroubování, konkrétně na oblast dosednutí hlavy šroubu, včetně experimentálního ověření teoretického výpočtového vztahu na reálných vzorcích. Práce je míněna jako první detailnější náhled do problematiky samotvářecích šroubových spojů.

Oblast metrických šroubů je dostatečně popsána oproti zde zpracovávané problematice samotvářecích šroubů. Zde předestírané úvahy se mohou ukázat jako nekompletní díky existenci celé řady proměnlivých faktorů v dynamickém ději, kterým je samotvářecí šroubový spoj. Ovšem jak píše Douglas Adams, než znát odpověď, je někdy důležitější umět si položit otázku.



Obr. 1. Full LED světlomet Audi A4 s technologií matrix [25]

2. Teoretická část

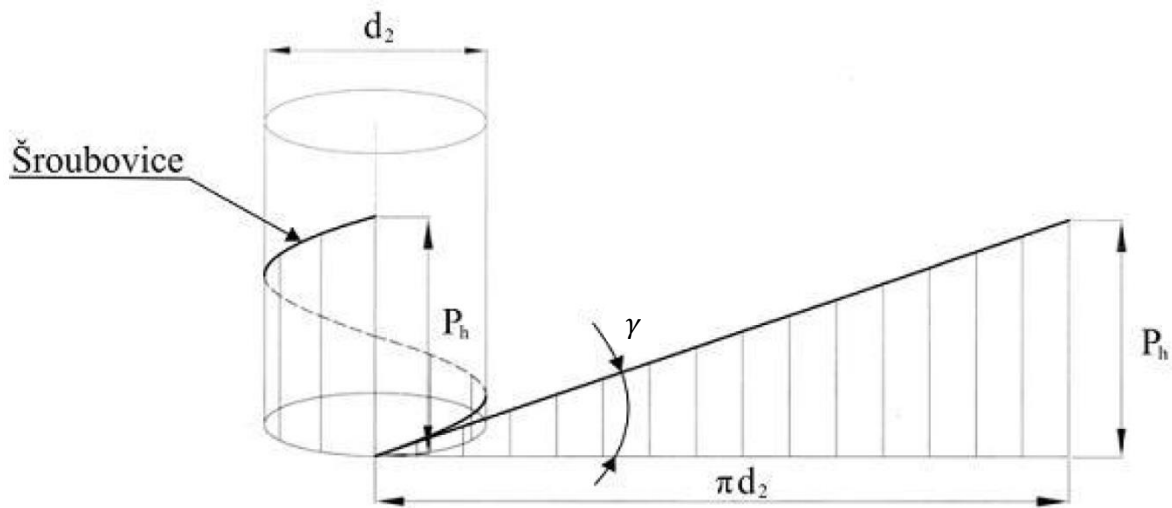
Šroubové spoje můžeme dále rozdělit na spoje s předpětím a spoje bez předpětí. Většina šroubových spojů je konstruována jako spoje s předpětím. Spoje bez předpětí jsou např. pohybové šrouby, které nejsou předmětem této práce [12].

Ze skupiny šroubových spojů s předpětím se budeme věnovat pouze skupině samotvářecích šroubů do plastu. Tyto šrouby pro spojování plastových dílců mají upravené profily a geometrie závitů.

Hlavní charakteristické pojmy související se šrouby, platné jak pro metrické tak pro samotvářecí šrouby jsou uvedeny níže.

2.1. Šroubovice

Jde o klíčovou část šroubu a pochopení její geometrie je bazální pro potřeby této práce.



Obr. 2. Rozvin šroubovice [10]

Samotná délka je pak z Pythagorovi věty podle obrázku:

$$l = n\sqrt{(\pi d_2)^2 + P_h^2} \quad (1)$$

Kde n je počet chodů závitu.

Častěji však v následující práci budeme využívat výraz operující s úhlem γ :

$$l = \pi \cdot d_2 \cdot \cos\gamma \quad (2)$$

2.2. Tření a třecí síla

Třecí síla je odpor ke vzájemnému pohybu dvou objektů. Závisí na normálové (přítláčné) síle a na koeficientu tření.

$$F_t = F_n \cdot f = F_n \cdot \mu \quad (3)$$

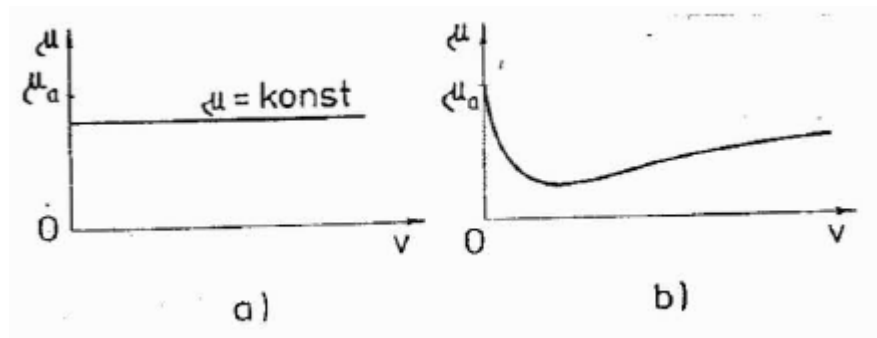
Koeficient tření je tedy poměr přenosu normálové síly na tečnou (třecí sílu) a v ideálním případě záleží na kvalitě povrchu a geometrii dotýkajících se ploch. Ve

skutečnosti je však situace ještě složitější, neboť je ovlivněn vnějšími faktory, jako jsou teplota, vlhkost vzduchu, prach a znečištění materiálu.

Dále pak rozlišujeme mezi součinitelem smykového tření μ a součinitelem adheze μ_a . Součinitel adheze je kromě již zmíněného závislý na čase, během kterého se zatížené kontaktní plochy nepohybovaly. Velikost součinitele tření závisí na době záběhu dotýkajících se ploch a lze ji podstatně ovlivnit i malým množstvím maziva. [17]

Vzhledem k tomu, že součinitel smykového tření závisí na mnoha veličinách, je vytvoření jeho obecného výpočetního modelu velmi obtížné. Nejjednodušší výpočtový model, který budeme používat v případě styku nemazaných stykových ploch, je dán Coulombovým zákonem a předpokládá $\mu = konst.$ (obr. 3. a). U mazaných stykových ploch, u nichž při pohybu mazivo brání jejich dotyku, závisí součinitel smykového tření výrazně na jejich relativní rychlosti (obr. 3. b). [17]

Pochopení jeho fungování je zcela zásadní pro celou problematiku šroubových spojů. Pro účely této práce budeme pracovat se součinitelem tření μ a označovat ho budeme jako f popřípadě f_0 . Věda zkoumající tření se nazývá tribologie.



Obr. 3. Výpočtové modely tření

2.3. Výpočet předepínací síly

Po zatížení statickou provozní silou P dojde k prodloužení šroubu o hodnotu δ a zároveň se spojované součásti o stejnou délku uvolní. Současně s tím vzroste síla ve šroubu z F_i na F_p a síla ve spojovaných součástech klesne z F_i na F_m . Mají-li zůstat spojované součásti za provozu přitlačeny např. z důvodu těsnosti, musí být $F_m > 0$. [12]

ΔF_S ... část provozní síly přenášená šroubem

$F_S = F_{i+} + \Delta F_S$... výsledné silové zatížení šroubu v provozním stavu

$F_P = F_{i-} - \Delta F_P$... výsledné silové zatížení spojovaných součástí v provozním stavu

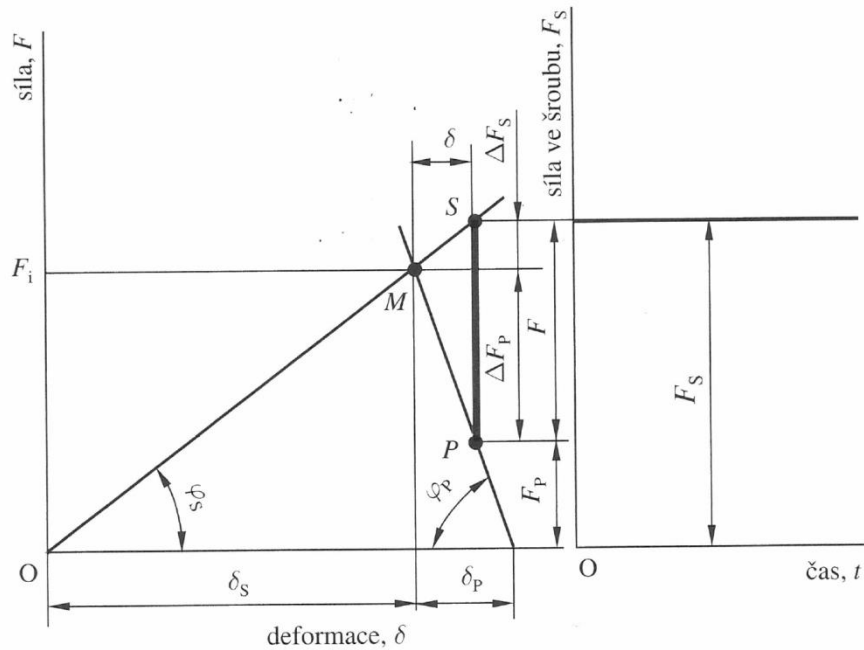
F_i ... síla předpětí

F ... provozní síla

δ_S ... deformace šroubu

δ_P ... deformace spojovaných součástí

ΔF_P ... část provozní síly přenášená spojovanými součástmi



Obr. 4. Provozní diagram předepjatého spoje s konstantní provozní silou [12]

Výsledná síla působící v provozním stavu na šroub:

$$F_S = F_i + \Delta F_S = F_i + CF \quad (4)$$

Kde tuhostní konstanta C

$$C = \frac{k_s}{k_s + k_p} \quad (5)$$

Z toho pak dostaneme výslednou sílu zatížení spojovaných součástí v provozním stavu. [12]

$$F_P = F_i - \Delta F_P = F_i - (1 - C)F \quad (6)$$

2.4. Výpočet předepínacího momentu

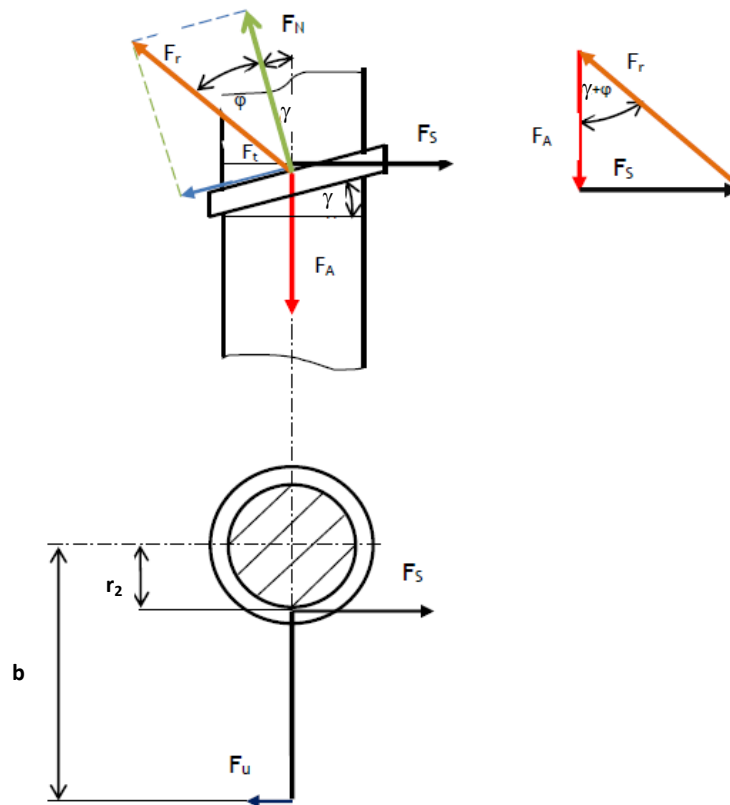
Výpočet předepínacího momentu se u klasických šroubových spojů dělí na dvě části. Podle toho, kde reakce na předepínací moment vzniká, ho rozdělujeme na třecí moment pod hlavou a třecí moment v závitech.

$$M_k = M_{th} + M_{tz} \quad (7)$$

Pro výpočet tření pod hlavou je nutné znát styčnou plochu, což se spočítá jednoduše tak, že se od průměru plochy pod hlavou šroubu odečte plocha díry. Aritmetickým průměrem poloměru díry a poloměru šroubové hlavy získáme rameno, na kterém působí třecí síla a vytváří tak moment tření pod hlavou. [17]

Normálová síla odpovídá síle předepínací.

$$M_{th} = F_0 \cdot f_0 \cdot \frac{(D_h + d_d)}{2} \cdot \frac{1}{2} \quad (8)$$



Obr. 5. Rozklad sil pro známé odvození [14]

Třecí moment vyvolaný v závitech předepínací silou lze získat ze vztahu platného pro pohybové šrouby:

$$M_{tz} = F_o \frac{d_2}{2} \operatorname{tg}(\gamma + \varphi') \quad (9)$$

Kde φ' je třecí úhel a γ úhel stoupání šroubovice a F_o požadovaná předepínací síla. [18]

2.5. Definice závit-tvořících šroubů¹

Závit-tvořící šrouby, jak už plyne z názvu, vytvářejí závit v materiálu, do kterého jsou šroubovány. Mezi jejich hlavní výhody patří rychlost montáže, neboť není potřeba vytvářet závit ve šroubovaném materiálu pomocí další technologické operace, v jiném případě pak odpadá nutnost manipulovat s maticemi. Díky prakticky nulové vůli mezi

¹ Použité termíny jsou pouze pracovní názvy čistě pro potřeby této práce, neboť v česky dostupných materiálech se dá na problematiku zřídka narazit. Autor vycházel především z anglicky psaných materiálů, kde byla řeč o takzvaných self-tapping screws (zde závit-tvořící šrouby), thread forming (samotvářecí šrouby) a thread cutting screws (samořezné šrouby). V češtině se lze setkat i s dalšími výrazy, jako například tvářecí šrouby.

šroubem a materiálem, vzniká dostatečné předejetí. Podle toho, jakým způsobem vytváří daný závit, se dělí na samotvářecí a samořezné. [1]

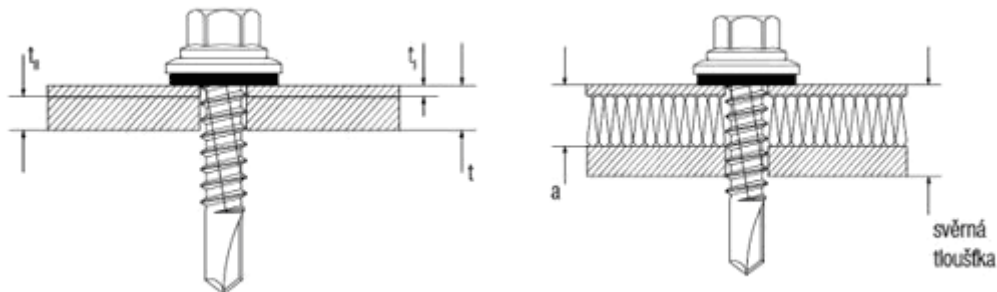
Nejčastěji se závit tvořící šrouby používají v plastech a ve dřevě, ale i v oceli, hliníku, a dalších materiálech. Zajímavostí je použití závit tvořících šroubů ve zdravotnictví, například pro fixování kostních fraktur.

2.5.1. Samořezné šrouby

Tento druh šroubu disponuje ostrými a úzkoprofilovými závity a prostorem pro odřezávané třísky popřípadě spony (vytváří třísku). Díky ostrému závitu a nízkému silovému působení na materiál, není potřeba k zašroubování vyvíjet velký krouticí moment. Z tohoto důvodu jsou samořezné šrouby používány především při aplikacích, kde jsou velká vnitřní napětí nežádoucí, nebo když nasazení samotvářecích šroubů vyžaduje extrémní krouticí momenty. [1]

Z konstrukčního hlediska bývají tyto šrouby často vybaveny zkoseným hrotem s ostrým břitem, díky kterému mohou vrtat zcela. Samotný závit je pak někdy podélně rozdělen, aby jednotlivé segmenty odřezávaly třísku.

Typickým příkladem použití je dřevo, kde by příliš velké napětí vyvolalo trhlinu ve struktuře. Samořezné šrouby do dřeva pak mají kromě již zmíněného často modifikovanou špičku tak, aby se šroub do dřeva lépe dostal a zároveň v něm uvolnil napětí.



Obr. 6. Příklad samořezných šroubů [3]

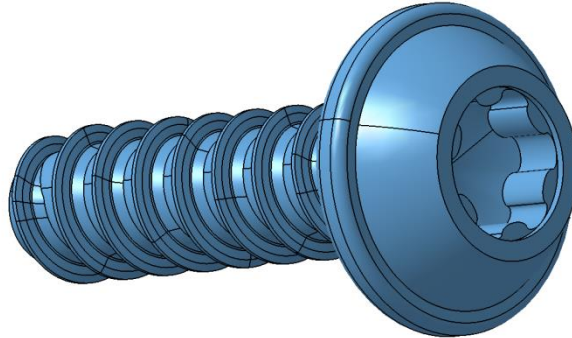
2.5.2. Samotvářecí šrouby

Samotvářecí šrouby pracují s penetrovaným materiálem tak, že je obtéká v prostoru mezi dírou a dříkem šroubu (nevytváří třísku). Tyto šrouby se používají zejména v případě, kdy je potřeba vyvolat velké napětí v materiálu tak, aby se zvýšil odpor proti uvolnění. [1]

Ten ve spoji vzniká díky tomu, že přetvořený materiál vlivem vyvolaného napětí silově účinkuje na šroub a to jak radiálně, tak axiálně. Zároveň zde při správné aplikaci nepůsobí žádná vůle. Z těchto důvodů se u samotvářecích šroubů zřídka používá pružné podložky či jiné pojistné součástky.

Nespornou výhodou je i možnost opakované montáže a demontáže bez toho, že by se tím zničil již vytvořený závit, jak tomu někdy bývá u samořezných šroubů. [2]

Úskalí této technologie spočívá právě v tom, že na její uplatnění je potřeba vyvinout poměrně značný krouticí moment. Ve spoji navíc, jak už bylo zmíněno výše, vznikají velká napětí, k čemuž je potřeba přihlídnout při návrhu celého dílu, například tím, že se zvětší tloušťka stěny plastového domku.



Obr. 7. 3D model šroubu typu Delta PT [24]

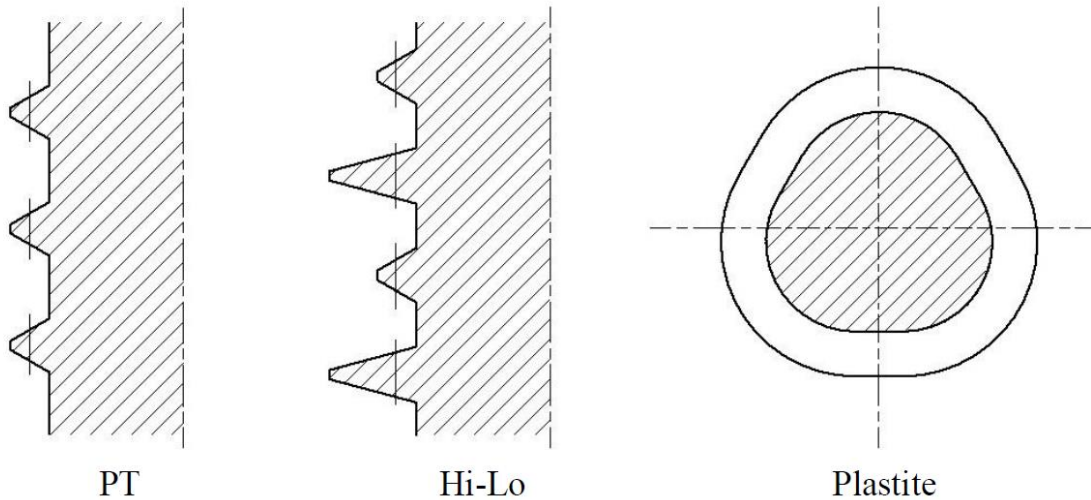
2.5.2.1. Typy samotvářecích šroubů

U samotvářecích šroubů je obecně snaha minimalizovat radiální působení na úkor axiálního. Toho se dosahuje pomocí úzkoprofilových závitů s větší roztečí.

Jednotlivých typů, které se liší konkrétními parametry, je celá řada, avšak obecně rozlišujeme tři nejznámější typy:

- **Šrouby s profily PT, Delta PT apod.** mají rozšířenou rozteč závitů a zvětšenou nosnou výšku závitového profilu. Tím snižují nebezpečí stržení závitu v plastu. Jedná se o nejpoužívanější typy tvářecích šroubů. [5] Jde o jeden z často používaných typů ve firmě Automotive Lighting.
- **Šrouby Hi-Lo** jsou speciální šrouby s dvouchodým závitem. Jeden chod má větší průměr a funguje jako tvářecí i nosný profil zároveň, zatímco druhý s menším průměrem má pouze funkci nosnou (princip spočívá v tom, že menší závit se opírá o materiál vytlačený větším závitem). Tímto se omezuje vznik vnitřního pnutí v plastové součásti a zatížení spoje se rozkládá rovnoměrněji podél celé hloubky závitu. Šrouby Hi-Lo mají menší úhel boků profilu závitu a lze je snadněji zašroubovat. Potřebný utahovací moment pro zašroubování bývá 3 až 5krát menší než kritický moment, při němž by došlo ke stržení závitu v plastové součásti. Aby byly součásti spojeny dostatečnou silou, má být šroub utažen momentem rovným 50 až 70% z momentu kritického. [2] V provozu se nicméně nepotvrdilo, že by díky chodu s nižším průměrem vykazoval tento typ šroubu lepší únosnost spoje. Hlavní háček pravděpodobně spočívá v tom, že vytlačený materiál, který by měl eventuálně tvořit podporu pro menší závit, je již jednou přetvořený a má v důsledku toho výrazně horší mechanické vlastnosti

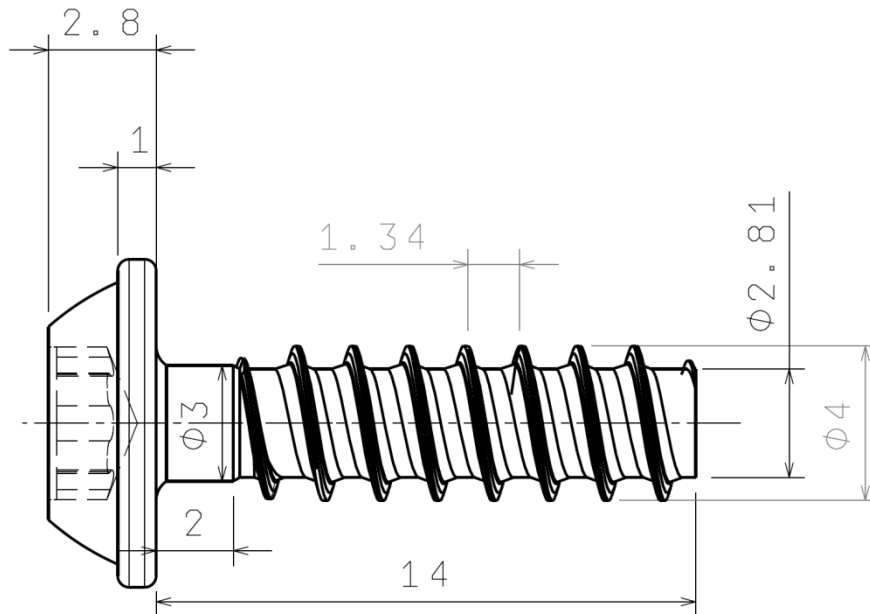
- **Šrouby typu Plastite** mají nekruhový příčný průřez závitu. Ten má v průřezu trojúhelníkovitý tvar se značně zaoblenými vrcholy. Toto provedení způsobuje, že pružný plast se po zašroubování sevře kolem nekrouhlého šroubu a brání jeho samovolnému uvolnění při vibracích a otřesech. [2] Šrouby tohoto typu se nejčastěji používají pro šroubování do lehkých kovů.



