

Vliv mazání na těsnost přírubových spojů – potřeba verifikace součinitelů tření jednotlivých maziv

Hlavním kritériem správné funkce kritického přírubového spoje, je požadovaná míra těsnosti v provozu. (viz ČSN EN 1127 ed.2, 2012, příloha B)². Na základě těchto kritérií je pak navrhován a počítán přírubový spoj podle normy EN 1591-1 s průkazem těsnosti, který zohledňuje všechny vzájemně se ovlivňujících části - příruba- spojovací materiál - těsnění. Montážní stav je výchozí pro návrh přírubového spoje. Ostatní provozní stavy se mohou v čase lišit. Pokud není výchozí stav přesně definován, nelze správně dimenzovat ani následné stavy. Šroubový spoj je z pohledu technické praxe nejrozšířenější rozebíratelné mechanické spojení. Zvláště u kritických přírubových spojů (viz obr. 1) se nároky na šroubový spoj zvyšují. Z pohledu napjatosti jde o velmi složité konstrukční součásti.



Obr. 1 Přírubové spoje mezichladiče.

Tření ve šroubovém spoji

V obecném vzorci pro utahovací moment jsou zahrnuty jak rozměry šroubu, tak součinitelé tření v závitu f_z a pod hlavou nebo maticí f_m .

$$M_U = M_{tz} + M_{tm} \quad (1.1)$$

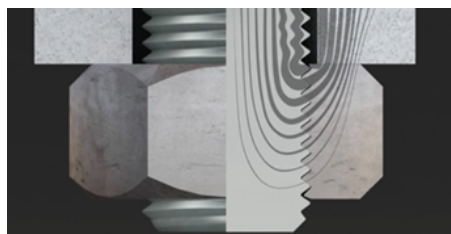
tření v závitu tření pod maticí

Obecně je ve fyzice součinitel tření definován následujícími pravidly (zákony).

- Součinitel tření je konstantní (není závislý na zatížení).
- Velikost tření nezávisí na velikosti stykové plochy, ani na rychlosti pohybu.

Tato pravidla však neplatí, pokud zatížení přestoupí meze pevnosti materiálu. Vlivem pohybu mění svoje vlastnosti jak mazivo tak se mění i mikrostruktura drsnosti povrchu materiálu kvůli nedostatečné tuhosti. Pravidla vycházejí z předpokladu tuhých otěruvzdorných těles bez použití maziva.

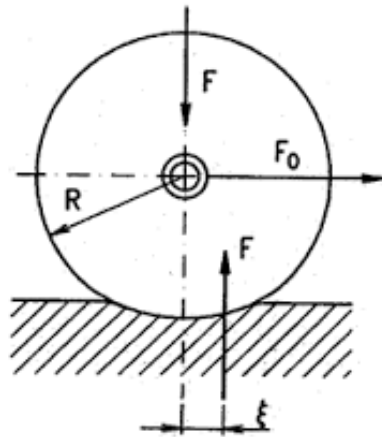
Uvedená pravidla však šroubový spoj nespĺňuje, protože závity šroubu nejsou zatíženy rovnoměrně. První závit může přenášet více než 30 % celkového zatížení. Nelze tak zabránit plastickým deformacím povrchu.



Nerovnoměrné zatížení závitů

V pevnostních výpočtech šroubových spojů se velice často pracuje s jednou s jednou konstantní hodnotou součinitele tření. Ty jsou často získávány metodami, které dostatečně neodpovídají realitě šroubového spoje.

Jako příklad lze uvést metody Pin-on-Disc, Pin-Roll či Ball_Roll (viz obr. 2) pro měření různých typů povlaků. Měření spočívá ve vtlačování pevně uchyceného zkušební tělíska („PIN“) ve tvaru kuličky ze zvoleného materiálu předem definovanou silou do disku (zkušební vzorku).



Obr. 2 Metoda měření součinitele tření typu Pin-on-Disc.