Obr. 8. Profily speciálních tvářecích šroubů pro plasty [2]

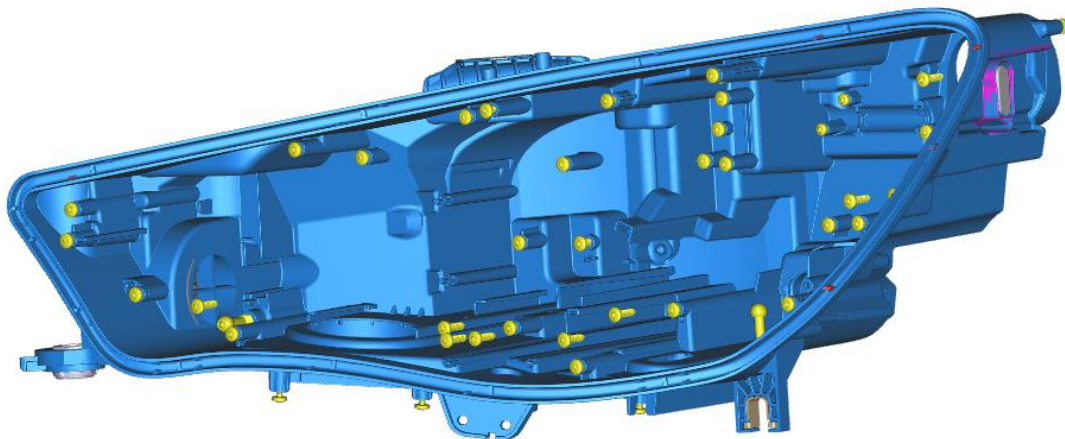
2.6. Samotvářecí šrouby v Automotive Lighting

V rámci společnosti Automotive Lighting se samotvářecí šrouby používají k montáži světlometů. Šroubují se do plastových dílců, zpravidla z polypropylenu, polykarbonátu a různých kombinací lišící se plnivem. V jednom světlometu je přibližně 30 takových vrutů. Špatný návrh šroubového spoje, případně nevhodně zvolená montáž, může znehodnotit podstatnou část zástavbového modulu, popřípadě celého světlometu. To se projeví jednak ztrátou investice do plastového prvku, ale také souvisejícími náklady na zvýšený takt linky a pracovní sílu. Ročně se vyrobí zhruba pět milionů světlometů a jakékoliv ohrožení výroby je nepřijatelné. Proto je pro firmu téma šroubových spojů velmi důležité, byť se na první pohled samotné šrouby jeví nepodstatně.



Obr. 9. Šroub typu Delta PT používaný ve firmě AL

Montáž v sériové výrobě probíhá pomocí digitálních šroubováků, které mají předdefinovaný utahovací moment i rychlost šroubování. Oba tyto údaje se tam zadávají na základě řetězce počínaje vývojovým oddělením, doporučení výrobce, a dále kontrolními a uvolňovacími měřeními. V případě, že je spoj dostatečně způsobilý, eliminuje se jeden z rizikových faktorů celé operace montáže.



Obr. 10. Ukázka použití šroubů ve světlometech [24]

Kromě vhodného typu šroubu je velmi důležité zvolit i jeho kvalitní provedení. Jako například přesnost provedení závitů, drsnost závitu, házivost, korozní odolnost, dodatečné mazání v rámci povrchové úpravy apod., které musí splňovat požadavky zákazníka.

Nekvalitní šrouby vnáší do spoje riziko chyby, které se může projevit buď nedostatečnou předepínací silou nebo poškozením celého šroubového spoje. Podrobněji

se této problematice věnuje [5], kde se mimo jiné uvádí, že rozdíly v utahovacích momentech šroubů od různých výrobců mohou dosahovat až hodnoty $0,4 Nm$.



Obr. 11. Jeden typ šroubu od různých výrobců

2.6.1. Nejčastější problémy

Při montáži mohou nastat dva hlavní krizové scénáře:

- 1) Prasknutí domečku
- 2) Strhnutí závitu
- 3) Otláčení připojovaného dílu s rizikem iniciace trhliny
- 4) Vnesení přílišného napětí do spoje
- 5) Povolení spoje po určité době (ztráta předpětí ve spoji)



Obr. 12. Ukázka podélného prasknutí domku [24]

V Prvním a druhém případě jde o okamžité defekty, které se většinou projeví hned při montáži, a vadný kus lze hned odstranit. V třetím a především čtvrtém a pátém případě už to tak jednoduché není a chyba může často nastat až u zákazníka, což je z hlediska firmy ta nejhorší možná varianta.

K povolení spoje a tj. ztrátě předpětí po určité době často dochází souhrnem několika faktorů, z nichž hlavní je špatně vytvořený závit v domečku šroubu. Například tak, že je závit vymletý nekvalitním povrchem šroubu a házením v závitové části. Stejně tak se může stát, že spoj povolí vlivem změněných materiálových charakteristik, k čemuž

často dochází při příliš vysoké utahovací rychlosti (plast v okolí se nataví). Další faktory souvisejí s vlastnostmi platových dílců jako relaxace, a to zejména za zatížení teplotními cykly.

Kromě mechanického znehodnocení dílu může mít vadný šroubový spoj neblahý vliv na světelné parametry světloometu. Může se to stát buď tak, že daný šroubový spoj přímo ovlivní geometrii spoje (například tím, že příliš utáhnutý domeček se deformuje a přitáhne špatným směrem světelnou jednotku), popřípadě nedostatečná předepínací síla ve spoji může umožnit nežádoucí rozkmit celého modulu nebo jeho komponent vlivem vibrací, ať už od silničního povrchu nebo od motoru, které světlo rozkmitávají. To může mít za následek nevhodné osvětlení vozovky a v horším případě ohrožovat bezpečnost.

2.6.2. Rizikové faktory

Hlavní příčiny dělíme na:

1) Návrhové

- a. Špatně navrhnutý utahovací moment
- b. Nevhodně zvolený materiál
- c. Malá dosedací plocha
 - Otláčení připojovaného dílu
- d. Neadekvátní rychlost utahování
 - Může tepelně ovlivnit oblast závitů a pozměnit vlastnosti daného materiálu potažmo šroubového spoje

2) Výrobní

- a. Nesouosost děr spojovaných materiálů
- b. Odchytky v závitové části šroubu a celkové házení
- c. Nekvalitní povrch šroubu (otřepy)

3) Operační

- a. Nedodržení kolmosti při zavádění šroubu
- b. Nedodržení nastaveného momentu
- c. Nedodržení doporučené rychlosti utahování

To jak se nakonec chyba projeví lze jen málokdy přesně určit, neboť výše zmíněné příčiny se často kombinují. V případě že převládá jeden z projevů, lze pak snadněji eliminovat ostatní. Způsobené problémy jsou proto uvedeny jen u těch příčin, u kterých může některá z vad převládat.

Uvolnění světloometu do výroby předchází celá řada testování, kdy je celý světlomet, ale i jednotlivé moduly, podroben zátěžovým zkouškám za různých podmínek dle specifikací zákazníků, ať už je to testování vlivu teploty, odolnost vůči elektromagnetickému záření, odolnost proti vnějším mechanickým silám (např. vibrační testy), ostřikové zkoušky, těsnost apod. Testuje se i technologie montáže a absolutní většina problémů s šroubovými spoji je odhalena právě v této fázi.

3. Analýza samotvářecích šroubů

Samotvářecí šrouby od standardních šroubových spojů vynikají tím, že na ně kromě běžné předepínací síly působí ještě odporové síly související s přetvářením materiálu v závit. Tyto síly pak navyšují výsledný šroubovací moment.

Klíčovým cílem celé analýzy je pojmenovat jevy související s přetvárným procesem a na základě těchto znalostí určit průběh momentu před dosednutím hlavičky šroubu.

Pokud bude v následující kapitole řeč o šroubových spojkách, jedná se o zde popisované šroubové spoje se samotvářecími šrouby. V opačném případě je to na daném místě zdůrazněno.

Jelikož samotvářecí šrouby nemají přesně zakotvený systém značení, vycházel v tomto ohledu autor z firemních zvyklostí. Zároveň zde byla snaha zejména u průměru používat jiné indexy než u klasických metrických šroubů. V případech, kdy by použití jiných indexů bylo matoucí z hlediska názornosti, jsou k popisu využity poloměry namísto standardních průměrů. Z tohoto důvodu vznikají situace, kdy je poloměr díry šroubovaného materiálu označován jako r_1 , zatímco jeho průměr je roven výrazu d_d .

3.1. Možnosti přístupu

K určení utahovacího momentu vede hned několik cest. Ta první, a také nejvíce nasnadě, je experimentální. Spočívá v prostém změření celého průběhu momentu pomocí digitálního momentového šroubováku se zpětnou vazbou. Druhá cesta je analytická, kdy na základě materiálových charakteristik a rozčlenění děje na jednotlivé fáze vznikne matematický popis, který určí teoretický výsledek.

3.1.1. Experimentální přístup – měření průběhu momentu

V závislosti na čase, popřípadě úhlu natočení, vznikne momentová charakteristika, která o daném spoji poskytuje mnoho informací. Je to určitě logická a správná cesta, a v rámci této práce jí bude věnován prostor. Hlavní výhodou této metody je rychlé získání přibližné představy o velikostech a průbězích momentů v daném šroubovém spoji.

Problém takové metody spočívá v tom, že jsou do měření vnášeny chyby, které se pojí s daným šroubovým spojem. Aby výsledek byl vypovídající, je potřeba provést velký počet měření. Další omezení vyplývá z toho, že je potřeba mít vzorky, které je možné testovat. Obojí pak vede k velké časové a v případě prototypových vzorků i finanční náročnosti.

3.1.2. Analytický přístup – výpočet utahovacího momentu.

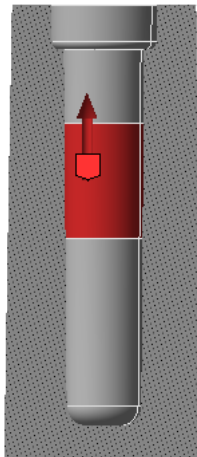
Už ve fázi návrhu je žádoucí znát přibližný rámec, ve kterém se pohybovat, což vede ke snaze získat matematický model daného procesu, který vychází pouze ze známých a odvozených vztahů.

Dobře postavené analytické řešení dokáže určit, k čemu je spotřebovávaná daná část momentu, což může vést k přesnější a účelnější optimalizaci.

3.2. Modelový příklad

V rámci této práce budeme teoreticky analyzovat a následně prakticky měřit šroubové spoje za použití samotvářecího šroubu typu Delta PT o vnějším průměru 4 mm. Jmenovitému průměru daného šroubu podle doporučení výrobce odpovídá průměr díry šroubovaného materiálu o velikosti 3,2 mm. Pro účely experimentu byly pro penetrovaný materiál zvoleny průměry (3,7; 3,5; 3,3; 3,1; 2,9) mm. Šroubované komínky uvažujeme z polykarbonátu.

Pro měření byl použitý komínek s vrtanou dírou. V reálných podmínkách vznikne domeček pro šroub vstřikováním plastu do negativní formy. Aby bylo možné jednoduše vyndat trny, kolem kterých se při vstřikování obalí plastový materiál a vytvoří tak otvor v domečku, je nutné je opatřit nepatrným zkosením. Vnitřní dutina proto není dokonalý válec, jako v našem případě, nýbrž komolý kužel, což je třeba si uvědomit. Takto zjednodušený tvar penetrovaného pouzdra uvažujeme jak v případě experimentálního měření, tak při tvorbě univerzálního modelu.



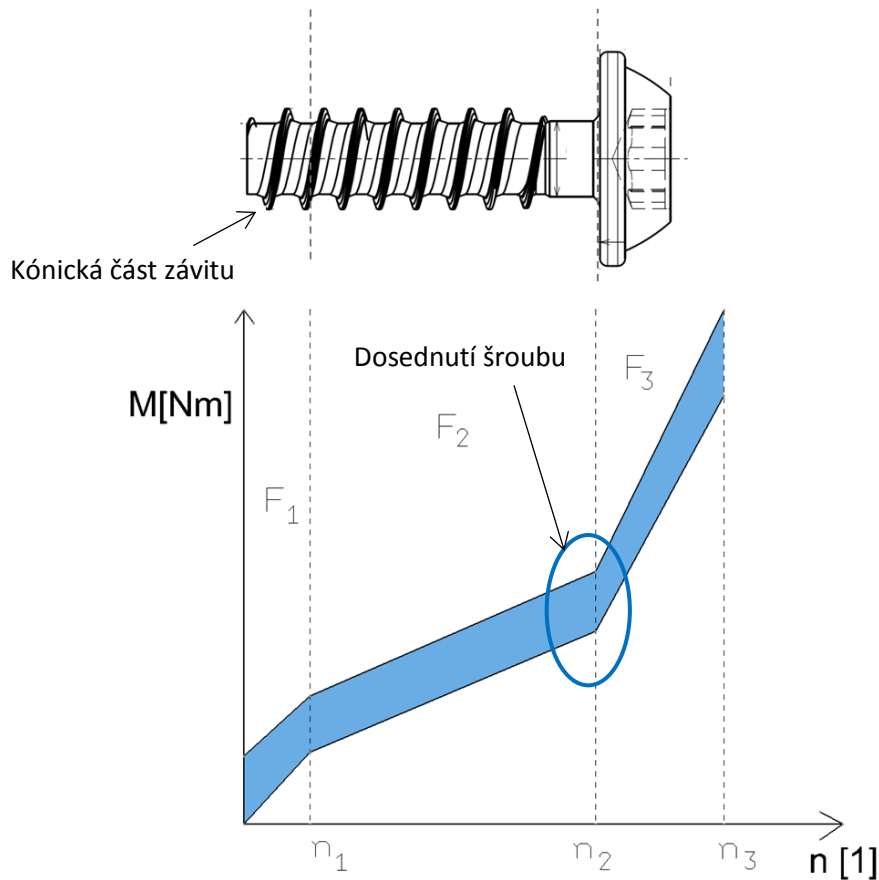
Obr. 13. Ukázka reálného tvaru domečku [24]

3.3. Základ pro tvorbu univerzálního vzorce u samotvářecích šroubů

Při sestavování vzorce pro momentovou charakteristiku vycházíme ze známých vztahů, kdy celkový moment se rovná momentu pro překonání tření pod hlavou M_{th} a momentu pro překonání tření v závitech M_{tz} . V případě samotvářecích šroubů k těmto dvěma přibývá ještě moment dosedací M_D , který zatím neznáme a na dalších stranách se ho budeme snažit analyzovat:

$$M_{celk} = M_k + M_D = M_{th} + M_{tz} + M_D \quad (10)$$

3.4. Ideální momentová charakteristika a fáze šroubování



Obr. 14. Schéma fází momentové charakteristiky²

Šroubování samotvářecího vrutu se sestává ze tří fází [22]:

1) První kontakt – zavedení břitu (oblast v grafu F_1)

- Kónická část závitu se dostává do kontaktu s penetrovaným materiálem.
- Rozšiřujícím kónusem, jenž nese začátek šroubovice, postupně vtlačuje břit vrutu do šroubované součásti.
- Rozsah otáček $\langle 0; n_1 \rangle$, kde n_1 je počet otáček od prvního kontaktu s materiálem po penetraci plným průměrem.
- Tato část představuje moment vynaložený na **přetvoření plastu v závit**. V případě, že by na šroubu už nebyla žádná další šroubovice (šroub by se skládal pouze z počátečních asi dvou závitů, zbytek by tvořil holý dřík), moment v grafu by byl dále konstantní.
- Průběh této části grafu **závisí na daném materiálu**. Za předpokladu, že odpor, který klade proti vnikání, je lineární (tedy panuje přímá úměra

² V grafu jsou pro větší názornost na ose x otáčky. Běžně se místo toho uvádí úhel. V problematice samotvářecích vrutů do plastů se však nejčastěji místo toho používá čas šroubování.

V skutečnosti má třetí fáze mnohem strmější průběh a s vodorovnou osou svírá téměř pravý úhel. Platí, že čím strmější třetí fáze, tím je spoj tužší.

mezi hloubkou vniknutí a kladeným odporem), je daná funkce taktěž lineární.³

2) Šroubování – tření v závitu (oblast grafu F_2)

- Druhá oblast grafu je spjata s druhou částí šroubu, ve které šroubovice figuruje jako nosný element, a v ideálním případě se na tvorbě závitu nepodílí. Ve skutečnosti ho však ještě do jisté míry dotváří, neboť šroubovice není všude dokonale stejná.
- Moment, který musíme překonat v této oblasti je daný třecím odporem v závitech. Jeho nárůst je ve zjednodušeném modelu při zanedbání dalších vlivů lineární. Linearita je dána tím, že tlak v domku je stále stejný, pouze se rovnoměrně zvětšuje plocha, na kterou působí.

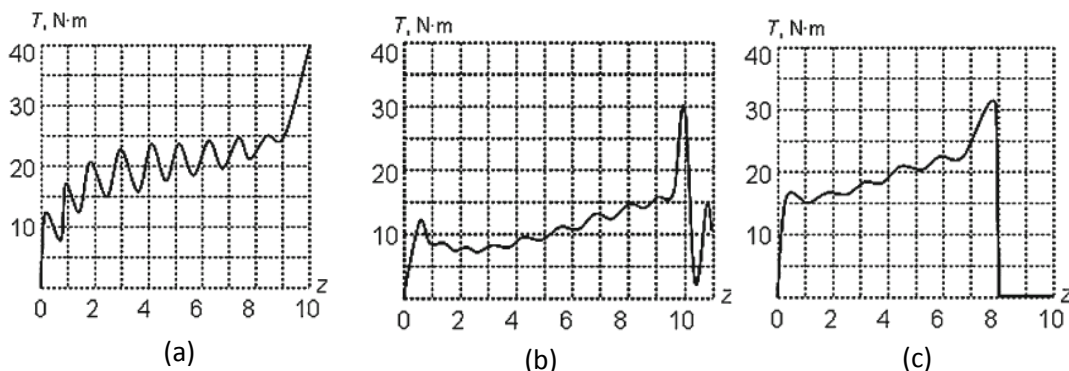
3) Utahování – vytváření předepínací síly (oblast grafu F_3)

- Známa problematika popsána v kapitole 2.34.
- Dodávaný moment se z části spotřebovává na předepínání spojovaných dílců, avšak většina z něj jde na úkor tření v závitech a pod hlavou [15].
- Pro tuto část průběhu utahovacího momentu je pro automobilový průmysl nutné návazně stanovit způsoblost šroubového spoje.

Z toho vyplývá, že i požadovaný došedací moment M_D se rozděluje na fáze popsané v bodech 1) a 2). Platí tedy:

$$M_D = M_{1F} + M_{2F} \quad (11)$$

3.4.1. Momentové charakteristiky pro dané problémy a detekce chyb



Obr. 15. Momentové charakteristiky pro chybové situace: (a) rozkmit či házivost šroubu (b) posun spojovaných dílců (c) Strhnutí závít [6]

Kapitola 2.7.1 popisuje ideální průběh šroubování. Ve skutečnosti průběh takto lineární není a z toho jakým způsobem se od ideálu liší, lze určit převládající příčinu problému, nebo alespoň některé faktory eliminovat a přiblížit se tak reálné představě.

³ Vycházíme zde z předpokladu, že první část šroubovice je navinuta na kužel, jak tomu je například u šroubů typu Delta PT. Díky tomu je zajištěno lineární vnikání šroubu do materiálu. Některé typy vrutů mají začátek například kulovitý, popřípadě parabolický, o což je pak situace komplikovanější

Z lineární interpolace různých měření stejného typu šroubového spoje pak díky statistickým principům získáme s určitou chybou modelový průběh šroubování, se kterým pak srovnáváme jednotlivé průběhy. [6]

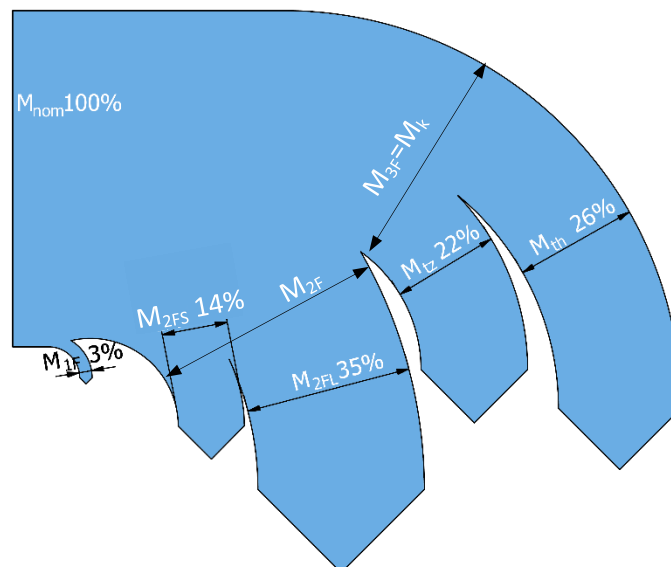
Výrazný harmonický průběh kolem ideální přímky značí takzvané vibrace ve spoji, které jsou nejčastěji způsobeny házením šroubu, díry, nebo nesouosostí otvoru šroubovaného a spojovaného dílu.

Na základě dat získaných z elektrického utahováku o průběhu šroubovacího momentu, lze díky typizovaným chybovým průběhům momentových charakteristik odhadnout, který kus je vadný.

V případě, že by továrna byla vybavena momentovými klíči, které tuto zpětnou vazbu umožňují, tak by takový odhad bylo možné provést například na základě umělé nervové sítě. [6]

3.5. Momentové poměry

Cílem analýzy samotvářecích šroubů je v první řadě určení momentu potřebného na zašroubování samotvářecího vrutu do plastového materiálu. K tomu je potřeba si celý proces rozčlenit na jednotlivé úlohy, které se podílejí na výsledném momentu, jež se musí vyvinout elektrickým utahovákem.

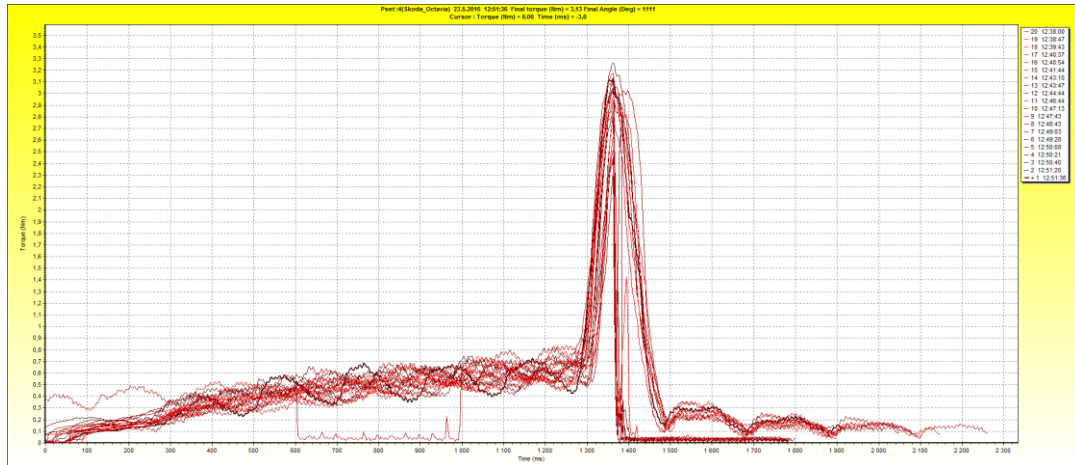


Obr. 16. Momentové poměry v samotvářecích šroubech podle výpočtů v kapitole 3.7⁴

⁴ Obr. 16 vychází z výpočtů první verze univerzálního vztahu pro dosedací moment a jeho role v tomto dokumentu je spíše ilustrativní.

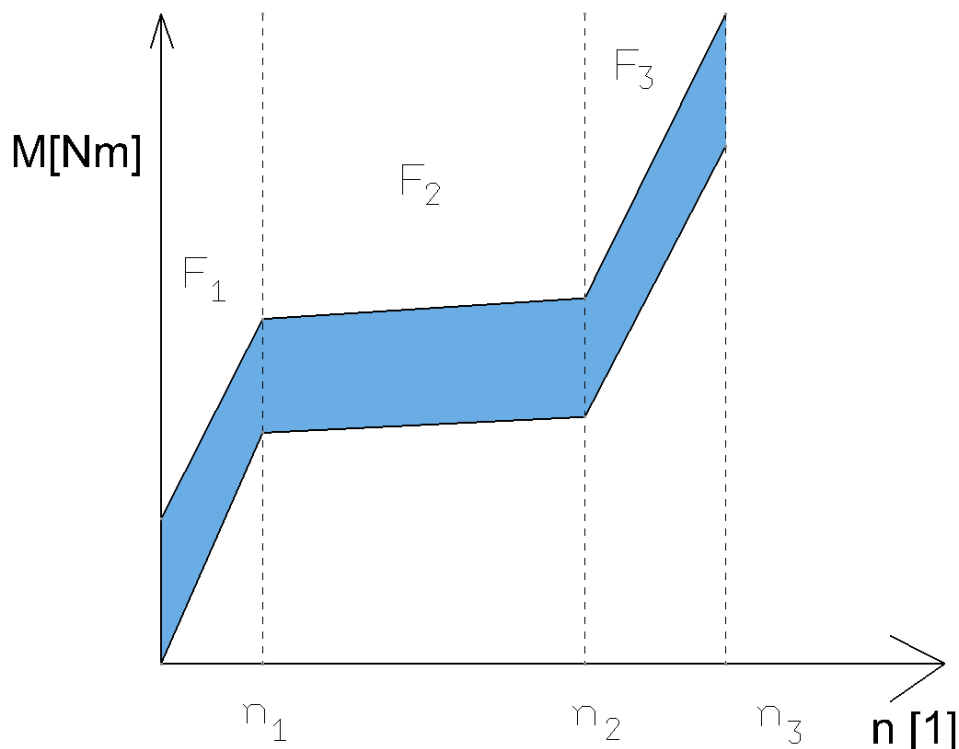
Rozdělení momentu ve druhé fázi bude blíže popsáno v kapitole 3.6.1

Samotné přetvoření plastového materiálu bylo od začátku autorova bádání ve firmě Automotive Lighting největší neznámou. Na začátku se totiž mělo za to, že vytvoření závitu spotřebovává největší množství přiváděného výkonu (ve formě $M \cdot \omega$), respektive energie ($M \cdot \varphi$). Tuto prvotní úvahu však lze vyvrátit už na základě momentové charakteristiky, kde přiváděný moment roste postupně.



Obr. 17. Reálný průběh šroubování [24]

Za tvorbu závitu totiž odpovídají pouze jeden až dva závity šroubu, které jsou pro snadnější zavedení šroubu navinuty na kužel. V případě, že by největší množství energie bylo spotřebováno na závito-tvornou práci, byl by v charakteristice na začátku prudký nárůst na hodnoty blízké se dosedacímu momentu a do dosednutí hlavičky by se moment držel na takřka konstantních hodnotách a pouze pozvolna stoupal, viz obr. 18.



Obr. 18. Momentová charakteristika s dominantním vlivem tvářecího momentu

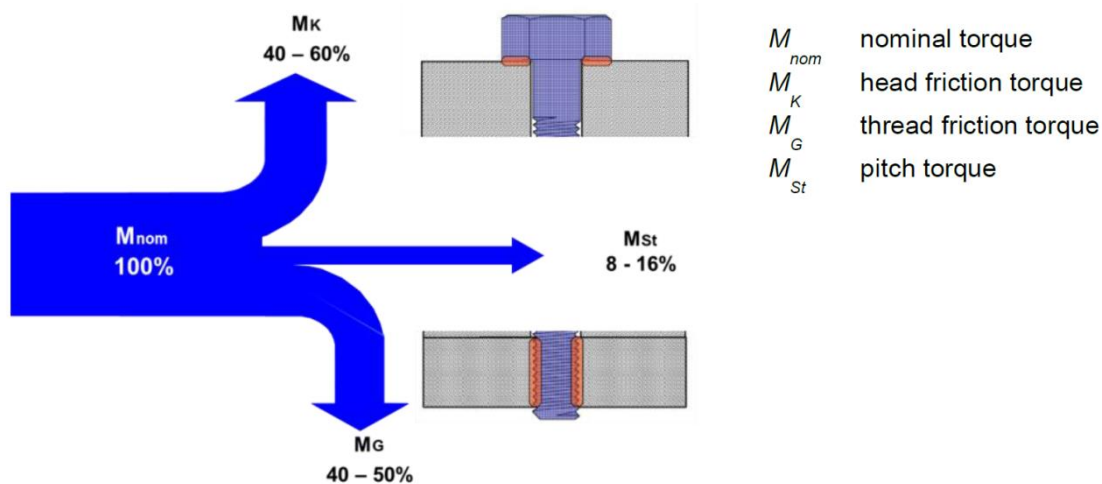
Při skutečném měření (obr. 17) však prudký nárůst není pozorovatelný. Dokonce ani nejde jednoznačně určit změnu ve vývoji charakteristiky, což může znamenat dvě věci. Buď tam změna není a první fáze má podobný průběh jako fáze druhá nebo se pohybuje v hodnotách momentu, které nejsou pro použitý přístroj Atlas Copco měřitelné. Elektrický momentový šroubovák, se kterým byly měřeny všechny zde prezentované experimenty, je totiž schopný měřit teprve v rozmezí $0,2 N \cdot m$ až $5 N \cdot m$.

Úvaze, že moment potřebný na vytvoření závitu je vůči momentu vynaloženému na tření násobně menší, odpovídají i data uvedená v materiálu [9], podle kterých se 90 % veškeré energie v první a druhé fázi šroubování vynaloží na překonání třecích sil v závitech.

10% je však v celkovém poměru vzhledem k ostatním faktorům velmi málo. Tak například podle interních podkladů firmy Automotive Lighting a podkladů jednoho z významných dodavatelů šroubů (firma EJOT) je vliv přídavného mazadla (mazacího vosku na povrchu šroubu) až +/- 30% výsledného dosedacího utahovacího momentu.

Energie plynoucí z třecího momentu ve druhé fázi šroubování (bez předpětí) se v rámci potřeb této práce dělí na lokální tlak M_{2FL} , generovaný přímo zasaženým materiálem, a skořepinový tlak M_{2FS} , plynoucí z „nafukování domečku“.

Je důležité si uvědomit, že veškerá energie vynaložená na překonání třecích sil je ztrátová a přemění se na teplo, které má na šroubový spoj velký vliv (viz kapitola 3.15).



Obr. 19. Momentové poměry v metrických šroubech klasického typu podle VDI 2230 [15]

Množství energie vynaložené na třetí fázi šroubování (předepínání šroubového spoje) pak záleží na velikosti předepínací síly.

$$M_{nom} = F_i(0,16 \cdot P + 0,58 \cdot d_2 \cdot f_0 + \frac{(D_h+d_d)}{2} \cdot f) \quad (12)$$

V normě pro automobilový průmysl VDI 2230, je klasický metrický šroubový spoj popsán empirickým vztahem (12), jehož grafická interpretace je na obrázku 18. V ní je zvlášť uvedený moment vynakládaný předepínání spojovaných součástí. Tento moment je zde označován jako „Pitch torque“, neboli moment na rozteč. Z toho vyplývá zajímavý

poznatek a totiž, že moment potřebný na předejetí spojovaných součástí tvoří v klasickém šroubovém spoji pouze asi desetinu utahovacího momentu.

Pro potřeby této práce vycházíme z klasického vzorce podle [17], v němž je „Pitch Torque“ součástí momentu pro tření v závitech.

3.6. Rozklad působících sil

Při analýze působících sil je třeba rozdělit problém na dílčí způsoby zatěžování, které se pak v součtu podílejí na výsledném momentu, jenž musíme vyvinout na elektrickém utahováku. Rozdělení na jednotlivé fáze provedeme podle kapitoly 3.4.

V následujících podkapitolách je problematika první fáze zařazena až za fázi druhou. Souvisí to s tím, jak autor myšlenkově postupoval při tvorbě zjednodušeného modelu, což by mělo být názornější pro pochopení řešení.

3.6.1. Síly ve druhé fázi šroubování

V první a druhé fázi šroubování na vrut působí pouze přetvořený domek. Jím generovaná radiální síla se promítne přes koeficient tření do třecí síly, která na vzdálenosti od osy otáčení vytváří moment, jež musíme ve druhé a třetí fázi šroubování překonávat.

Radiální síla se podle autorových předpokladů skládá ze dvou hlavních částí. Jednou z nich je lokální odpor samotného materiálu, který vzniká přímým vzájemným působením břitu šroubu a penetrovaného materiálu. Tou druhou je odpor celého geometrického systému (válcového domku), který se brání proti rozpínání.

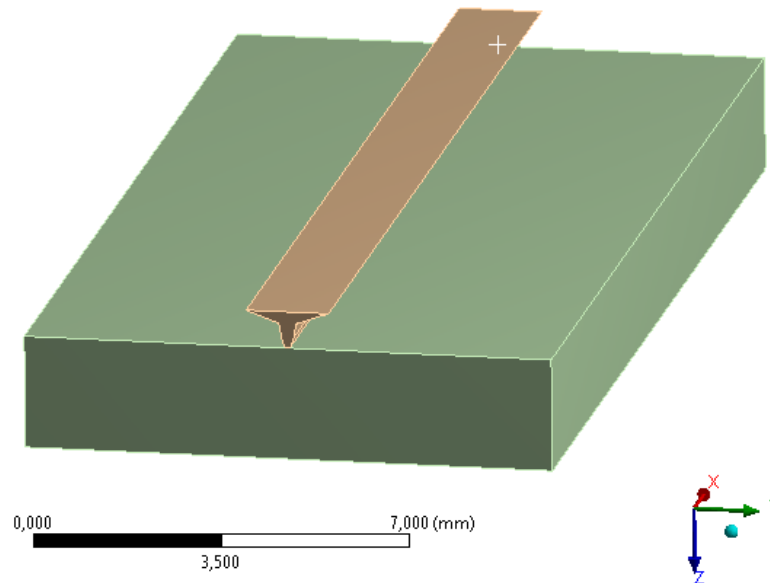
Platí tedy:

$$M_{2f} = M_{2fL} + M_{2fS} \quad (13)$$

Třecí sílu vlivem axiální síly vytvářené operátorem šroubováku nebereme v úvahu.

3.6.1.1. Radiální tlak z odporu v materiálu – „lokální tlak na břit“

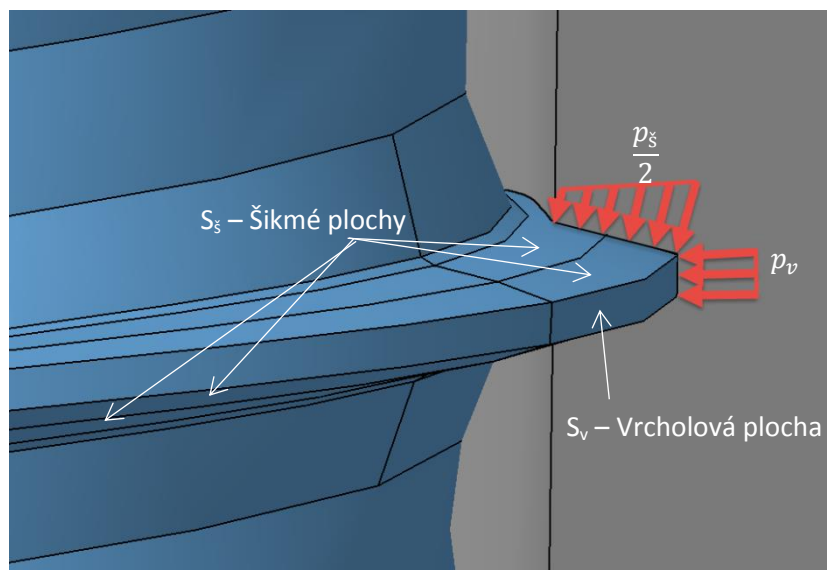
Díky tomu, že jsme si radiální sílu rozdělili na dvě části, můžeme vytvořit zjednodušený model problému, kdy šroubovici a celý domek rozvineme do plochy.



Obr. 20. Rozvin šroubovice

Materiál v domku, který nezplaztizoval při vytváření závitu a setrvává tak ve fázi elastické respektive elasticko-plastické deformace, silově působí na břit šroubu a prostřednictvím tření tak zvyšuje šroubovací moment. Tuto část označíme pro potřeby této práce jako „lokální tlak na břit“.

Na obr. 21 je ilustrativní nástin silového působení na elementární část šroubovice závitu typu Delta PT. Materiál vytváří tlak, který je v ideálním případě po obvodu šroubovice (souřadnice n) konstantní. V rovině stejnohlé s osou šroubu se tento tlak jeví jako spojité zatížení, jehož přesný průběh v tuto chvíli neznáme. Předpokládá se však, a dosavadní simulace to naznačují, že jeho velikost narůstá s přibývajícím vzdáleností od osy.



Obr. 21. Ilustrace působícího tlaku – profil tlaku je pouze odhad pro názornost

Pro analytické řešení rozdělíme plochu šroubovice (vytvořenou v ideálním modelu tažením profilu břitu po šroubovici) na jednodušší plošky (vytvořené tažením úseček po

šroubovici – úsečky tvořící profil). V našem případě se břit sestává ze čtyř bočních a z jedné vrcholové. Pro vrcholovou plochu je vzdálenost od středu konstantní.

Profil břitu je symetrický, což znamená, že jsou symetrické i boční, neboli šikmé, plochy. Toho využijeme v torbě vztahu – budeme uvažovat pouze dvě šikmé plochy a výsledný vztah vynásobíme dvěma, viz rovnice (18). Pro dvě uvažované boční plochy, které jsou vůči ose šroubu v normálovém řezu skloněny pod určitým úhlem, zvolíme řešení pomocí integrální rovnice. Protože je rozdíl ve sklonu bočních ploch velmi malý, tak pro lepší názornost a přehlednost výsledného vztahu budeme uvažovat na profilu zubu pouze jednu šikmou plochu. V rámci dalšího zpřesňování výsledného vztahu a eventuálního praktického použití pak budeme samozřejmě uvažovat obě.

Pro vyjádření třecích momentů na obou plochách vycházíme z jeho základní podoby:

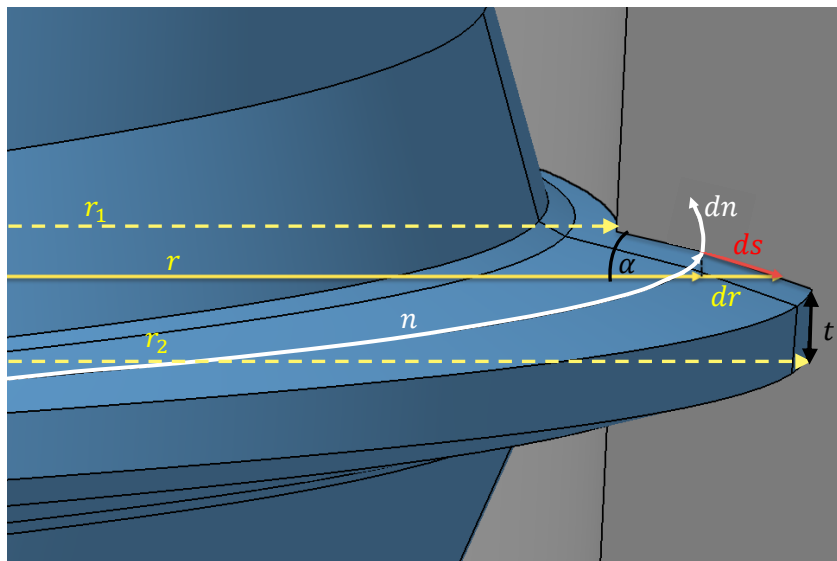
$$M_t = F_t \cdot r, \quad (14)$$

kde F_t je třecí síla

$$F_t = F_n \cdot f_0 \quad (15)$$

Kde F_n je normálová síla již lze vyjádřit pomocí působícího tlaku:

$$F_n = p \cdot S \quad (16)$$



Obr. 22. Souřadnice použité k odvození

Kde S je plocha na šroubovici, jejíž elementární podoba se vyjádří jako součin elementárních vzdáleností:

$$dS = ds \cdot dn \quad (17)$$

Po dosazení vztahu (17) do rovnic (16), (15) a nakonec (17) dostaneme pro šikmou plochu elementární moment

$$dM_s = 2 \cdot f_0 \cdot \frac{p_s}{2} \cdot r \cdot ds \cdot dx \quad (18)$$

$$ds = \frac{dr}{\cos\alpha} \quad (19)$$

$$dn = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \cos\gamma \cdot dn \quad (20)$$

$$M_{\xi}(r, n) = \iint_{r_1 n_1}^{r_2 n_2} \frac{f_0 \cdot p_{\xi} \cdot r \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \cos\gamma}{\cos\alpha} \cdot dn \cdot dr \quad (21)$$

Integrováním tohoto vztahu získáme M_{ξ} , neboli tu část třecího momentu M_{2fL} , která působí na šikmé části břitu:

$$M_{\xi} = \frac{f_0 \cdot p_{\xi} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \cos\gamma \cdot (n_2 - n_1) \cdot (r_2 - r_1)^3}{3 \cdot \cos\alpha} \quad (22)$$

Kde n_1 je počet otáček, kterým končí první fáze a n_2 pak celkový počet závitů.

Pro druhou šikmou plochu by byl postup analogický, pouze by ve výsledku figuroval místo α jiný úhel a dosazovali bychom jiné poloměry r_1 a r_2 .

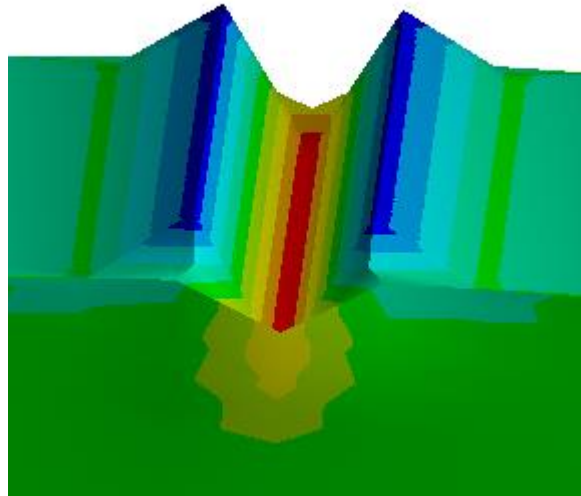
Pro výpočet vrcholové oblasti vycházíme ze stejných předpokladů jako na šikmé ploše, avšak neintegrujeme podle poloměru, neboť je zde konstantní. Z toho dostáváme:

$$M_v = f_0 \cdot p_v \cdot r \cdot t \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \cos\gamma \cdot (n_2 - n_1) \quad (23)$$

Sečtením třecích momentů na jednotlivých plochách dostaneme třecí moment pro lokální radiální tlak

$$M_{2fL} = M_{\xi} + M_v \quad (24)$$

Jednou z neznámých a pomyslných otázek, které si musíme v tento moment položit, je profil působícího tlaku a jeho velikost. Rovnice je zde totiž definovaná jako funkce s konstantním tlakem závislá pouze na poloměru r . Jak již bylo řečeno, tlak není na celém profilu všude stejný a jeho velikost narůstá se zvětšujícím se poloměrem. V ideálním případě by bylo možné i tuto závislost popsat rovnicí a tu následně vložit do vztahů (22) a (23).