Přesnost výpočtových modulů je ovlivněna přesností hodnoty vstupních parametrů. Přesnost geometrických rozměrových závitů (d_2 , D_m , α) bývá jasně definována. Pokud zjednodušíme poloměr tření pod maticí na $\frac{D_m}{2}$, můžeme se dle některých autorů, dopustit chyby jen cca - 1,16 % (Pospíšil 1968)¹.

Ovšem chyba, způsobená dosažením neodpovídajícího součinitele tření, může být nesrovnatelně vyšší. Experimentální měření součinitelů tření ukázalo, že rozptyl hodnot součinitele tření pro suchý ocelový povrch, v závitě i pod maticí, je značný. Chyba ve výpočtu utahovacího momentu M_U , dle (1.1), může být i $\pm 30\%$.

Z experimentů plyne, že není správné používat jednu obecně platnou hodnotu součinitele tření ($f_z=f_m=f_k$). Vystavujeme se nebezpečí, že spoj může být **přetažen** nebo **málo dotažen**. Přičemž, přetížení může způsobit nevratné zničení těsnění, přírub nebo šroubů. Nedostatečné dotažení pak vede k nedodržení určité míry těsnosti. **Značný rozptyl součinitelů tření má také vliv na nerovnoměrnost měrného tlaku na těsnění.**

Norma (ČSN EN 1591-1: Květen 2015)³ stanovuje pevnostní výpočty pro kruhové těsněné přírubové spoje tlakových nádob. Na str. 40 uvádí velmi hrubé odhadované hodnoty součinitelů tření v závitě i pod maticí. Na druhé straně se v normě doporučuje používat přesné hodnoty součinitele tření, které je třeba získat od výrobce daného maziva.

Na trhu není mnoho výrobců maziv určených pro mazání spojovacího materiálu, kteří udávají přímo definované hodnoty tření v závitě a pod maticí. Ještě méně je výrobců, kteří by udávali hodnoty f_z a f_m s popisem zkušebních podmínek (např. zatížení, druh závitů z hlediska výroby, materiál podložek a šroubu, velikost zkušebních šroubů atd.). Většinou je v informaci o mazivu uvedena pouze jedna hodnota tření. Experimentálními zkouškami bylo zjištěno, že

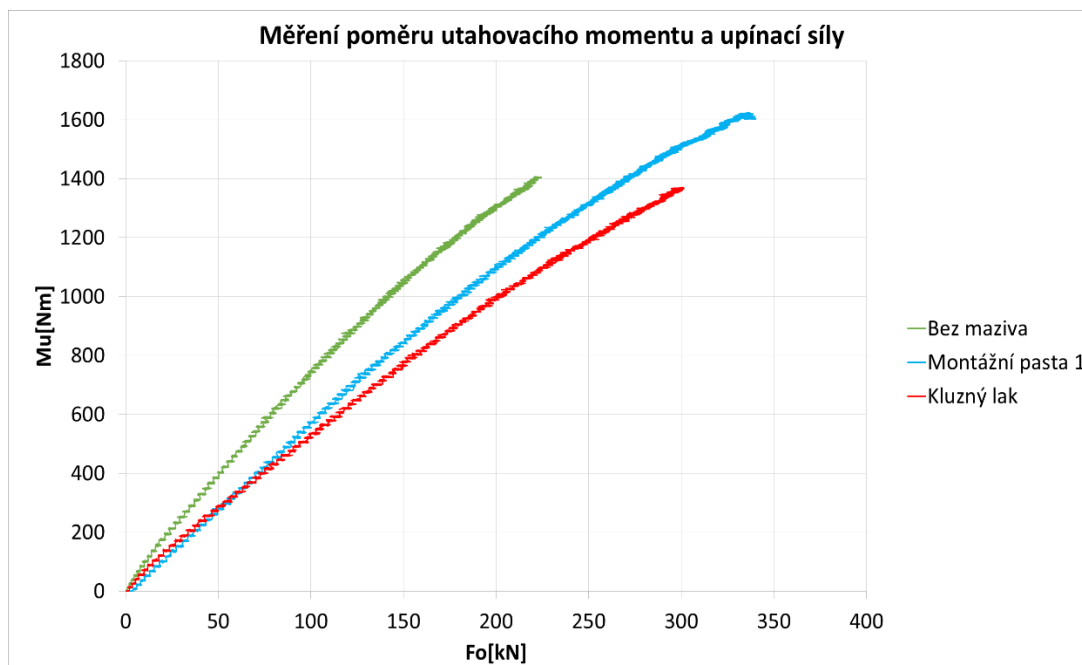
tyto hodnoty neodpovídají realitě. Jsou tak patrně získávány metodami, které nejsou určeny pro definování tření ve šroubu.