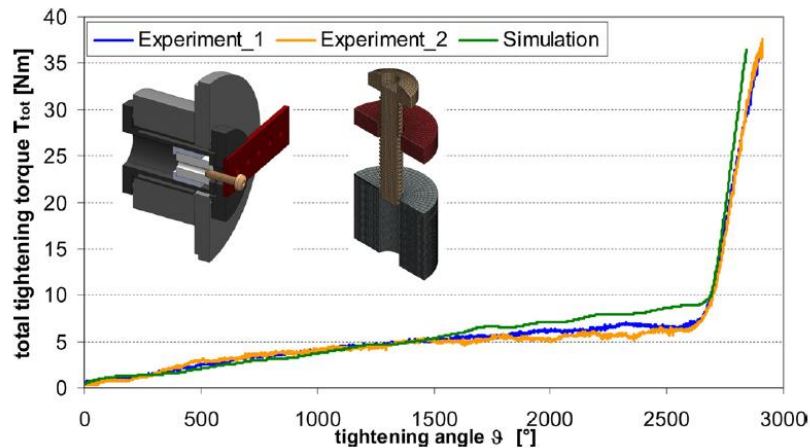


Obr. 23. Ukázka rozložení napětí v přetvořeném materiálu podle MKP simulace [24]

Velikost tlaku a jeho průběh po obvodu břitu je možné získat pomocí simulace metodou konečných prvků (MKP), kde je zjednodušený model rozvinuté šroubovice vtlačován do rovinného plastového materiálu. Podlouhlý klín na obr. 20 zde zastupuje šroubovici a vůči plastové desce má takřka absolutní tuhost. Plastový materiál vystavený tlaku břitu má naproti tomu přednastavené vlastnosti (materiálový model) odpovídající v praxi používanému polykarbonátu známému pod obchodním názvem Makrolon 235.

V této chvíli je třeba si uvědomit, že samotná metoda MKP je do určité míry zjednodušením (složitou geometrii převede na velké množství jednoduché geometrie) a relevantnost jejích výsledku velkou vahou závisí na zkušenostech a schopnostech člověka, který úlohu zadává. Nepřesnost ve výpočtu je v našem případě o to větší, neboť zde poměrově dochází ke značným deformacím. Použití této metody tak vnáší chybu do již tak zjednodušeného modelu. Přesto všechno jsou však data získaná simulací v programu Ansys velmi cenná, neboť poskytují prvotní představu o daném ději.

Samozřejmě, je možné v takovém programu simulovat celý proces šroubování najednou, o což se pokoušeli i autor této práce a jeho kolegové. Celá úloha je však ještě o mnoho složitější, neboť kombinuje translační a rotační pohyby. Tím se stává ještě náročnější na výpočetní čas a definování modelu. Přesto je to relevantní varianta a mnohé výzkumy, například [19], ukazují, že to přináší smysluplné výsledky viz obr. 24.



Obr. 24. Ukázka možných výsledků MKP simulace celého spoje [19]

Úskalí kompletní simulace spočívá v tom, že se vytrácí univerzálnost a jednotlivé aplikace šroubových spojů se musí testovat individuálně. Rozčlenění na jednotlivé fáze a jejich následné zjednodušení, nám dává možnost podrobně zkoumat jednotlivé jevy působící ve spoji. V neposlední řadě je díky tomu možné tyto součásti modelu postupně ladit a iterovat tak, aby byl výsledný vztah co nejexaktnější.

3.6.1.2. Radiální tlak z odporu domku – „skořepinový tlak“

Domek, do nějž šroubujeme samotvářecí vrut si lze představit jako silnostěnnou nádobu s vnitřním přetlakem. Přetlak je způsobený zavrtnutým šroubem, který do systému vnesl napětí. Domek se obvodově rozpíná, ale vlivem elasticity materiálu má tendenci se vrátit do původního rovnovážného stavu a tím na šroub vyvíjí další tlak. Tento jev v rámci této práce nazýváme skořepinovým tlakem.⁵

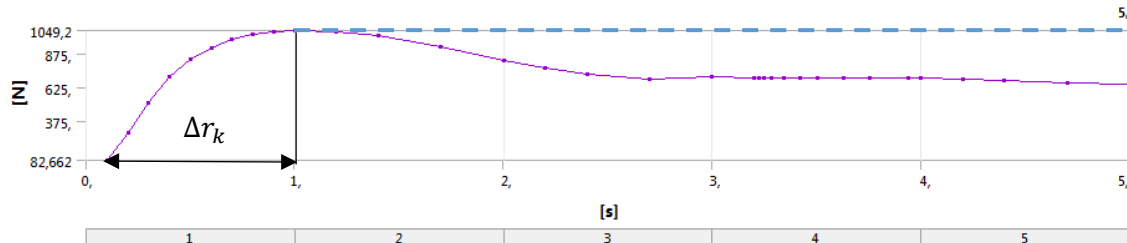
Pro snadnou implementaci tohoto fenoménu do univerzálního matematického modelu zvolil autor této práce zjednodušení vycházející z principů lisování válce do tlustostěnné nádoby. Jako tvar šroubového domku budeme pro tento případ uvažovat dutý válec. Válec, který „lisujeme“ do tlustostěnné nádoby, by měl plochu pláště odpovídající ploše šroubovice (lze si to jednoduše představit tak že sesuneme jednotlivé otáčky šroubovice vedle sebe). Otázkou ovšem zůstává, jaký v takovém zjednodušení zvolit přesah. Ideální by bylo znát hloubku vtlačování klínu (neboli rozvinuté šroubovice podle obr. 20), ve které nastává rovnováha mezi elasticko-plastickým materiálem a materiálem, který už takřka bez odporu plasticky odtekl. Jinými slovy je potřeba najít kritickou hloubku Δr_k , od níž je odporová síla generována materiálem konstantní. Do té doby totiž narůstá lokální tlak a lze tedy předpokládat, že spolu s ním roste i napětí v rozpínaném domečku a tudíž i „skořepinový tlak“.

Tato úvaha je sama o sobě zjednodušením. V případě, že bychom takový průběh znali, tak z něj odečtená Δr_k je skutečně za ideálních podmínek vzdálenost, do které dochází k rozpínání válcové nádoby. Problém ovšem spočívá v tom, že průběh takového

⁵ Skořepinový proto, že šroubový domek může mít v praxi různé tvary

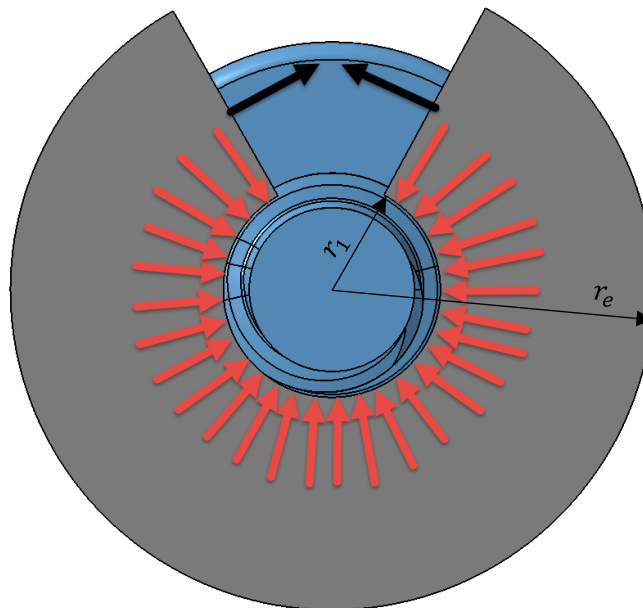
rozpínání neznáme a nelze tvrdit, že je stejný jako při lisování. Přesto si s touto analogií při tvorbě první verze modelu pomůžeme, abychom se dostali do rámcových hodnot. V dalších krocích bádání pak bud důležité danou úvahu zpřesnit.

Zjistit takovou hloubku lze ze stejných MKP výpočtů, jako v předcházející kapitole. Vhodně definovaná simulace deformace při vtažení klínu do materiálu vykreslí průběh síly v závislosti na dosažené vzdálenosti.



Obr. 25. průběh síly v závislosti na penetrované hloubce podle MKP simulace⁶

V grafu na obr. 25 je právě taková závislost vyobrazena. Průběh není zcela předpokládaný, neboť po dosažení „zlomové hloubky“ Δr_k není síla konstantní, ale klesá asi o 30% a poté se ustaluje. Modrou čárkovanou čarou je naznačen ideální průběh síly



Obr. 26. Ilustrace působení radiálního tlaku vlivem rozpínání válcového domku

Jakmile známe přesah pro daný model, můžeme spočítat tlak, který domek vytváří. Výpočet lze provést buď opět pomocí MKP simulace, nebo prostřednictvím známého analytického vztahu pro otevřené tlustostěnné nádoby podle [20]:

$$\Delta r_1 = \frac{r_1}{E} (\sigma_t(r_1) - \vartheta \cdot (\sigma_r(r_1) + \sigma_o)) \approx \Delta r_k \quad (25)$$

kde

⁶ Na obrázku je ve skutečnosti na ose x čas v sekundách, nikoliv přímo penetrovaná hloubka. Zde uvedený „čas“ je ovšem spíše jakási virtuální jednotka, která představuje kroky prováděné v rámci simulace. Mezi tímto „časem“ a uraženou vzdáleností v simulaci panuje přímá úměra

$$\sigma_t(r_1) = 2 \cdot K + p_1 \quad (26)$$

$$\sigma_r(r_1) = -p_1 \quad (27)$$

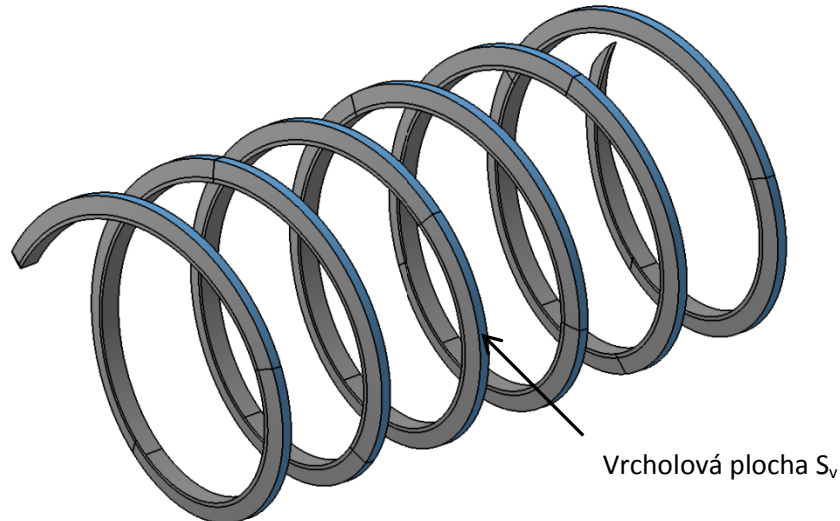
$$\sigma_o = 0 \quad (28)$$

$$K = \frac{p_1 \cdot r_1^2 - p_2 \cdot r_e^2}{r_e^2 - r_1^2} \quad (29)$$

z čehož vyjádříme vnitřní tlak p_1 [19]

$$p_1 = \left(\frac{E \cdot \Delta r_k}{r_1} + 2 \frac{p_2 \cdot r_2^2}{r_e^2 - r_1^2} \right) \cdot \left(2 \frac{r_1^2}{r_e^2 - r_1^2} + 1 + \vartheta \right)^{-1} \quad (30)$$

Vnější tlak p_2 je nulový, neboť atmosférický tlak, který zde působí, se vykrátí s atmosférickým tlakem působícím na druhé straně.



Obr. 27. Průnik materiálu

Takto vyjádřený vztah pro vnitřní přetlak pak snadno dosadíme do výrazu pro krouticí moment vyvolaný třecí silou od rozpínajícího se pouzdra, který vychází ze stejných principů jako (22).

$$M_{2FS} = \int_{n_1}^{n_2} f_0 \cdot r_1 \cdot p_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot t \cdot \cos \gamma \cdot dn \quad (31)$$

Kde $2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot t \cdot \cos \gamma \cdot dn$ je elementární vrcholová plocha S_v

$$M_{2FS} = f_0 \cdot r_1 \cdot p_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot t \cdot \cos \gamma \cdot (n_2 - n_1) \quad (32)$$

Dosazením vyjádřeného tlaku p_1 dostáváme

$$M_{2FS} = f_0 \cdot \frac{D}{2} \cdot \left(\frac{E \cdot \Delta r_1}{r_1} + 2 \frac{p_2 \cdot r_e^2}{r_e^2 - r_1^2} \right) \cdot \left(2 \frac{r_1^2}{r_e^2 - r_1^2} + 1 + \vartheta \right)^{-1} \cdot 2 \cdot \pi \cdot D \cdot t \cdot \cos \gamma \cdot (n_2 - n_1) \quad (33)$$

3.6.2. Rozklad sil v první fázi

První fáze se na spotřebě momentu nepodílí tak zásadním vlivem jako fáze druhá (viz 3.5). Zároveň je však ze všech ostatních fází tou nejsložitější na vytvoření zjednodušeného modelu, neboť zde dochází k dynamickému přetvoření materiálu. To znamená, že vyřešení první fáze nestojí v prioritách analýzy na prvním místě a pro prvotní verze univerzálního modelu utahovacího momentu bude stačit velmi nepřesný a zjednodušený substitut.

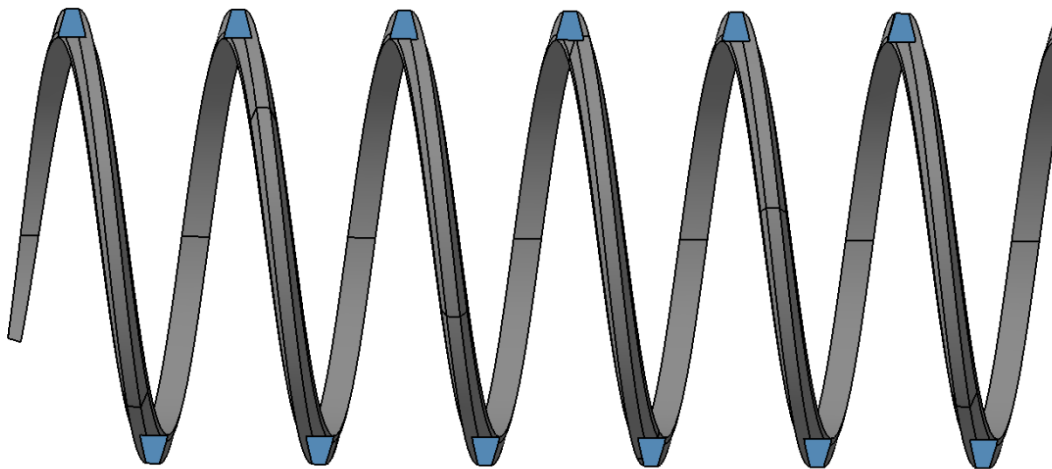
Nasadě jsou tři možná řešení, jejichž vzájemné porovnání nám může poskytnout cennou představu o tom, v jakých konkrétnějších číslech se hodnoty momentu pro přetvoření závitu pohybují.

Tyto možnosti jsou:

- 1) Využití vztahů pro obrábění
- 2) Experiment
- 3) MKP simulace

3.6.2.1. Využití vztahů pro obrábění

Podle článku [22] je možné přetvárný odpor počítat analogicky jako řeznou sílu. Zmíněný odborný text popisuje řezání a tváření závitů pomocí povlakovaných závitníků a na obě technologie pohlíží z hlediska výpočtů i výsledků stejně.



Obr. 28. plocha třísky (modře) byla odečtena z normálového řezu průřezu šroubu a domku

Autor této práce se pokusil tuto metodu početně ověřit pro vruty užívané v reflektorech Automotive Lighting.

Použité vzorce:

$$F_c = k_c \cdot A_d \quad (34)$$

$$k_c = 6 \cdot R_m \quad (35)$$

$$M_{1F} = F_c \cdot d_s \quad (36)$$

Tab. 1. Tabulka vypočtených hodnot pro různé průměry děr

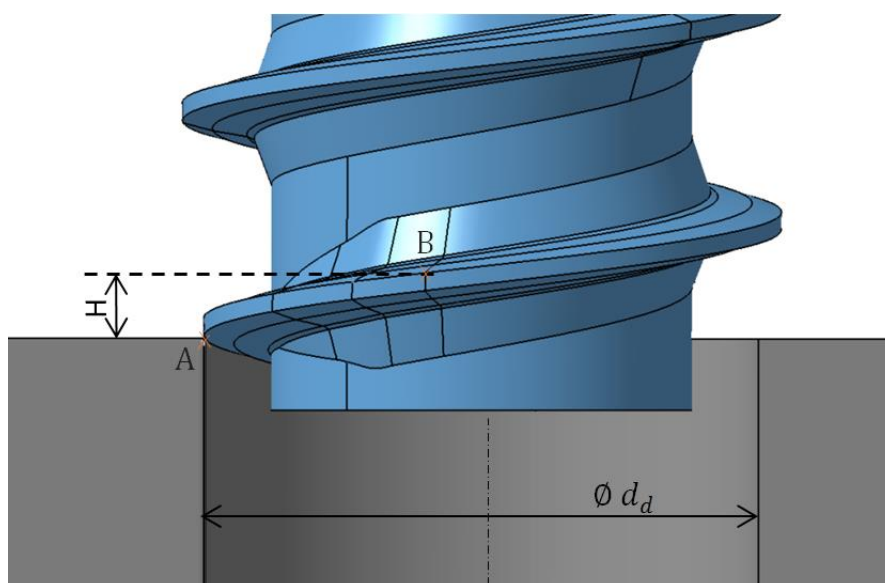
Výpočet řezné síly					
$\varnothing d_d$ [mm]	3,7	3,5	3,3	3,1	2,9
F_c [N]	10,08	19,32	30,24	42,84	63,42
A_d [mm ²]	0,024	0,046	0,072	0,102	0,151
k_c [N.mm ⁻²]	420	420	420	420	420
R_m [Mpa]	70	70	70	70	70
r_1 [mm]	1,925	1,875	1,825	1,775	1,725
M_{1F} [N.m]	0,0194 04	0,036 225	0,055 188	0,076 041	0,109 4

Z výsledků výpočtů je možné vyvodit, že moment potřebný čistě na přetvoření závitu bez zohlednění tření je v porovnání s vlivem tření v závitech a působení radiální síly zanedbatelný.

Uvedená skutečnost by tedy ukazovala spíše na tu možnost, že z naměřených momentových charakteristik přístrojem Atlas Copco nelze určit první fázi šroubování. Vyplývá to, jak už bylo popsáno, z technické charakteristiky přístroje, který začíná měřit až od hodnoty 0,02 Nm. Největší zde vypočítaný moment na přetvoření závitu však činí pouhých 0,019 Nm.

3.6.2.2. Experiment

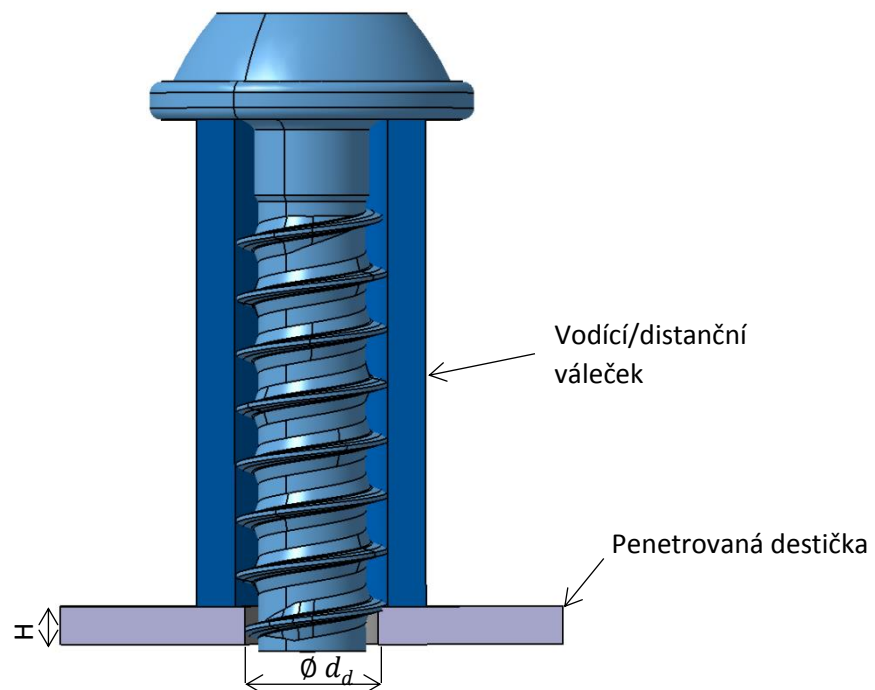
Vycházíme ze znalosti geometrie šroubu a průměru díry D. Šroubovice na špičce vrutu se od prvního kontaktu s nepřetvořenou dírou postupně rozšiřuje, až nabyde plného průměru a od té chvíle mluvíme o zcela přetvořeném závitu. Stačí tedy vědět, ve kterém místě na šroubovici dojde s daným průměrem k prvnímu styku (bod A) a jak je to ve směru osy daleko od jmenovitého průměru d (bod B) pro samotvářecí šrouby. Tuto vzdálenost označíme jako H . Bod dotyku zjistíme jednoduše například pomocí 3D CAD softwaru.



Obr. 29. Ilustrace zjišťování výšky H

Poté už stačí jenom vytvořit vypovídající množství destiček o tloušťce H s dírou o průměru d_d a doplnit je vodícím válečkem. Ten by měl vnitřní průměr o něco větší než jmenovitý průměr šroubu d a jeho výška by odpovídala osové vzdálenosti mezi bodem B a dosedací plochou šroubu. Vodící váleček by tak zamezil dalšímu pronikání šroubu a pomohl nám v naměřené charakteristice vyseparovat potřebný přetvárný moment. Měření by probíhala ve dvou variacích – s vodícím válečkem a bez něj (šroub se celý nechá proniknout skrz).

Představenou sestavu na obr. 30 by možná bylo potřeba podložit ještě podpurnou deskou s otvorem průměru vodícího válečku, která by kompenzovala nízkou tuhost tenké penetrované desky.