Vzhledem k tomu, že cílem je navrhnout skutečně spolehlivý přírubový spoj, který zajistí dodržení určité míry těsnosti během své životnosti, je nezbytné vycházet ze zkoušek dle (ČSN EN ISO 16047: Srpen 2005)⁴. Tato norma definuje zkoušky točivým momentem či upínací silou, pro spojovací součásti (šrouby) za účelem stanovení jejich součinitelů tření.

Měření utahovacího momentu a upínací síly šroubového spoje

Princi měření je popsán v ČSN EN ISO 16047⁴. Na sestavu určitého šroubového spoje je kontinuálně aplikován utahovací moment M_U , který vyvozuje potřebnou upínací sílu F_o . Na základě těchto parametrů lze poté určit několik charakteristik utahování, jako je

- činitel točivého momentu
- celkový součinitel tření
- součinitel tření v závitě
- součinitel tření pod maticí
- dále lze určit rovněž hodnoty síly či momentu na mezi kluzu.



Obr.3 Graf měření poměru utahovacího momentu a síly

(např.: při upínací síle 200 kN je M_u pro kluzný lak 1000 Nm, ale pro suchý závit cca 1300 Nm-spoj je tak víc namáhán)

Pro stanovení dílčích součinitelů tření je zapotřebí použití snímačů pro měření zatížení, aby bylo možné určit dvě složky momentů z rovnice (1.1) a znalost všech důležitých geometrických rozměrů.

Stanovením pouze tzv. *činitele točivého momentu* K , který vyjadřuje jenom poměr M_U ku síle F_o vynásobené jmenovitým průměrem šroubu d můžeme celý výpočet zjednodušit. Předpoklad lineárního průběhu platí pouze pro oblast elastické deformace zkušební vzorku.

Zjednodušená metoda měření poměru momentu a síly má však největší omezení. Platnost činitele točivého momentu K **je omezena na jeden jmenovitý průměr šroubu** a stejnou geometrii závitu. Díky získanému součiniteli celkového tření lze sice porovnat různé třecí podmínky (viz obr. 3), **nelze však určit** v jaké míře se na ztrátách třením **podílí závit**, a jak výsledné předpětí ovlivňuje **tření pod maticí** či hlavou šroubu. Vztah pro výpočet celkového tření totiž zjednodušeně **předpokládá rovnost tření v závitě i pod hlavou** ($f_z = f_m$). Měření ukázala, že realita je mnohdy jiná ($f_z \neq f_m$). Mírné zakřivení čar (průběh není lineární) v obr. 3 je patrně způsobeno tzv. sedáním spoje v průběhu utahování a změnami kluzných vlastností použitého maziva se zatížením.

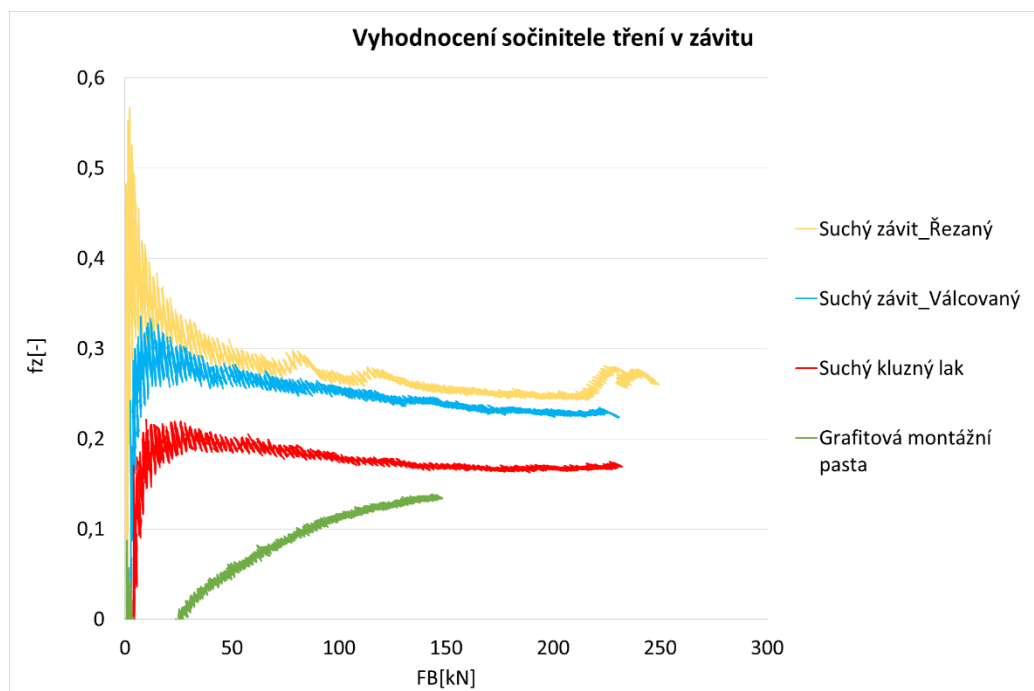
Měření součinitele tření v závitu a pod maticí

Cílem experimentálního měření je stanovení obecných podmínek tření, které bude možné aplikovat na šroubové spoje, bez ohledu na rozměry spojovaných částí.

Je nutné nejdřív stanovit dílčí součinitele **tření v závitu i pod maticí**, pro konkrétní třecí podmínky. Třecí podmínky nejsou dány pouze mazivem, ale i např. technologií výroby závitu (viz obr. 4).

Tření v závitu f_z

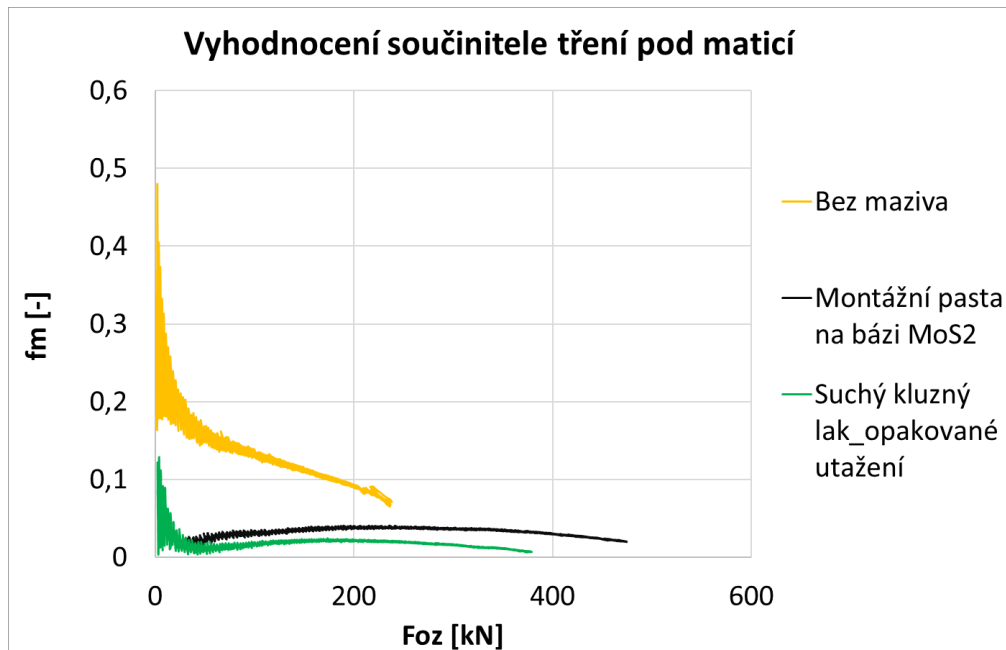
Z obrázku je patrné, že průběh **tření v závitu f_z** , má závislost na zatížení, kde se hodnota tření se např. u kluzných laků ustálí. Ovšem tato skutečnost není pravidlem. Některá maziva v průběhu utažení natolik mění vlastnosti (vytlačení maziva, zadírání, vydření povrchové vrstvy laku atd.), že se těžko matematicky definují. Hodnoty součinitelů tření pro některé montážní pasty nebylo rovněž možné definovat v oblasti velmi malých upínacích sil (viz obr. 4, Grafitová montážní pasta). Vypalovaný kluzný lak tyto jevy eliminuje.