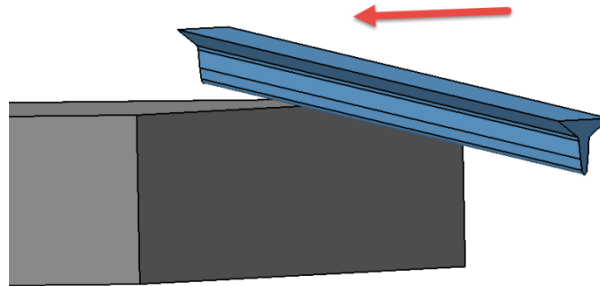


Obr. 30. Ilustrace možné sestavy experimentu

3.6.2.3. MKP simulace

Třetí variantou je jít podobnou cestou jako v kapitole 3.6.1.1 a vytvořit pro danou fázi zjednodušený model rozvinutý do roviny. V tomto případě by však na rozdíl od kapitoly 3.6.1.2 nebylo rozvinutí kompenzováno modelem roztažení válečku, neboť v tomto případě není efekt silnostěnné nádoby pravděpodobně tak markantní⁷. Dalším krokem je pak simulovat model nezjednodušený (šroub zajíždí do válečku kombinací rotace a translace).

⁷ Jde o pouhý odhad autora. Skutečnost by ukázaly až výsledky



Obr. 31. Ilustrace rozvinu připraveného k simulaci

V tomto případě by byl rozvinutý klínek šikmo orientovaný vůči plastové desce. To jaký úhel by svíral jeho náklon s penetrovanou deskou záleží na vrcholovém úhlu a na rozteči šroubovice.

3.6.3. Rozklad sil ve třetí fázi

V poslední části šroubování se k třecí síle způsobené především radiálním tlakem přidává třecí síla od předepínací síly a síla způsobená třením pod hlavou.

3.6.3.1. Tření pod hlavou

Pro výpočet tření pod hlavou využijeme klasický vztah popsany v kapitole 2.4

$$M_{th} = F_0 \cdot f_0 \cdot \frac{(D_h + d_d)}{2} \cdot \frac{1}{2} \quad (37)$$

kde M_{th} je moment z tření pod hlavou a F_0 předepínací síla, D_h průměr hlavy šroubu a d_d průměr díry.

3.6.3.2. Tření v závitech od předepínací síly

Tření v závitech od předepínací síly určíme podle vztahu (9) pro metrické šrouby v klasických spojích blíže popsáno v 2.4 a přizpůsobíme ho zde užívanému značení pro samotvářecí šrouby⁸

$$M_{tz} = F_0 \frac{d_2}{2} \operatorname{tg}(\gamma + \varphi') = F_0 \frac{r_1 + r_2}{2} \operatorname{tg}(\gamma + \varphi') \quad (38)$$

de φ' je třecí úhel a γ úhel stoupání šroubovice. [16]

3.7. Návrh výpočtu pro určení dosedacího momentu

Pro získání univerzálního vztahu pro výpočet dosedacího momentu vycházíme z rovnic, které jsme si odvodili v kapitole 3.6 a podle rovnice (11) je sečteme dohromady. Pro M_{1F} zde využijeme výsledek z obráběcích vztahů.

⁸ Aby ve značení nepanoval příliš velký zmatek, tak jsme pro samotvářecí šrouby nezaváděli střední průměr d_2 , jako tomu je u metrických šroubů, ale pouze provedli aritmetický průměr mezi poloměrem díry a jmenovitým poloměrem samotvářecího šroubu

Dostáváme:

$$M_D = f_0 \cdot \frac{D}{2} \cdot \left(\frac{E \cdot \Delta r_1}{r_1} + 2 \frac{p_2 \cdot r_e^2}{r_e^2 - r_1^2} \right) \cdot \left(2 \frac{r_1^2}{r_e^2 - r_1^2} + 1 + \vartheta \right)^{-1} \cdot 2 \cdot \pi \cdot D \cdot t \cdot \cos \gamma \cdot (n_2 - n_1) +$$

$$+ \frac{f_0 \cdot p_\xi \cdot 2 \cdot \pi \cdot \cos \gamma \cdot (n_2 - n_1) \cdot (r_2 - r_1)^3}{3 \cdot \cos \alpha} + f_0 \cdot p_v \cdot r_2^2 \cdot t \cdot 2 \cdot \pi \cdot \cos \gamma \cdot (n_2 - n_1) + M_{1F}$$
(39)

V rámci ověření dosadíme do vztahu parametry odpovídající šroubovému spoji s vnitřním průměrem 3,5 mm, vnějším průměrem 11 mm.

Tab. 2. Tabulka vstupních a výstupních hodnot

Výpočet momentu z lokálního radiálního tlaku	
d ₀ [mm]	3,5
S _v [mm ²]	8,932
S _ξ [mm ²]	14,978
S _{celk} [mm ²]	38,888
p celkový [Mpa] – tlak z MKP simulací	27,000 617 16
P _v [Mpa]	13,500 308 58
p _ξ [Mpa]	13,500 308 58
r ₂ =d/2 [mm]	2
r ₁ [mm]	1,75
f ₀ [1]	0,15
n [1]	6,5
γ [rad]	0,106 232 378
α [rad]	0,261 799 388
M _ξ [N.m] – třecí moment na šikmou plochu	0,443 432 963
M _v [N.m] – třecí moment na vrcholovou plochu	0,036 175 427
M _{2FL} [N.m] – výsledný lokální tlak na profil	0,479 608 39
Výpočet momentu ze skořepinového radiálního tlaku břitu domečku	
S _v [mm ²]	8,932
Δr ₁ [mm]	0,09
r ₁ [mm]	1,75
r _e [mm]	5,5
E [Mpa]	235
p ₂ [Mpa] – tlak okolí	0
ν [1]	0,37
M _{2FG} [N.m]	0,1902516
Přetvárný moment – viz tab. 1	
M _{1F} [N.m] – závitotvorný moment	0,036 225
Součet momentů a výsledný dosedací moment	
M _D [N.m] – před dosednutím	0,706

Zde uvedené hodnoty dosedacího momentu platí pro součinitel tření 0,15. S vyšším součinitelem tření roste i velikost dosedacího momentu. Pro hodnoty $f_0 \in \langle 0,15; 0,3 \rangle$ vyšlo rozpětí momentů $\langle 0,7; 1,37 \rangle Nm$.

Ve výpočtu došlo ke zjednodušenému použití tlaku, který byl získán MKP výpočtem. Tlak byl rozdělen rovnoměrně mezi šikmou a normálovou plochu (tzn. na normálové ploše panoval stejný tlak jako na obou šikmých plochách a jejich součet dával celkový tlak, který byl zjištěn programem ANSYS). Při dalším zpřesňování se použijí data z MKP tak, že se na profilu odečtou tlaky v jednotlivých místech a aproximací se mezi nimi vytvoří závislost, která se implementuje do vztahu (24) pro lokální radiální moment.

Hodnota Δr_1 také vychází ze stejné MKP simulace (viz 3.6.1.1).

Tab. 3. Poměrové rozložení jednotlivých složek v procentech

M_{2FS} [%]	26,945
M_{1F} [%] - podle obráběcích vztahů	5,130
M_{2FL} [%]	67,925

V dalších krocích by bylo možné vztah (39) rozšířit o další závislosti. Jednou z nich je akumulace tepla, které u plastu do značné míry ovlivňuje jeho mechanické vlastnosti a tudíž i působící tlak. Zároveň však platí, že čím větší tlak ve spoji panuje, tím více tepla ve spoji vzniká. Samotná akumulace tepla je pak do značné míry závislá na rychlosti šroubování (problematika popsána v kapitole 3.15). Změna teploty vlivem akumulovaného tepla pak mění i koeficient tření, viz 3.16.2.

Výsledky do značné míry ovlivňuje koeficient tření. Ten je ve zmíněných vztazích zadáván na základě znalostí a zkušeností kolegů ve firmě. I na to je potřeba se zaměřit při dalším bádání a zpřesňování uvedeného vztahu.

Z odstavců výše je zřejmé, že zde předestřený teoretický model (39) obsahuje v současné podobě velké množství zjednodušení a pro funkční použití ho bude potřeba sladit s praktickým měřením na základě velkého množství pokusů a dalších znalostí o chování materiálu za různých podmínek.

3.8. Pevnostní poměry samotvářecího šroubového spoje

Výše zmíněné síly nejenomže ve šroubovém spoji zvyšují utahovací odpor, jak je popsáno v kapitole 3.6., ale zároveň do něj vnášejí napětí, které může v krajním případě ohrozit jeho celistvost a nenávratně tak narušit funkci celého světla.

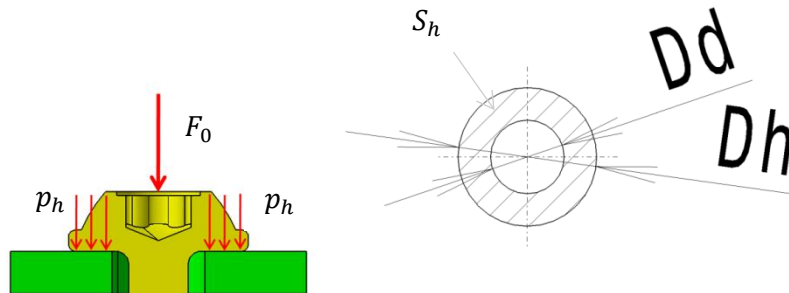
V této oblasti je klíčové působení na plastový materiál, neboť ocelové šrouby mají v porovnání s ním násobně vyšší mez pevnosti. I tak je potřeba nastínit silové poměry působící na šroub, neboť v některých specifických případech (např. vadný šroub), se mohou nepříznivě projevit.

Jednoznačně nejčastější vadou na šroubových spojích je otláčení pod hlavou. V případě neadekvátního utahovacího momentu pak zpravidla nastává strhnutí závitu.

Vzácnější poruchy dále popsány v této kapitole jsou v naprosté většině kombinací zde popsaných vlivů a dalších nešťastných okolností, jako je například způsob montáže, nesouosost dílců apod.

3.9. Otlačení pod hlavou

Předepínací síla působící na připojovaný díl vytváří na stykové ploše tlak, který může mít za následek deformaci materiálu v oblasti pod šroubovou hlavou.



Obr. 32. Ukázka odečtení dosedací plochy [24]

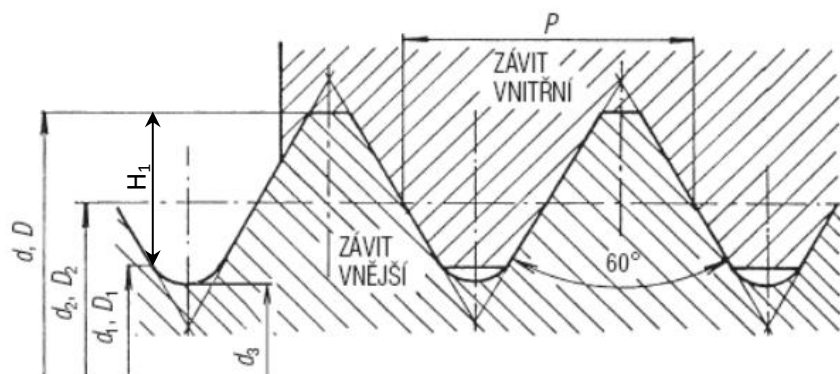
$$p_h = \frac{F_0}{S_h} \leq p_D \quad (40)$$

3.10. Strhnutí závitu

Obecně platí, že tlak v závitech by neměl přesáhnout dovolený tlak, aby nedošlo k jeho trvalému poškození.

Pro metrické šrouby se pak udává vztah podle [14]:

$$p_z = \frac{F_0}{S_p} \leq p_D \quad (41)$$



Obr. 33. Obrázek jmenovitých profilů vnějšího a vnitřního metrického závitu [16]

Kde S_p je průmět opěrné stykové plochy do roviny kolmé ke směru působení zatěžující síly. Opěrná plocha má tvar mezikruží; pro zjednodušení výpočtu se mezikruží převádí na obdélník, jehož délky stran odpovídají obvodu kružnice středního průměru d_2 a nosné výšce závitu H_1 . [14]

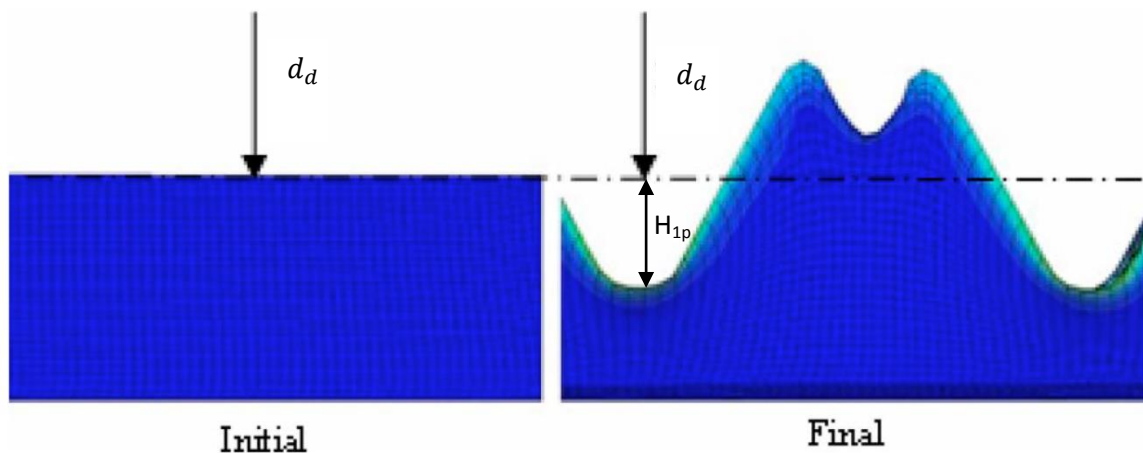
$$S_p = \pi \cdot d_2 \cdot H_1 \cdot z \quad (42)$$

$$H_1 = \frac{d - D_1}{2} \quad (43)$$

$$S_p = \pi \cdot d_2 \cdot \frac{d - D_1}{2} \cdot z \quad (44)$$

V případě samotvářecích šroubů je daná problematika opět složitější a to především proto, že přetvořený materiál může během procesu šroubování vykazovat jiné mechanické vlastnosti. To souvisí i s tím, že zde není zcela zřejmá geometrie, jako tomu je u metrických šroubů (více v kapitole číslo kapitoly o Toku materiálu).

V praxi se opět vychází především z provedených měření, doporučení výrobce a firemního know-how.



Obr. 34. Ukázka možné cesty v počítání tlaku v závitech [9]

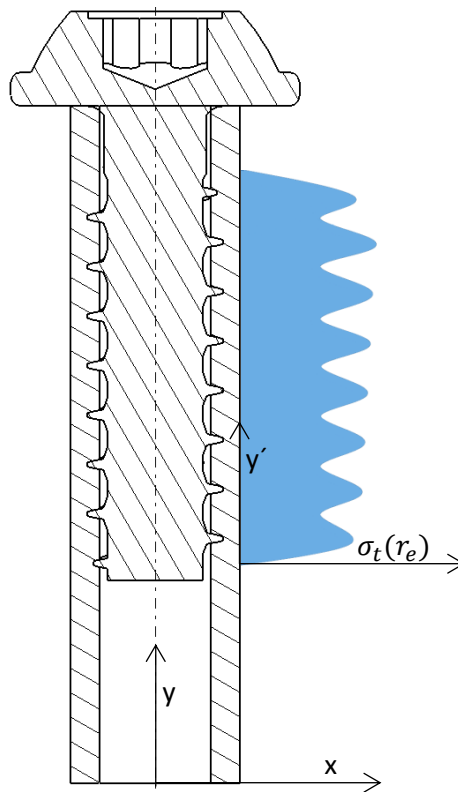
V dalších iteračních krocích analýzy samotvářecích šroubů autor této práce doporučuje srovnat naměřená data z destrukčních zkoušek se vzorcem (42) pro výpočet tlaku v metrických závitech, do kterého by se dosadila hodnota H_{1p} ⁹. Šlo by o ekvivalent vzdálenosti H_1 pro samotvářecí šrouby, který představuje rozdíl mezi vnitřním poloměrem díry a vnitřním poloměrem závitu. Označovali bychom ho jako H_{1p} . Závěry srovnání by pak stanovili způsobnost této úvahy.

3.11. Podélné prasknutí domku

Nastává v případě, kdy vnitřní přetlak přesahuje možnosti plastového domku. Dá se tomu předejít zvolením dostatečné tloušťky komínku. Vnější průměr se podle výrobců šroubů zpravidla doporučuje v rozmezí $(2-2,5) \cdot d$. Taková znalost je pro aplikaci v automobilovém průmyslu. Přesto však může nastat případ, kdy je potřeba pro jednotlivé průměry šroubů znát jejich limitní průměry přesně. Cenné by to bylo především za předpokladu, že by díky takové informaci bylo možné ušetřit velké množství peněz, například uspořením drahého materiálu. Za normálních podmínek však taková situace nenastává.

⁹ „P“ v indexu znamená, že jde pouze o teorii (pokus).

Podélné prasknutí domečku pak nastane v případě, že vnější $\sigma_{red}(r_e) > R_e$. V tomto případě však není tak snadné k problému přistoupit analyticky pomocí zjednodušení, jako jsme to udělali v kapitole 3.6.1.2. Vnitřní přetlak působí pouze v místech šroubovice. To znamená, že ve stejné vzdálenosti x od osy symetrie, ale v rozdílné výšce y , nepanuje v materiálu stejné napětí. Matematicky popsatelný způsob, jakým se napětí v nádobě šíří, autorovi této práce v tuto chvíli není znám, ale věří, že ho získat lze.



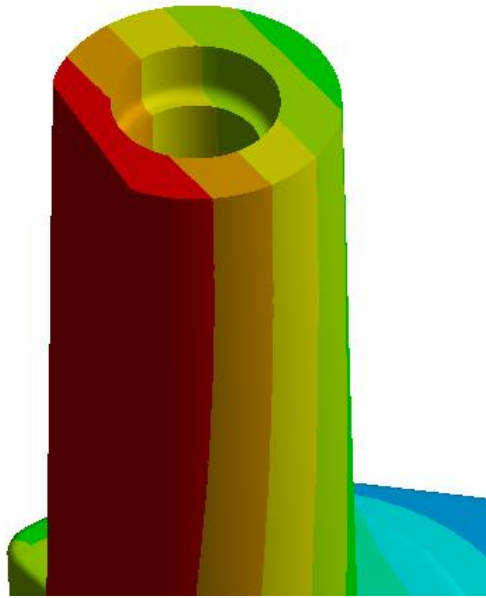
Obr. 35. Ilustrace domnělého šíření napětí od vnitřního přetlaku

Jednodušší a rychlejší způsob, jak u daného materiálu zjistit kritickou tloušťkou, je za pomoci experimentu. Ten by mohl vypadat například tak, že bychom za stejných podmínek exponovali vnitřním tlakem vybrané vzorky lišící se pouze vnějším průměrem. Stejně podmínky by pak znamenaly především shodný vnitřní průměr a stejný vstupující šroub. Takto namáhané domky bychom pak na vnějším průměru měřili několika tenzometry rozmístěnými v různých výškách.

3.12. Ukroucení domku

Jedná se o rizikový bod, který je spíše vzácný, ale je potřeba ho mít na paměti zejména ve fázi návrhu. Celé světlo se sestává z desítek komponent s rozličnými funkcemi, které se musí všechny vejít do prostoru určeného pro světlo a zároveň splnit všechny funkční a estetické požadavky. Designer, který si není vědom limitů ze stran šroubového spoje, tak získá cenný prostor ve světle například atypickým tvarem plastového domečku. Pokud takový tvar znamená například ubrání materiálu v kořenu domečku, může mít

krouticí moment, vnesený do spoje šroubováním a utahováním, pro světlo fatální důsledky. V praxi se například stalo, že jinak válcový domek obsahoval svislé zkosení, a vlivem dalších nešťastných faktorů, jako nesouosost spojovaných dílců a jejich vzájemné vůle, vzniklo ve spoji kombinované namáhání, konkrétně kombinace tahu, krutu a částečně i ohybu.