Obr. 3 Graf vyhodnocení součinitele tření v závitu.

Tření f_m pod maticí

Charakter křivky součinitele **tření f_m pod maticí** (viz obr. 5) se může lišit v závislosti na použitém mazivu či drsnosti a tvrdosti dosedacích ploch. Větší rozptyl momentu tření pod maticí je bývá u leštěných hladkých povrchů, kvůli procesu vytlačování maziva, během utahování. Avšak díky hladké ploše nejsou ztráty třením tak významné. Pozitivní vliv na rozptyl i ztráty třením má rovněž vyšší tvrdost dosedacích ploch. Norma ČSN EN ISO 16047⁴ požaduje při experimentu použití podložek s tvrdostí mezi HV 200 až HV 300.



Obr. 4 Graf vyhodnocení součinitele tření pod maticí.

Z obr. 5 je zřejmé, že kluzný lak, který je pevně ukotven do základní struktury materiálu, umožní dosáhnout **zlepšení tření** i při vyšších zatíženích. Po opakovaném utažení na stejném kluzném laku je vidět, že dochází ještě ke zlepšení tření.

Měřením se rovněž prokázal **pozitivní vliv kluzného laku na rozptyl** nejen součinitele tření pod hlavou f_m , ale i v závitě f_z .

Vliv poměru tření v závitě a pod maticí

Ve šroubovém spoji je významný **rozdíl mezi vlivy tření v závitě a třením pod maticí**. Oba tyto parametry mají vliv na velikost i rozptyl dosaženého předpětí, avšak dopad na namáhání se liší.

Při zvětšení **tření pod maticí**, nedojde k většímu namáhání dříku šroubu. Pouze **poklesne** účinnost šroubového spoje.

Při nárůstu **tření v závitě** se velká část vyvozeného momentu na klíči transformuje **na krut ve šroubu**, nikoli do tahové složky síly (předpětí). Pokud dojde k úplnému zadření šroubu v závitě ($f_z = 1$), veškerou energii od utažení pohltí krut dříku. Součinitel tření v závitě tedy ovlivňuje míru namáhání krutem. Tento typ namáhání je pro šroub nežádoucí. A to jak v oblasti plastických, tak i v oblasti elastických deformací.



Zadřený šroub

Elastická složka způsobuje vznik tzv. parazitního momentu. Jedná se o část momentu, která má snahu se vrátit do původního stavu, tedy vyšroubovat šroub. K této anomálii dochází zpravidla v prvních 24 hodinách po utažení.