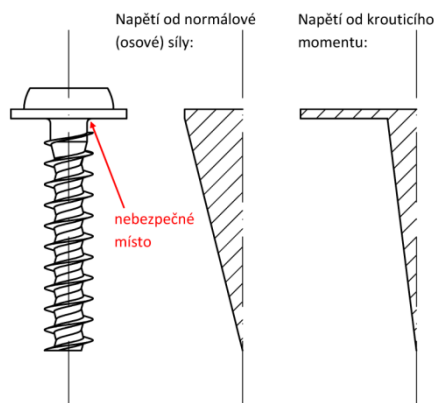
Obr. 36. Ukázka pouzdra vystaveného kombinovanému namáhání

V praxi se většinou namáhání počítá pro konkrétní díl pomocí metody konečných prvků, ale v rámci zevrubné analýzy, kde neuvažujeme složitější kombinované namáhání, lze zmínit analytický výraz pro určení dovoleného krouticího momentu

$$M_k \leq \frac{\tau_D \cdot \pi \cdot d_e^3}{16} \quad (45)$$

3.13. Namáhání šroubu

Šroub je v předepjatém spoji namáhán na tah a krut



Obr. 37. Namáhání šroubu [13]

Normálové napětí se vyjádří jako:

$$\sigma_n = \frac{4 \cdot F_i}{\pi \cdot d_3^2} \quad (46)$$

Napětí od krouticího momentu pak podobně jako pro krouticí moment komínku:

$$\tau_k = \frac{16 \cdot M_k}{\pi \cdot d_2^3} \quad (47)$$

a z toho dostaneme například podle teorie HMM redukované napětí:

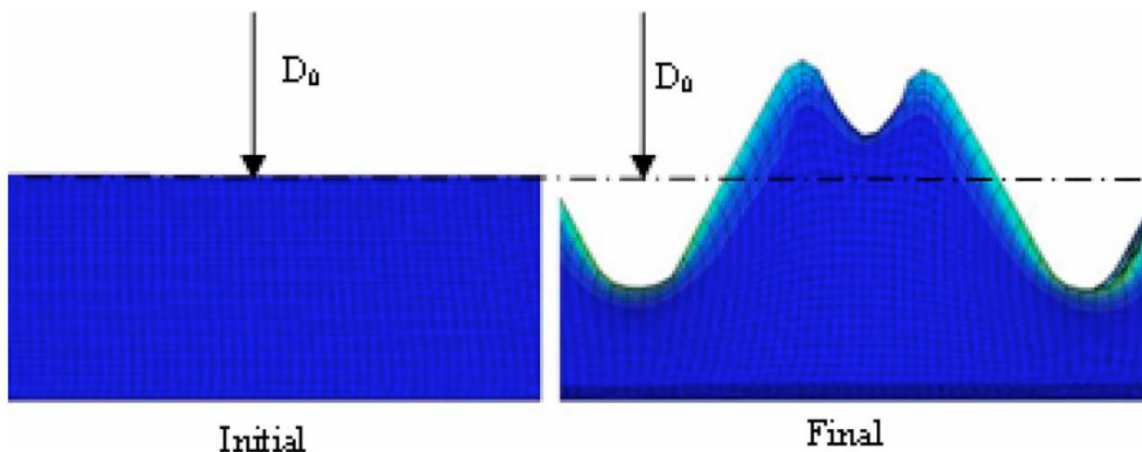
$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_n^2 + 3 \cdot \tau_k^2} \quad (48)$$

Pro získání statické bezpečnosti pak porovnáme redukované napětí s mezí kluzu materiálu a dostaneme:

$$k = \frac{R_e}{\sigma_{red}} \quad (49)$$

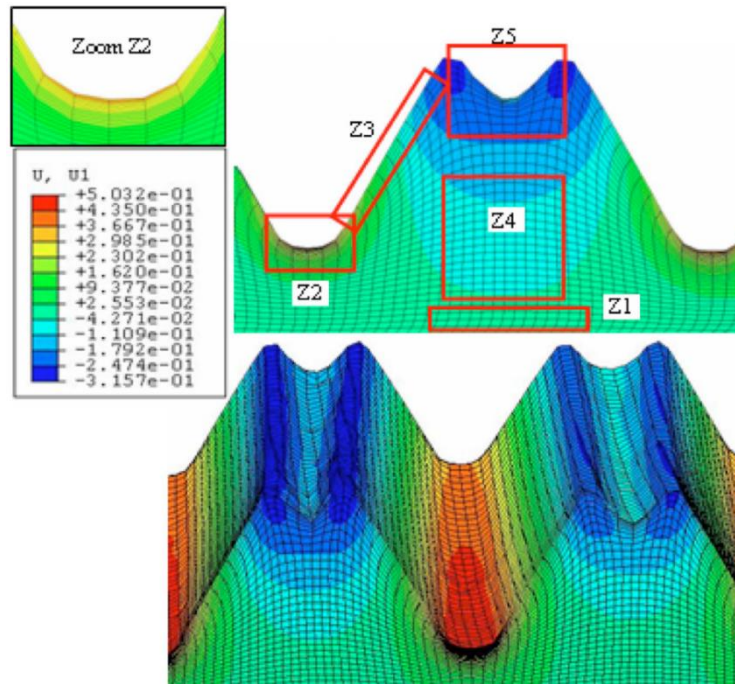
3.14. Tok materiálu při šroubování

K pochopení všech sil, které působí na samotvářecí šroub, je klíčové porozumět způsobu tváření závitu v daném plastu.



Obr. 38. Tok materiálu po zašroubování vzhledem k ose otáčení [9]

Tím, že se jedná o tváření, nevzniká žádná tříska, která by propadala na dno komínku, ale veškerý materiál, který nelze již více plasticky zdeformovat, je podle zákona zachování objemu vytlačen do prostoru mezi dírou a dříkem závitu, což je vidět na obr. 38.



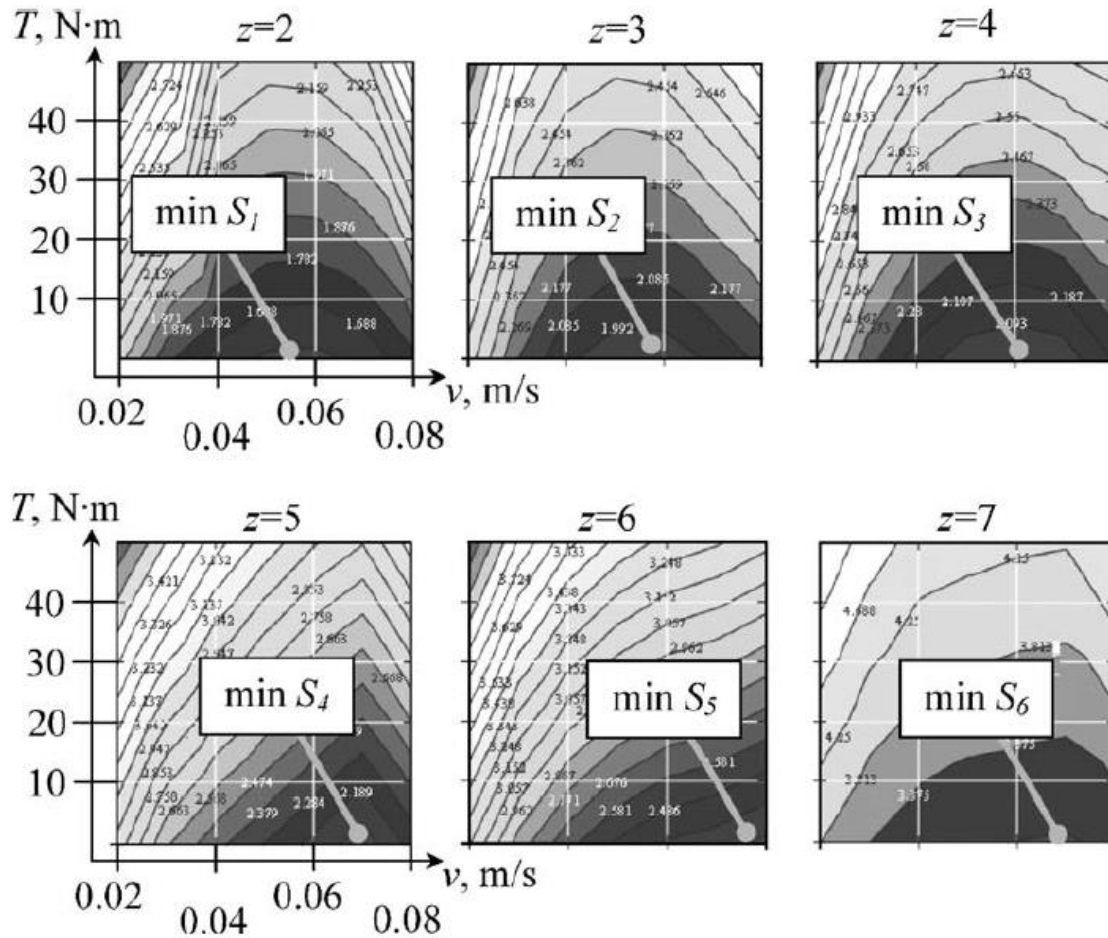
Obr. 39. Vyznačení oblastí s největším napětím [9]

Na Obr. 39 jsou rozděleny oblasti zasažené tvářením závitů, podle toho, jaké v daném místě panuje napětí. Obrázky vznikly MKP simulací v programu Abaqus [9].

3.15. Vliv rychlosti šroubování

Podle článku [8] může optimální volba rychlosti šroubování samotvářecích šroubů snížit potřebný moment o (15–20) % a zároveň pomoci vytvořit uniformnější závit s předpokládatelnými vlastnostmi.

Experimenty ukázaly, že se stoupající rychlostí šroubování klesá potřebný krouticí moment na určitou limitní hodnotu. [8]



Obr. 40. Ukázka výpočtu efektivní hodnoty pro samotvářecí závit v hliníkové slitině [8]

$$S = \alpha_1 k_1 M + \alpha_2 k_2 E + \alpha_3 \frac{k_3}{v} + \alpha_4 \frac{k_4}{\eta} \quad (50)$$

Kde:

S – funkce efektivity

M – moment [Nm]

E – spotřeba energie [J]

α_{1-4} – váhový faktor základních elementů [1]

k_{1-4} – sada parametrů pro funkci efektivity [1]

η – koeficient zaplnění závitové části [1]

v – obvodová rychlost [m/s]

Výše uvedená rovnice určuje efektivní funkci v závislosti na rychlosti utahování, momentu a energetické spotřebě. Ty se zvolí tak, aby tato hodnota byla co nejnižší. Díky ní se pak určí ideální poměr obvodové rychlosti a vynakládaného momentu.

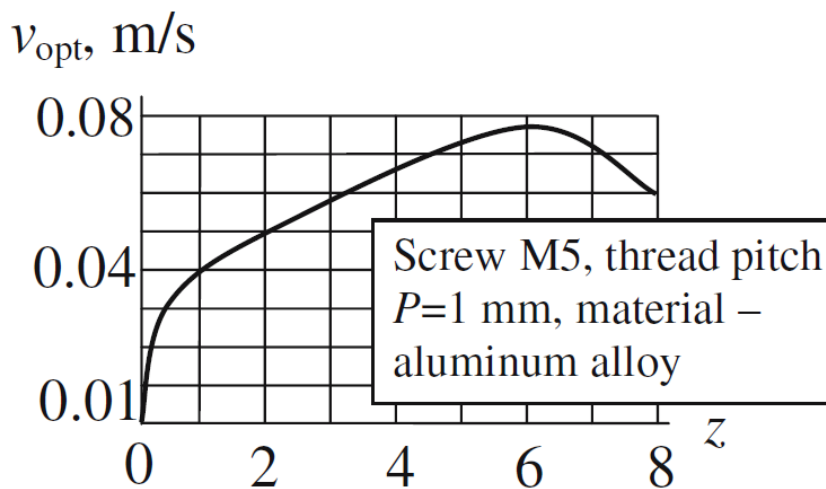
V rámci firmy Automotive Lighting platí teoretický standard utahovacího momentu v obvyklém rozmezí 400-500 otáček za minutu.

Jiné odborné články, jako například [9], oproti tomu považují rychlost šroubování za zanedbatelnou a jako klíčové faktory uvádějí pouze poměr velikosti díry ku velikosti

šroubu. Všechny zmíněné materiály se zabývají především šroubováním do měkčích kovových materiálů, jako je například hliník a jeho slitiny.

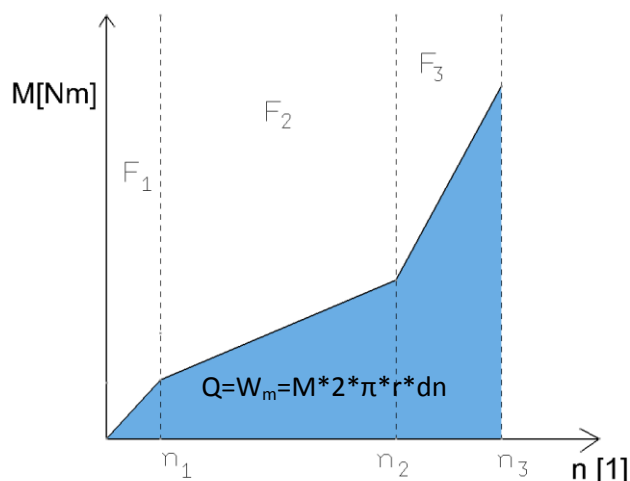
Článek [8] nahlíží na problematiku rychlosti šroubování čistě z mechanického hlediska a generovaný moment v závislosti na rychlosti konfrontuje s elektro-fyzikálním chováním elektrického šroubováku

Dalším fenoménem, pojmím se s optimalizací šroubovací rychlosti je její kontinuální řízení po celou dobu šroubování. Z grafů na obr. 40 mimo jiné vyplývá, že efektivita šroubování je závislá na počtu chodů závitu, které již vstoupily do materiálu, což popisuje obr. 41.



Obr. 41. Ideální průběh rychlosti šroubování podle článku [8] pro slitinu hliníku

V případě polykarbonátu, který má v porovnání se zmíněným hliníkem zhruba třikrát menší teplotu tání, je však potřeba brát v potaz ještě teplo, které vzniká vzájemným třením dvou materiálů, což potvrzují už dříve provedené experimenty¹⁰.



Obr. 42. Obrázek momentové charakteristiky s vyznačenou mechanickou energií, která se ve spoji mění na energii tepelnou

¹⁰ Měření provedená ve firmě Automotive Lighting v roce 2010 bez autorovi přítomnosti

Teplu generované ve spoji odpovídá práci vložené do spoje na překonání odporových (třecích) sil, neboli:

$$Q = W_t = \frac{dM}{d\varphi} \quad (51)$$

Takto vzniklé teplo působí na stlačený plastový materiál a uvolňuje v něm napětí způsobené válcováním závitu. Tím, že se sníží elastické a elasticko-plastické napětí, sníží se i tlak, jež na šroub působí, díky čemuž pak je rovněž nižší nárok na šroubovací moment.

Z obr. 42 vyplývá, že kdybychom měli jednotlivé fáze momentové charakteristiky popsané rovnicí, tak stačí tyto úseky integrovat podle φ a získáme teplo v Joulech (v případě dodržení SI jednotek).

To, jakým způsobem se vzniklé teplo šíří spojem a ovlivňuje jeho mechanické vlastnosti, záleží na rychlosti šroubování:

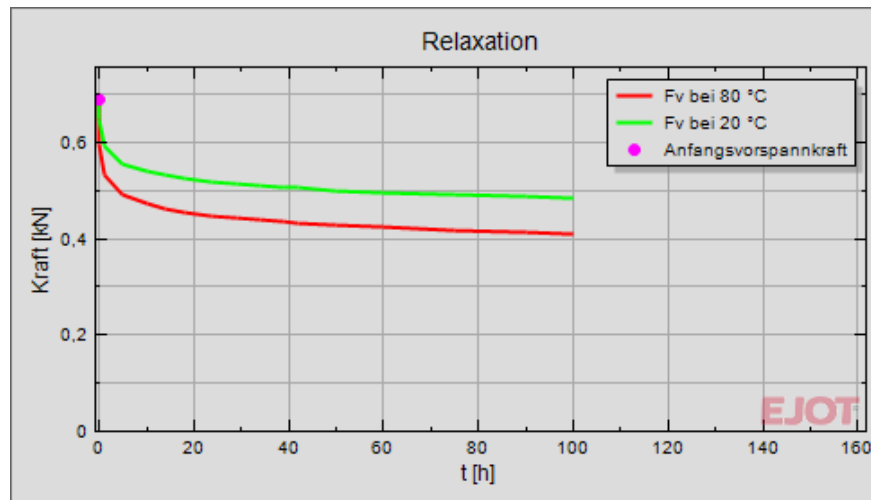
$$\dot{Q} = P_t = \frac{dW_t}{dt} \quad (52)$$

Čím rychleji teplo ve spoji vznikne, tím více se ho akumuluje v místě vzniku, neboť ho systém nestačí odvádět. Akumulace tepla ve styku šroubu a penetrovaného materiálu tedy závisí na rychlosti šroubování (rychlost přívodu tepla) a na kondukčním vedení tepla v obou materiálech (rychlost odvodu tepla). Pokud bychom o této závislosti chtěli vědět víc, bylo by nutné vytvořit odpovídající model i na tuto problematiku.



Obr. 43. Ukázka nataveného materiálu vlivem malého průměru otvoru

Snížení napětí v plastovém domku vlivem teplotní relaxace má negativní vliv z hlediska velikosti předepínací síly .



Obr. 44. Ukázka relaxace předepínací síly ve spoji dle teploty a času, převzato z návrhu šroubového spoje firmy EJOT

V případě plastových spojů má teplo vznikající v závislosti na šroubovací rychlosti vliv na koeficient tření, který výrazným způsobem ovlivňuje celý proces šroubování. Celý proces trvá řádově desítky vteřin, což je velmi krátká doba, nicméně teplo vzniká přímo mezi vzájemně se pohybujícími objekty

Pokud je tepelné ovlivnění v okolí plastového závitu příliš velké, může se dále stát, že závit v důsledku změněných mechanických vlastností (tím, že je například blízko teploty tání) nevydrží předepínací sílu, na kterou byl původně šroubový spoj navržen, a dojde tak k defektu.

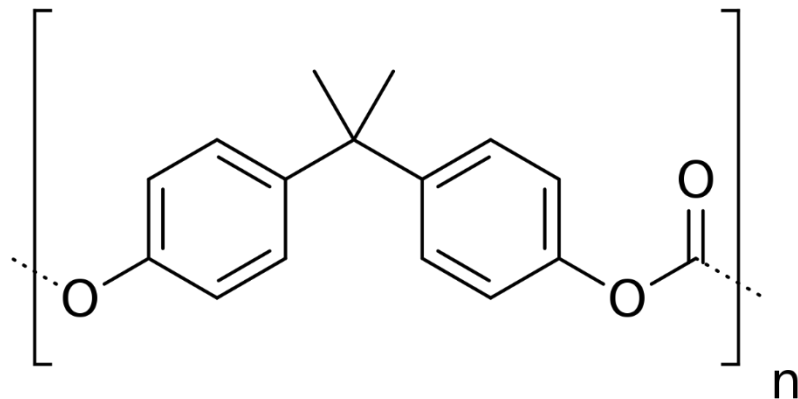
Pro shrnutí tedy:

- 1) Čistě z mechanického hlediska v ideálním modelu (bez vad spjatých s realitou) při konstantním tření vliv rychlosti nehraje roli
- 2) V reálném prostředí, při uvažování efektivity elektrického šroubováku bez uvažování teplotního vlivu, ovlivňuje rychlost šroubování výsledný utahovací moment a tím šetří elektrickou energii vynaloženou na šroubování
- 3) U plastových spojů je vliv rychlosti šroubování nezanedbatelný, neboť teplotně ovlivněný materiál vykazuje jiné mechanické vlastnosti než stejný materiál bez teplotního ovlivnění

3.16. Vlastnosti polykarbonátu

Polykarbonát (dále PC) patří mezi termoplasty. Díky tomu, že taje za poměrně nízké teploty (pro PC je to kolem 260°), snadno se zpracovává například vstřikováním nebo lisováním za tepla [23]. Tohoto stavu lze na rozdíl od reaktoplastů dosahovat opakovaně, což je velmi důležitý faktor i v problematice samotvářecích šroubů ve světloometech. Šroubový spoj se může zahřát buď rychlým šroubováním (jak je popsáno v kapitole 3.15) nebo v některých případech samotným světelným zdrojem.

Má dobrou odolnost proti nárazu. Může být transparentní, což závisí především na konkrétních příměsích

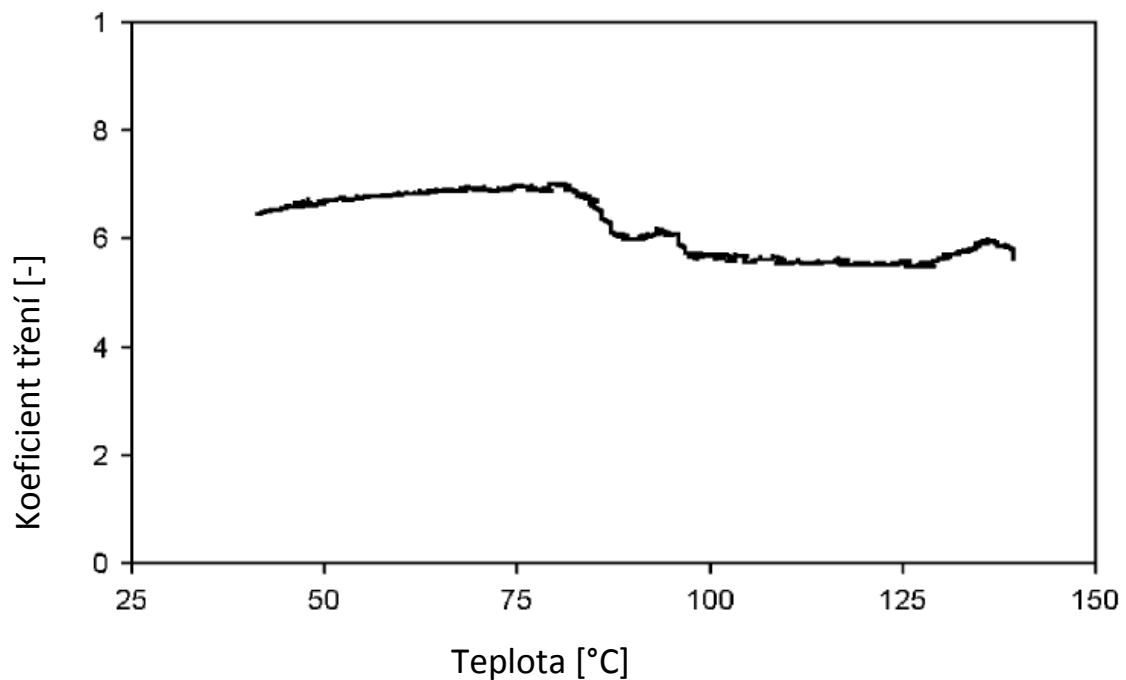


Obr. 45. Opakující se základní jednotka polykarbonátu vytvořena z bisfenolu A [21]

3.16.1. Vlivy na pevnostní vlastnosti polykarbonátu

Zásadní vlastností PC z hlediska problematiky samotvářecích šroubů je jeho zplastizování za určité teploty (teplota skelného přechodu; u PC se pohybujeme kolem 150°) [23]. Jakmile se totiž plast stane vlivem energie z dodávané práce tvárným, ztrácí napětí, které do něj šroub vnáší. Zároveň ale experimenty dokumentované v článku [11] prokázaly, že kombinace vlivů teplotního a mechanického působení snižuje v polykarbonátu mez kluzu a naopak zvyšuje jeho houževnatost.

3.16.2. Vlivy na třecí vlastnosti polykarbonátu



Obr. 46. Koefficient tření polykarbonátu Lexan 101R v závislosti na teplotě zdroj [11]

Faktorů obecně ovlivňujících třecí koeficient mezi dvěma materiály je mnoho, viz kapitola 2.3. Konkrétně u polykarbonátu má na něj kromě jiného značný vliv teplota a velikost mechanického zatížení (tedy velikost normálové síly), což dokazují i experimenty, viz [11].

Závislost vyobrazená na obr. 46 byla zjištěna pomocí rotačního disku, kde klouzající hrot byl tvořen nerezovou ocelí 100Cr6, jejíž průměrná drsnost činila $0,1 \mu\text{m}$ a vůči polykarbonátovému kotouči se pohyboval rychlostí $0,1 \text{ m/s}$ při normálovém zatížení $1,5 \text{ MPa}$.

Konkrétní hodnoty součinitele tření zjištěné v [11] pro naše účely nejsou příliš vhodné. Koeficient tření mezi námi zkoumaným typem polykarbonátu a povlakovaným samotvářecím šroubem se pohybuje zhruba mezi hodnotami $0,15$ a $0,3$.

3.17. Experimentální měření

V rámci této práce byly provedeny dvě série experimentů. Pokusy spočívaly v opakovaném šroubování samotvářecích vrtů do polykarbonátových válečků o různých vnitřních průměrech. První experiment byl koncipovaný jako úvodní vzhled do problematiky a jeho cíl spočíval ve stanovení limitů navrženého měření. Druhý experiment vycházel z jeho poznatků a měl za cíl je ještě rozšířit a to ověřením velikosti utahovacího momentu po opakovaném zašroubování šroubu.



Obr. 47. Ukázka použitých šroubů a testovaných vzorků

3.17.1. Vzorky a použité přístroje

Pro oba experimenty byly použity šrouby značky Ejoyt, jelikož podle dřívějších zjištění [5] dosahují nejvyšší kvality. Díky tomu vnáší do měření menší chybu.

Měření pak bylo provedeno sestavou přístrojů Atlas Copco a jeho průběh bylo možné v přímém čase sledovat na počítači skrze uživatelské rozhraní. Samotná měřící

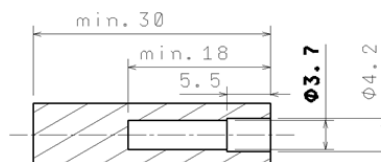
sestava se skládá z digitálního šroubováku ETD SL21-04-I06-PS se zpětnou vazbou a řídicí/vyhodnocovací jednotky PF 4002-G-HW verze Graph.



Obr. 48. Pracoviště s měřící sestavou

Válcové vzorky, do kterých se vrut šrouboval, byly vyrobeny z polykarbonátové tyčoviny. Jejich tvorba se skládala z vyvrtání díry pro šroub, vyvrtání osazení a následného upíchnutí. Jednotlivé vzorky se od sebe lišily pouze vnitřním průměrem.

Délka zašroubování 9,5 mm



Vzorek 6

Obr. 49. Ukázka výkresu vzorku

3.17.2. Experiment č. 1

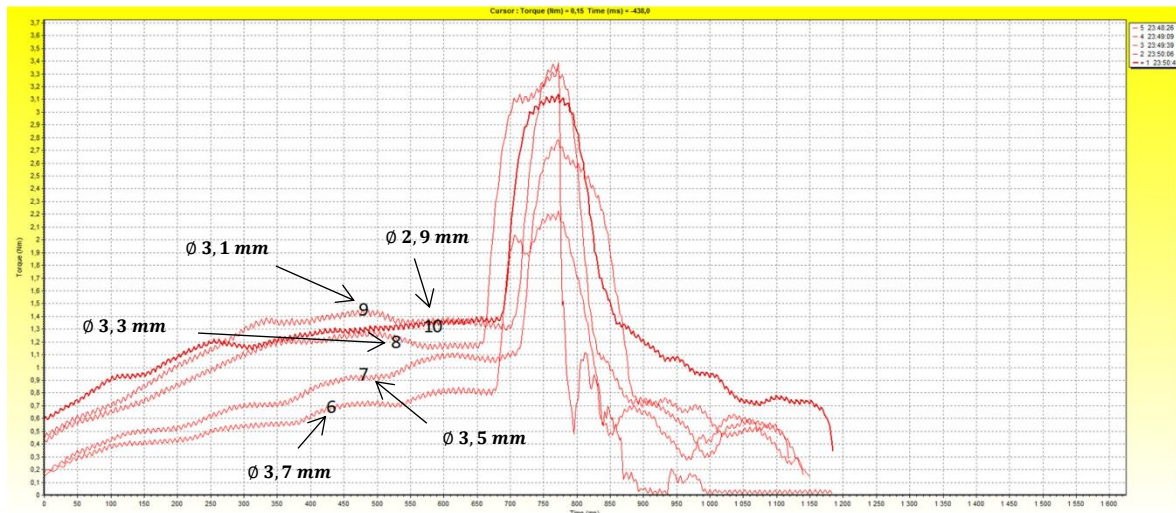
Měření celého průběhu utahovacího momentu v závislosti na rozdílných průměrech otvorů domečků.

K měření byly použity dvě sady výše popsaných válečků, z nichž každá obsahovala pět vzorků o vnitřních průměrech (2,9; 3,1; 3,3; 3,5; 3,7) mm. Těmto průměrům odpovídalo označení vzorků od 6 do 10 kde 6 je největší průměr o velikosti 3,7 mm a vzorek s číslem 10 je průměrem nejmenší.¹¹,

¹¹ Původní vzorky 1–5 byly po úvaze z experimentu vyčleněny

Během měření došlo u některých válečků k protáčení z důvodu nedostatečné upínací síly. I proto bylo první měření spíše orientační. Všechny zde uvedené grafy jsou z měření, která probíhala standardně.

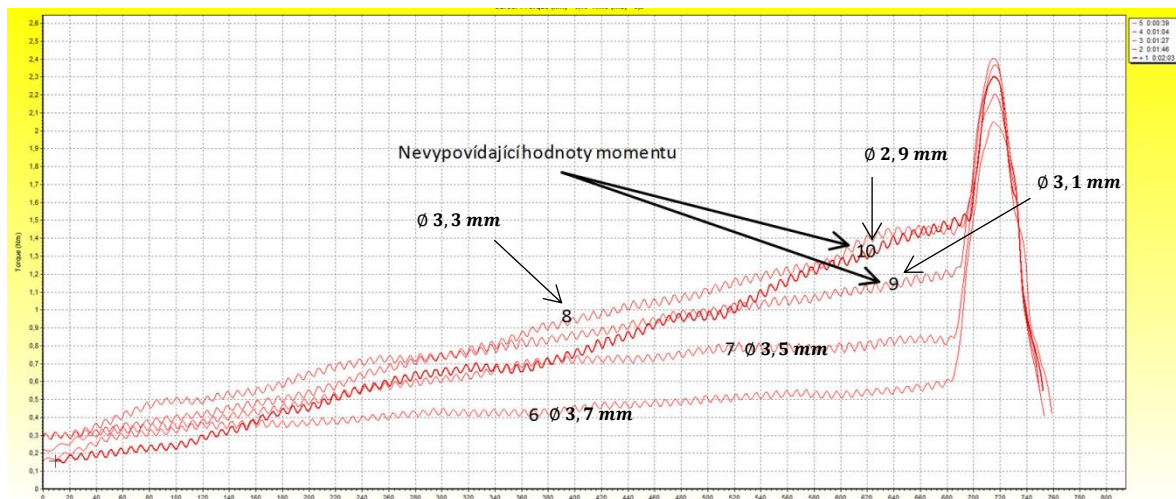
Měření provedené na první sadě bylo destruktivní a ve všech uvedených případech došlo při překročení únosného momentu ke stržení závitu



Obr. 50. První měření – destruktivní – protočení spoje
9. A 10. Vykazují anomálie v průběhu, vysvětlení pod obrázkem č. 52

Na všech zde uvedených grafech je na horizontální ose čas v sekundách a na vertikální velikost vynakládaného momentu v $N \cdot m$.

Z měření je zřejmé, že čím menší průměr domečku, o to větší moment musíme na utahování vynaložit.

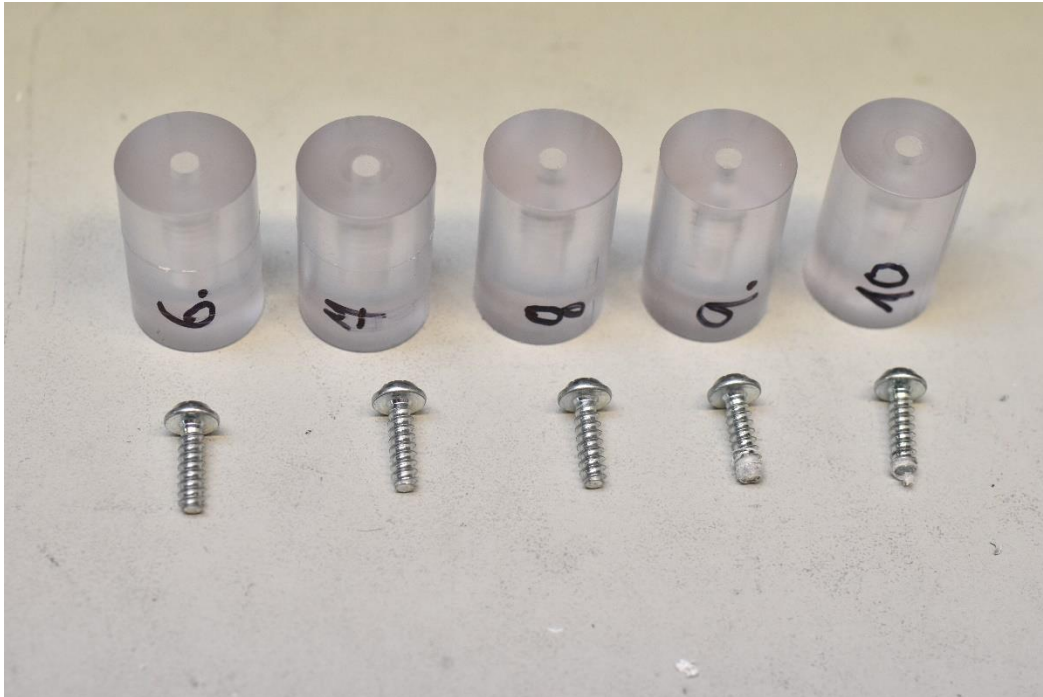


Obr. 51. Druhé měření – nedestruktivní dotažení šroubu
Zejména šroub 9 vykazuje anomálii v průběhu

Křivky 9 a 10 odpovídající průměrům 3,1 mm a 2,9 mm jsou v grafu na obr. 51 označeny jako nevyhovující, jelikož velikosti jejich momentů jsou menší než hodnoty momentů pro křivku 8, tedy průměr 3,3 mm. Pro neobvyklost průběhů křivek 9 a 10 je vysvětlení nasnadě, jelikož se jedná o menší nežli doporučené průměry otvorů,

což v kombinaci s dalšími faktory způsobuje neustálé rozdíly v momentových charakteristikách. V grafech je nutno posuzovat celkový průběh.

Všechny vruty se po zašroubování znatelně zahřály, což bylo cítit pouhým dotykem. Na vzorcích s vnitřními průměry 3,1 mm a 2,9 mm po strhnutí závitu zůstal zbytek nataveného materiálu.

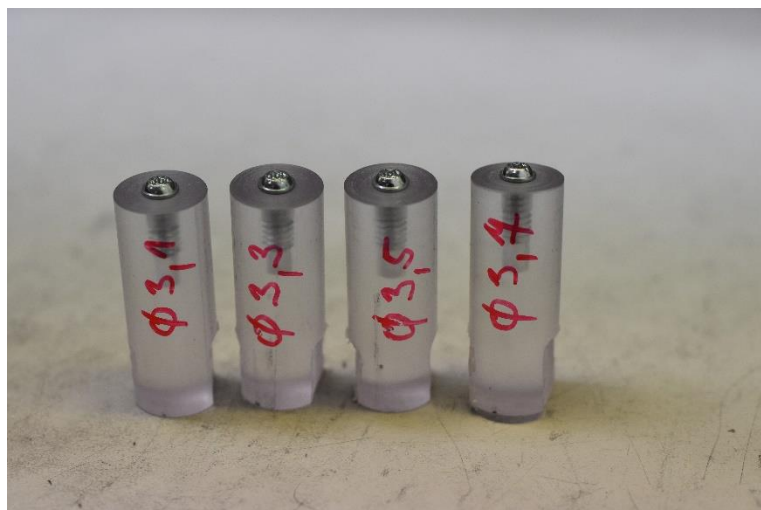


Obr. 52. Vzorky o průměrech (3,7-2,9) mm (zleva) a jim náležící šrouby o průměru 4 mm

3.17.3. Experiment č. 2

Cílem bylo ověření velikosti utahovacího momentu po opakovaném zašroubování šroubu.

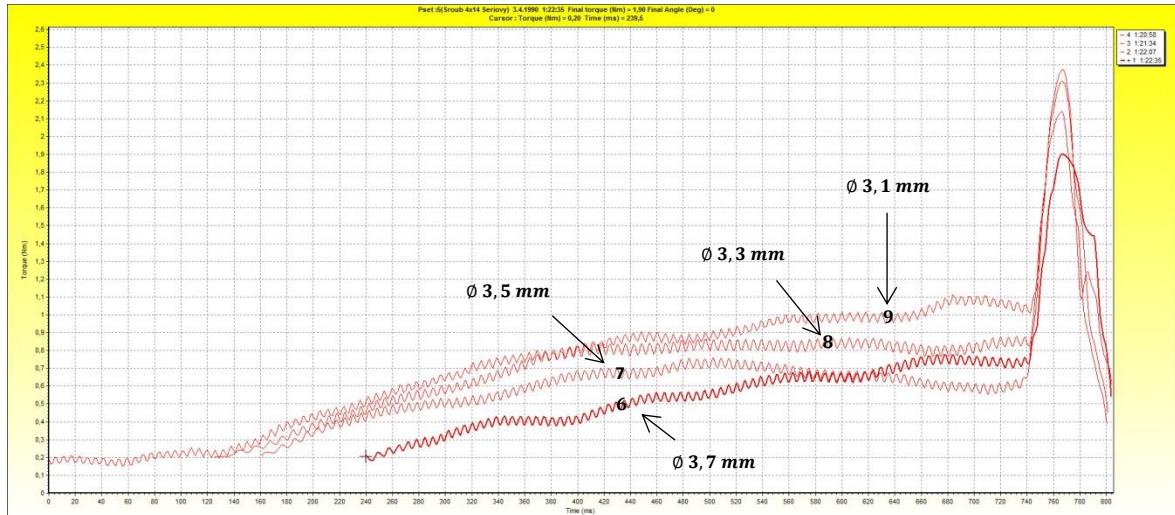
Aby nedocházelo k protáčení jako v experimentu č. 1, byly konce válečků prodlouženy a z boku upilovány, aby byla vytvořena dostatečná styčná plocha.



Obr. 53. Prodloužené válečky s vybroušenými plochami

Pro měření byly opět použity dvě sady válečků, avšak tentokrát byl na základě předchozího vynechán vzorek s vnitřním průměrem 2,9 mm, jakožto málo vypovídající. V praxi se takto malý průměr stejně nepoužívá.

První sada měření byla použita ke srovnání průběhů utahovacích momentů podle jednotlivých průměrů a zároveň sloužila jako rezerva v případě defektu v sadě druhé. Maximální utahovací moment byl nastaven $2,0 \text{ N} \cdot \text{m}$, aby nedošlo k destrukci závitu.

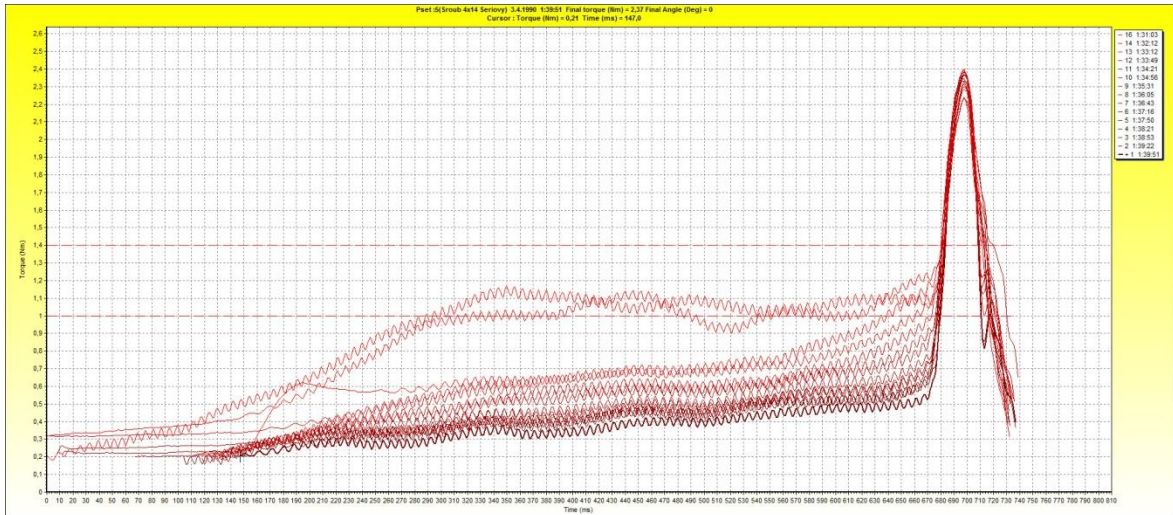


Obr. 54. Srovnání naměřených utahovacích momentů podle vnitřního průměru otvoru, graf odpovídá průběhům obr. č. 52

Z grafu na obr. 54 je vidět, že velikost dosedacího momentu je mimo jiné závislá na velikosti penetrované díry.

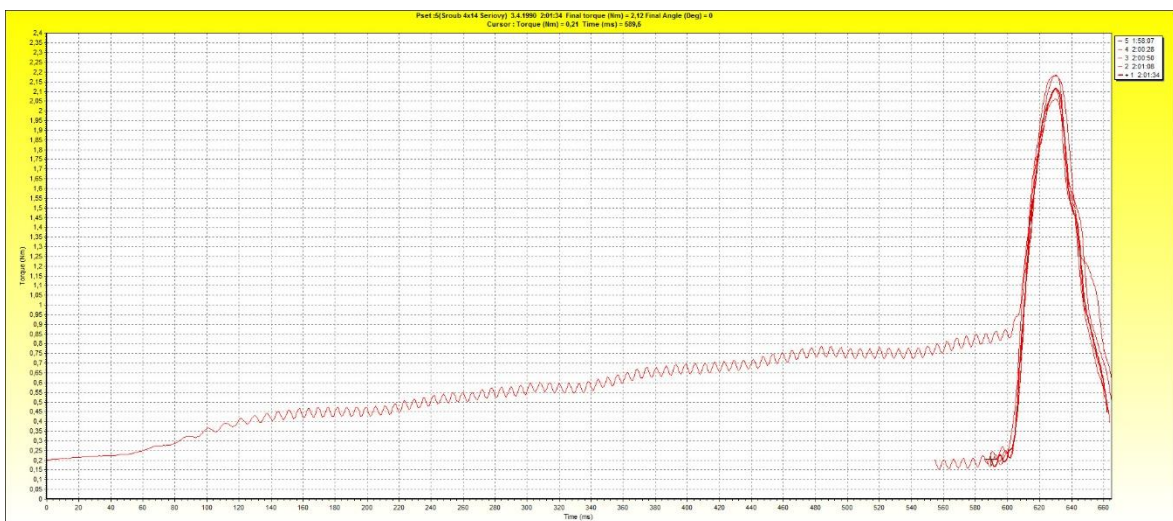
Druhá série vzorků měla za cíl dokázat přítomnost napětí v materiálu, které v daném vzorku přetrvává i po opakovaném šroubování. Aby nedošlo k poškození závitu, tak se před každým dalším šroubováním vrut pouze povytočil a po celou dobu měření tak byl šroub v nepřetržitém kontaktu s penetrovaným vzorkem. I v tomto případě byl z důvodu prevence stržení omezen maximální moment.

Nejdůležitější poznatek celého měření vyplynul mj. z experimentu, ve kterém 15x zašroubován do stejného vzorku a jeho dosedací moment po patnáctém zašroubování klesnul z $1,3 \text{ N} \cdot \text{m}$ na $0,5 \text{ N} \cdot \text{m}$.



Obr. 55. Vzorek o průměru 3,1 mm, do kterého byl 15x zašroubován a znovu vyšroubován samotvářecí vrut

Všechna provedená měření v druhé sérii měla podobný průběh. Vynakládány moment s každým dalším šroubováním postupně a pravidelně klesal. U průměru 3,1 mm a 3,3 mm se měřený moment ustálil zhruba po 12. měření a pak už vykazoval stejný průběh.



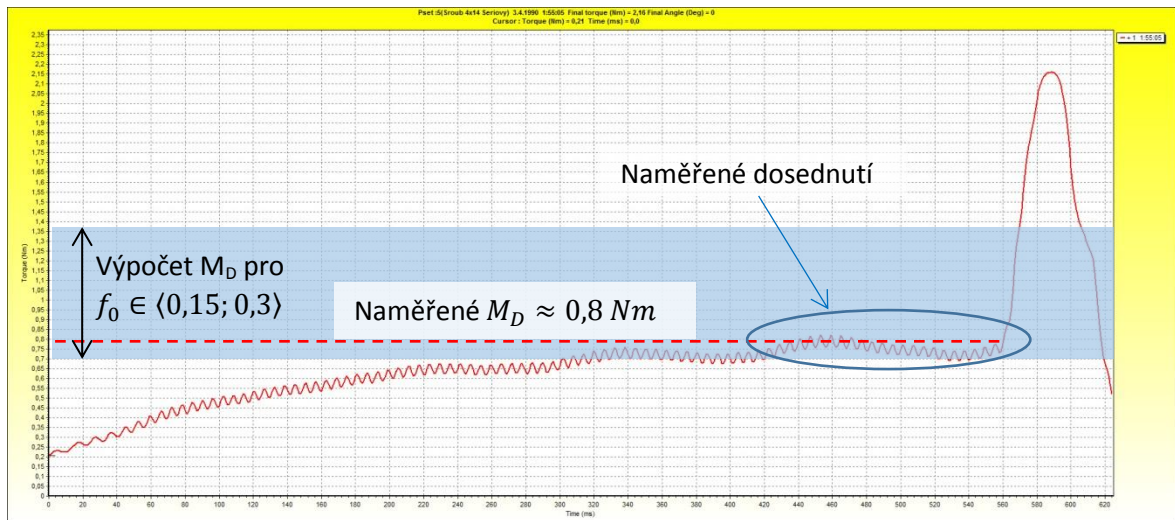
Obr. 56. Momentová charakteristika pro vnitřní průměr 3,7 mm

U větších průměrů, kde panují menší odporové síly, už po pátém opakování nebylo možné změřit celou momentovou charakteristiku, jelikož se momenty pohybovaly pod měřitelnou hranicí $0,2 \text{ N} \cdot \text{m}$. Takto velké průměry v porovnání se jmenovitým průměrem šroubu se však v praxi nepoužívají a jejich role v měření byla spíše komparativní a informativní. Přesto však i zde byl zaznamenán dosedací moment. **Co je tedy důležitým výstupem z měření, utahovací moment ani po opakovaných zašroubování šroubu nikdy neklesnul k nulové hodnotě.**

Provedená měření prokázala, že v závitě přetrvávají nezanedbatelné odporové síly i po opakovaném pronikání šroubu. To dokazuje, že i po vytvoření závitů působí ve spoji

elastické deformace, což podporuje výše provedené teoretické úvahy o silových poměrech v samotvářecích šroubech.

3.18. Porovnání naměřených a vypočtených hodnot



Obr. 57. Momentová charakteristika pro vnitřní $\varnothing 3,5 \text{ mm}$

Pro srovnání naměřených a vypočtených hodnot byl vybrán vzorek o vnitřním průměru 3,5 mm, jelikož právě pro tento průměr bylo v době dokončení této práce nejvíce MKP simulací klínu pronikajícího do plastového materiálu.

Modře vyznačená oblast symbolizuje hodnoty vypočítané podle zde sestaveného vztahu (39), jejichž velikost je závislá na koeficientu tření. Zvolený rozsah součinitele tření pak odpovídá rozmezí, ve kterém se tento koeficient pro dané materiály pohybuje.

Z grafu je patrné, že se naměřený moment v této oblasti nachází, což je velmi pozitivní zpráva a signál, že úvahy představené v této práci míří správným směrem. Aby mělo uvedené srovnání vyšší informační hodnotu, než pouze signalizační, bylo by potřeba provést mnohem větší počet měření a z něj následně na základě statistického porovnání vykreslených křivek usuzovat konkrétnější závěry.

Předpokládá se, že pokud by se nějakým způsobem podařilo do vzorce zahrnout tepelné ovlivnění materiálu vlivem šroubovací rychlosti, tak celá modrá oblast klesne o něco níž. V tuto chvíli jde však o pouhý odhad.

4. Závěr

Cílem práce bylo popsat průběh a analytické určení utahovacího momentu samotvářecího předepjatého šroubového spoje se zaměřením na oblast momentu odpovídajícího okamžiku dosednutí hlavičky šroubu na spojovaný dílec. V rámci práce byl proces šroubování rozčleněn na tři fáze (zavedení břitu; šroubování; předepínání). Každé z nich se věnovala zvláštní pozornost z hlediska výpočetních možností a omezení. Na základě těchto fází byla sestavena první verze univerzálního vztahu pro výpočet dosedacího momentu (pro fázi šroubování), kdy zvolená metodika kombinuje jak analytickou tak experimentální formu s cílem vytvoření výsledného zjednodušeného matematického vztahu pro výpočet dosedacího momentu. Přičtením známých vztahů pro předepínací sílu lze pak tento vztah snadno upravit na výpočet celkového utahovacího momentu.

Experimentální srovnání naměřených hodnot vzorků šroubových spojů ukázala, že vytvořený vzorec pro výpočet dosedacího momentu vykazuje hodnoty blížíící se měřením reálných vzorků. Je ale potřeba si uvědomit, že uvedený vztah, respektive matematický model, je sám o sobě analytický, ale v tuto chvíli část jeho vstupů vychází z dat získaných MKP simulací pro jeden konkrétní materiál. Stále však jde o první verzi takového vztahu, která v současném stavu obsahuje velké množství zjednodušení.

Na základě této práce jsou doporučeny další kroky pro společnost ALCZ jak postupovat pro zpřesnění výpočtového modelu. První krok v dalším postupu souvisí se zpřesněním silové charakteristiky spojené s vlačováním břitu (část „lokálního tlaku na břit“ ve fázi šroubování). K tomu se použije stejná MKP simulace, jaká byla popsána v kapitole 3.6.1.1. Získaná data se aproximují křivkou, již je možné popsat rovnicí, a její předpis se implementuje do vztahu pro třecí moment od „lokálního radiálního tlaku na břit“.

Druhým souvisejícím krokem je zpřesnění tlakové charakteristiky spojené s „nafukováním“ domečku šroubu během fáze šroubování (část „skořepinového tlaku“). Je nutné ověření úvah a zejména pak vyčíslení chyby, které se dopouštíme využitím analogie s lisováním.

Důležitým faktorem, který zatím ve vztahu není nijak ošetřen, je vliv rychlosti akumulace vytvářeného tepla, jež souvisí s rychlostí šroubování. Stejně tak další důležitý faktor tření představuje v tomto dynamickém ději proměnlivou hodnotu, a jeho zpřesnění vyžaduje další výzkum z oblasti tribologie.

Tato práce představuje funkční koncept výpočtového modelu jedné z fází průběhu utahovacího momentu samořezného šroubového spoje. I přes existenci celé řady faktorů, které musejí být dostatečným způsobem analyzovány pro určení jejich vlivu na přesnost výpočtu a souvisejícího teoretického návrhu šroubového spoje a jeho způsobilosti, byl dosažen požadovaný cíl společností Automotive Lighting.

5. Seznam použitých zdrojů

- [1] MRAZ, Stephen. What's the Difference Between Thread-Forming and Thread-Cutting Tapping Screws? Machine design [online]. 2015 [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: <http://machinedesign.com/fasteners/whats-difference-between-thread-forming-and-thread-cutting-tapping-screws>
- [2] KOLOUCH, Jan. Strojní součásti z plastů. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981, 258 s.
- [3] Katalogový list – Samovrtné šrouby EJOT® SAPHIR. Machine Design [online]. [cit. 2017-04-14]. Dostupné z: http://www.ejot.cz/picture/katalog_ETICS_2012/sverna-kapacita-jt.png
- [4] Bayer MaterialScienceAG, [online].2015: Dostupné z: www.plastics.bayer.com
- [5] VĚTROVEC, Ondřej. POPIS A VYHODNOCENÍ MOMENTOVÉ CHARAKTERISTIKY ŠROUBOVÉHO SPOJE. Brno, 2013. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VUT FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ. Vedoucí práce Jan Brandejs.
- [6] CHUMAKOV, Roman a Rudolf. STEFEC. An artificial neural network for fault detection in the assembly of thread-forming screws. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2008, **19**(3), 327-333. DOI: 10.1007/s10845-008-0085-5. ISSN 0956-5515. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s10845-008-0085-5>
- [7] PÍŠKA, Miroslav, Petra SLIWKOVÁ a Aleš POLZER. Parametry povrchu, tribologické testy a řezný výkon povlakovaných HSS. Brno, 2014. FSI VUT v Brně.
- [8] CHUMAKOV, Roman a Rudolf. STEFEC. Optimal control of screwing speed in assembly with thread-forming screws. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008, **36**(3-4), 395-400. DOI: 10.1007/s00170-006-0839-1. ISSN 0268-3768. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1007/s00170-006-0839-1>
- [9] MATHURIN, Florestan, Jean GUILLOT, Pierre STÉPHAN a Alain DAIDIÉ. 3D Finite Element Modeling of an Assembly Process With Thread Forming Screw. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2009, **131**(4), 041015-. DOI: 10.1115/1.3160377. ISSN 10871357. Dostupné také z: <http://ManufacturingScience.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1468851>
- [10] PETR, Chludil. VÝROBY ZÁVITŮ ZÁVITNÍKY. Brno, 2015. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VUT. Vedoucí práce Miroslav Píška.
- [11] MERGLER, Y.J., R.J. van KAMPEN, W.J. NAUTA, R.P. SCHAAKE, B. RAAS, J.G.H. van GRIENSVEN a C.J.M. MEESTERS. Influence of yield strength and toughness on friction and wear of polycarbonate. *Wear* [online]. 2005, **258**(5-6), 915-923 [cit. 2017-05-07]. DOI: 10.1016/j.wear.2004.09.046. ISSN 00431648. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S004316480400331X>
- [12] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. Editor Martin Hartl, Miloš Vlk. Brno: VUTIUM, 2010 [cit. 1-5-2015]. ISBN 978-80-214-2629-0.

- [13] PÍŇOS, Matěj. NÁVRH UTAHOVACÍHO MOMENTU ŠROUBOVÉHO SPOJE V PLASTOVÝCH KOMPONENTECH. Brno, 2015. Bakalářská. VUT. Vedoucí práce Jiří Dvořáček.
- [14] MAKOŇOVÁ, Šárka. Šroubové spoje - výklad [online]. 2015 [cit. 2017-06-25]. Dostupné z: <http://pospolu.rvp.cz/detail-materialu?id=101>
- [15] Capability of Measurement Processes for the Torque Inspection on Bolted Joints. *Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA)*. Henrich Druck Medien, 2013, **03/2013**(1), 50. ISSN 0943-9412.
- [16] DRASTÍK, František. *Strojnické tabulky pro konstrukci i dílnu*. 2. dopl. vyd. Ostrava: Montanex, 1999. ISBN 80-857-8095-X. VALÁŠEK, Michael, Vladimír STEJSKAL a Jiří BŘEZINA. *Mechanika A*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004. ISBN 978-800-1028-902.
- [17] ŠVEC, Vladimír, Vladimír STEJSKAL a Jiří BŘEZINA. *Části a mechanismy strojů: spoje a části spojovací*. Vyd. 3. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04138-3.
- [18] DINGER, G. Dynamic modeling and simulation of the screwing behavior of thread forming screws. *Journal od Manufacturing Processes*. 2015, (20), 6.
- [19] ŘEZNIČEK, Jan. *PRUŽNOST A PEVNOST II: PŘEDNÁŠKY*. 2016/2017. PRAHA, 2016. Dostupné také z: <http://pruznost.unas.cz>
- [20] STÉPHAN, Pierre, Florestan MATHURIN a Jean GUILLOT. Experimental study of forming and tightening processes with thread forming screws. *Journal od Materials Processing Technology*. 2011, 10.
- [21] The Essential Chemical Industry, [online], "Polycarbonates", [cit. 2016-05-17], Dostupné z: <http://www.essentialchemicalindustry.org/polymers/polycarbonates.html>
- [22] *Povrchari* [online]. 2014, (6) [cit. 2017-06-26]. ISSN 1802-9833. Dostupné z: www.povrchari.cz
- [23] PROKOPOVÁ, Irena. *Makromolekulární chemie*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2007. ISBN 978-80-7080-662-3.
- [24] Konstrukční návody, postupy, projektová data, Automotive Lighting, Česká Republika, Německo, 2017
- [25] Propagační a informační materiály, Automotive Lighting, Česká Republika, Německo, 2017

6. Seznam použitých zkratk a symbolů

Označení	Jednotky	Název
<i>ALCZ</i>		Automotive Lighting Jihlava
A_d	$[mm^2]$	Plocha vytlačeného závitu
C	$[1]$	Tuhostní konstanta
D_1	$[mm]$	Malý průměr závitu u klasických šroubů
D_h	$[mm]$	Průměr hlavy šroubu
$d, 2 \cdot r_2$	$[mm]$	Jmenovitý průměr samotvářecího šroubu
d_2	$[mm]$	Střední průměr šroubu
d_3	$[mm]$	Průměr dířku
$d_a, 2 \cdot r_1$	$[mm]$	Průměr díry pro samotvářecí šrouby
dS	$[mm]$	Elementární plocha šroubovice
dn	$[mm]$	Elementární vzdálenost po obvodu šroubovice
ds	$[mm]$	Elementární vzdálenost po obvodu profilu břitu
E	$[MPa]/[N \cdot mm^{-2}]$	Youngův modul pružnosti
E	$[J]$	Spotřeba energie [J]
F	$[N]$	Provozní síla
F_c	$[N]$	Řezná síla
F_i, F_0	$[N]$	Síla předpětí
F_n	$[N]$	Normálová síla
F_t	$[N]$	Třecí síla
f, f_0, μ	$[1]$	Součinitel smykového tření
H	$[1]$	Koeficient zaplnění závitové části
H	$[mm]$	Výška využití tvářecí části šroubu
H_1	$[mm]$	Nosná výška
H_{1p}	$[mm]$	Teoretická nosná výška pro samotvářecí šrouby
<i>HMH</i>		Teorie měrné energie napjatosti
K	$[N \cdot mm^{-2}]$	Konstanta pro silnostěnnou nádobu
k_{1-4}	$[1]$	Sada parametrů pro funkci efektivity
k_c	$[MPa]/[N \cdot mm^{-2}]$	Měrná řezná síla
k_p	$[kN \cdot mm^{-1}]$	Tuhost spojovaných součástí
k_s	$[kN \cdot mm^{-1}]$	Tuhost šroubu
M_{1F}	$[N \cdot m]$	Část dosedacího momentu potřebná k přetvoření závitu v 1. fázi
M_{2F}	$[N \cdot m]$	Část dosedacího momentu potřebná k překonání třecích sil v závitu ve 2. fázi
M_{2FL}	$[N \cdot m]$	Část momentu 2. fáze potřebná k překonání třecích sil od „lokálního tlaku“
M_{2FS}	$[N \cdot m]$	Část momentu 2. fáze potřebná k překonání třecích sil od „skořepinového tlaku“



M_D	$[N \cdot m]$	Dosedací moment samotvářecích šroubů
M_{celk}	$[N \cdot m]$	Celkový utahovací moment
M_k	$[N \cdot m]$	Předepínací moment (pro klasické šroubové spoje)
M_k	$[N \cdot m]$	Krouticí moment
M_t	$[N \cdot m]$	Obecný třecí moment
M_{th}	$[N \cdot m]$	Moment potřebný pro překonání tření pod hlavou
M_{tz}	$[N \cdot m]$	Moment potřebný pro překonání tření v závitech
MKP		Metoda konečných prvků
n_1	[1]	Počet otáček pro první fázi
n_2	[1]	Počet otáček pro první a druhou fázi
n, z	[1]	Počet závitů šroubovice
p_1	$[MPa]/[N \cdot mm^{-2}]$	Vnitřní tlak
p_2	$[MPa]/[N \cdot mm^{-2}]$	Vnější tlak
P_h	$[mm]$	Rozteč
p_h	$[MPa]/[N \cdot mm^{-2}]$	Tlak pod hlavou
P_t	$[W]$	Výkon
p_s	$[MPa]/[N \cdot mm^{-2}]$	Část „lokálního tlaku“ působící na šikmé plochy
p_D	$[MPa]/[N \cdot mm^{-2}]$	Dovolený tlak
p_v	$[MPa]/[N \cdot mm^{-2}]$	Část „lokálního tlaku“ působící na vrcholovou plochu
p_z	$[MPa]/[N \cdot mm^{-2}]$	Tlak v závitech
PC		polykarbonát
$r_1, \frac{d_d}{2}$	$[mm]$	Poloměr šroubované díry pro samotvářecí šrouby
$r_2, \frac{d}{2}$	$[mm]$	Jmenovitý poloměr samotvářecího šroubu
$r_e, \frac{d_e}{2}$	$[mm]$	Vnější poloměr šroubového domečku
Q	$[J]$	Tepelná energie
\dot{Q}	$[W]$	Tepelný tok (výkon)
R_m	$[MPa]/[N \cdot mm^{-2}]$	Mez pevnosti
r	$[mm]$	Kolmá vzdálenost od osy šroubu
S	[1]	Funkce efektivity
S_h	$[mm^2]$	Styková plocha hlavy šroubu a připojované součásti
S_p	$[mm^2]$	Průmět opěrné stykové plochy
t	$[mm]$	Šířka vrcholové plochy profilu břitu
v	$[m/s]$	Obvodová rychlost
W_t	$[W]$	Mechanická energie spotřebovaná na tření
α	$[rad]$	Vrcholový úhel profilu šroubovice
α_{1-4}	[1]	Váhový faktor základních elementů
γ	$[rad]$	Úhel stoupání šroubovice
δ_p	$[mm]$	Deformace spojovaných součástí
δ_s	$[mm]$	Deformace šroubu



μ_a	[1]	Součinitel adheze
σ_n	[MPa]/[N · mm ⁻²]	Normálové napětí
σ_o	[MPa]/[N · mm ⁻²]	Osové napětí
σ_r	[MPa]/[N · mm ⁻²]	Radiální napětí
σ_t	[MPa]/[N · mm ⁻²]	Tečné napětí
τ_D	[MPa]/[N · mm ⁻²]	Dovolené smykové napětí
τ_k	[MPa]/[N · mm ⁻²]	Smykové napětí způsobené krutem
φ	[°]	Úhel natočení šroubu
φ'	[°]	Třecí úhel
φ_p	[°]	Úhel sklonu zatěžovací dráhy spojovaných součástí
φ_s	[°]	Úhel sklonu zatěžovací dráhy šroubu
ΔF_p	[N]	Část provozní síly přenášená spojovanými součástmi
ΔF_s	[N]	Část provozní síly přenášená šroubem
Δr_1	[mm]	Přesah na ploměru při lisování
Δr_k	[mm]	Kritická hloubka při vtlačování rozvinuté šroubovice do rovinné desky
ϑ	[1]	Poissonova konstanta
ω	[rad/s]	Úhlová rychlost

7. Seznam obrázků a grafů

Obr. 1.	Full LED světlomet Audi A4 s technologií matrix [25]	1
Obr. 2.	Rozvin šroubovice [10]	2
Obr. 3.	Výpočtové modely tření	3
Obr. 4.	Provozní diagram předepjatého spoje s konstantní provozní silou [12]	4
Obr. 5.	Rozklad sil pro známé odvození [14]	5
Obr. 6.	Příklad samořezných šroubů [3]	6
Obr. 7.	3D model šroubu typu Delta PT [24]	7
Obr. 8.	Profily speciálních tvářecích šroubů pro plasty [2]	8
Obr. 9.	Šroub typu Delta PT používaný ve firmě AL	9
Obr. 10.	Ukázka použití šroubů ve světlometech [24]	9
Obr. 11.	Jeden typ šroubu od různých výrobců	10
Obr. 12.	Ukázka podélného prasknutí domku [24]	10
Obr. 13.	Ukázka reálného tvaru domečku [24]	13
Obr. 14.	Schéma fází momentové charakteristiky	14
Obr. 15.	Momentové charakteristiky pro chybové situace: (a) rozkmit či házivost šroubu (b) posun spojovaných dílců (c) Strhnutí závit [6].....	15
Obr. 16.	Momentové poměry v samotvářecích šroubech podle výpočtů v kapitole 3.7	16
Obr. 17.	Reálný průběh šroubování [24]	17
Obr. 18.	Momentová charakteristika s dominantním vlivem tvářecího momentu.....	17
Obr. 19.	Momentové poměry v metrických šroubech klasického typu podle VDI 2230 [15]	18
Obr. 20.	Rozvin šroubovice	20
Obr. 21.	Ilustrace působícího tlaku – profil tlaku je pouze odhad pro názornost	20
Obr. 22.	Souřadnice použité k odvození	21
Obr. 23.	Ukázka rozložení napětí v přetvořeném materiálu podle MKP simulace [24]	23
Obr. 24.	Ukázka možných výsledků MKP simulace celého spoje [19]	24
Obr. 25.	průběh síly v závislosti na penetrované hloubce podle MKP simulace	25
Obr. 26.	Ilustrace působení radiálního tlaku vlivem rozpínání válcového domku	25
Obr. 27.	Průnik materiálu.....	26
Obr. 28.	plocha třísky (modře) byla odečtena z normálového řezu průniku šroubu a domku	27
Obr. 29.	Ilustrace zjišťování výšky H.....	28
Obr. 30.	Ilustrace možné sestavy experimentu.....	29
Obr. 31.	Ilustrace rozvinu připraveného k simulaci.....	30
Obr. 32.	Ukázka odečtení dosedací plochy [24]	33
Obr. 33.	Obrázek jmenovitých profilů vnějšího a vnitřního metrického závitu [16]	33
Obr. 34.	Ukázka možné cesty v počítání tlaku v závitech [9]	34
Obr. 35.	Ilustrace domnělého šíření napětí od vnitřního přetlaku	35
Obr. 36.	Ukázka pouzdra vystaveného kombinovanému namáhání.....	36
Obr. 37.	Namáhání šroubu [13].....	36
Obr. 38.	Tok materiálu po zašroubování vzhledem k ose otáčení [9]	37
Obr. 39.	Vyznačení oblastí s největším napětím [9]	38
Obr. 40.	Ukázka výpočtu efektivní hodnoty pro samotvářecí závit v hliníkové slitině [8]	39
Obr. 41.	Ideální průběh rychlosti šroubování podle článku [8] pro slitinu hliníku	40
Obr. 42.	Obrázek momentové charakteristiky s vyznačenou mechanickou energií, která se ve spoji mění na energii tepelnou	40
Obr. 43.	Ukázka nataveného materiálu vlivem malého průměru otvoru	41
Obr. 44.	Ukázka relaxace předepínací síly ve spoji dle teploty a času, převzato z návrhu šroubového spoje firmy EJOT	42
Obr. 45.	Opakující se základní jednotka polykarbonátu vytvořena z bisfenolu A [21].....	43
Obr. 46.	Koeficient tření polykarbonátu Lexan 101R v závislosti na teplotě zdroj [11]	43
Obr. 47.	Ukázka použitých šroubů a testovaných vzorků	44
Obr. 48.	Pracoviště s měřicí sestavou	45



Obr. 49.	Ukázka výkresu vzorku	45
Obr. 50.	První měření – destrukční – protočení spoje 9. A 10. Vykazují anomálie v průběhu, vysvětlení pod obrázkem č. 52	46
Obr. 51.	Druhé měření – nedestrukční dotažení šroubu Zejména šroub 9. Vykazuje anomálii v průběhu	46
Obr. 52.	Vzorky o průměrech (3,7-2,9) mm (zleva) a jim náležící šrouby o průměru 4 mm	47
Obr. 53.	Prodloužené válečky s vybroušenými plochami.....	47
Obr. 54.	Srovnání naměřených utahovacích momentů podle vnitřního průměru otvoru, graf odpovídá průběhům dle obr. č. 52	48
Obr. 55.	Vzorek o průměru 3,1 mm, do kterého byl 15x zašroubován a znovu vyšroubován samotvářecí vrut.....	49
Obr. 56.	Momentová charakteristika pro vnitřní průměr 3,7 mm	49
Obr. 57.	Momentová charakteristika pro vnitřní \varnothing 3,5 mm	50



8. Seznam tabulek

Tab. 1.	Tabulka vypočtených hodnot pro různé průměry děr	28
Tab. 2.	Tabulka vstupních a výstupních hodnot.....	31
Tab. 3.	Poměrové rozložení jednotlivých složek v procentech	32



9. Seznam příloh

- Příloha 1. Výkres modelového šroubu
- Příloha 2. Výkres vzorků použitých při měření
- Příloha 3. Protokoly z měření