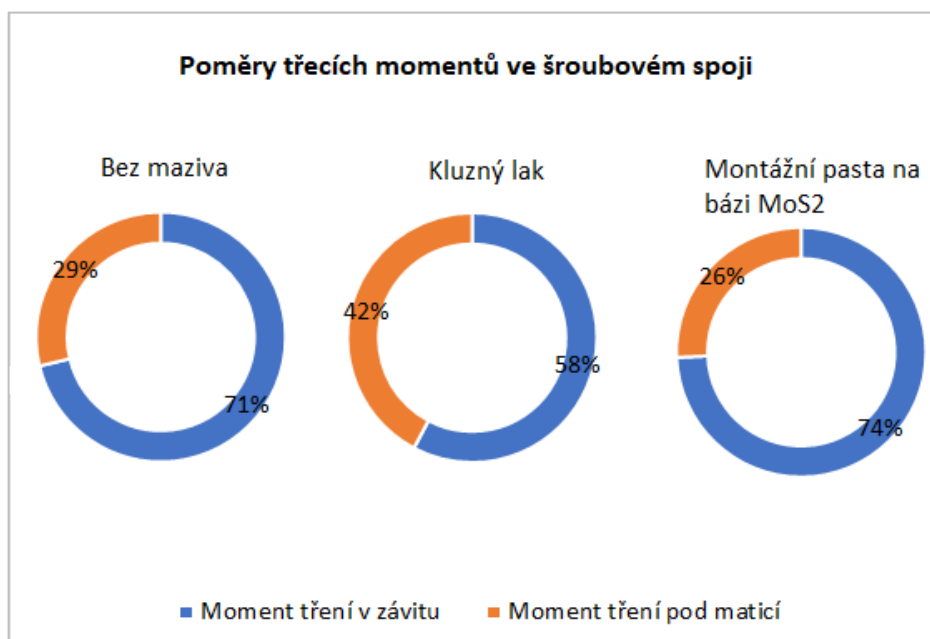
Navrhování šroubového spoje je založeno na kontrole v tahu i krutu. Dovolené namáhání v krutu může být v porovnání s dovoleným namáháním v tahu, i třetinové. Na tento fakt je třeba brát zřetel při dimenzování šroubového spoje.

Nelze tedy vycházet z předpokladu, že součinitel tření v závitě f_z a součinitel tření pod maticí f_m , jsou si rovny ($f_z \neq f_m$). Rovněž výsledky z experimentálních měření prokázaly, že toto zjednodušení často neplatí (viz obr. 4 v porovnání s obr. 5). **Počítá-li se s rovností součinitelů, pak výsledný utahovací moment může být nedostačující nebo naopak přetěžující.**

Obojí může zavinit fatální defekt přírubového spoje. Poměr součinitelů tření f_z a f_m přímo ovlivňuje i poměry třecích momentů (viz obr. 7). Všeobecně se vychází z předpokladu, že moment tření v závitě bývá dvě třetiny celkového utahovacího momentu. Toto pravidlo však neplatí vždy, je platné zejména pro přesné spojovací šrouby s čistým povrchem. Některá maziva vykazují i symetrické rozdělení třecích momentů. Při takovém poměru se zvětšuje tření pod maticí na úkor tření v závitě. Namáhání krutem se tak sníží, a větší tření pod maticí tak zvýší bezpečnost proti uvolnění spoje.

Samosvornost spojovacího šroubu s metrickým závitem je v běžných podmínkách dostačující (vycházíme ze skutečnosti, že tangenta úhlu stoupání je menší než tangenta úhlu síly předpětí působící na závit), a to i v případě použití maziva s nejnižším koeficientem tření (např. 0,1). Navíc, velikost součinitele tření za klidu bývá až o 30 % větší než za pohybu. Pro zvýšení bezpečnosti spoje (např. v provozu s vibracemi) je v některých případech výhodné zvětšit podíl momentu tření na dosedací ploše (pod maticí). Toho lze dosáhnout použitím speciálních podložek nebo se provede vhodná úprava dosedacích ploch (např. konkávní vybrání). Díky úpravě dosedacích ploch lze docílit i menšího rozptylu momentu tření pod maticí či hlavou šroubu.

Graf na obr. 7 byl vytvořen pro velikost předpětí 200 kN.



Obr. 5 Graf poměrů momentů tření ve šroubovém spoji.

(Poměr momentu tření u vzorku bez maziva a s pastou je v závitě $\frac{3}{4}$ a pod maticí $\frac{1}{4}$, u vzorku s kluzným lakem se poměr tření pod maticí zvětšuje na úkor momentu v závitě - tím se snižuje namáhání spoje)

Výsledky experimentálního měření nám umožňují vygenerovat optimální velikost momentu, pro dosažení požadovaného předpětí. Velikost předpětí může být např. stanovena pomocí výpočtu v normě ČSN EN 1591-1, která v sobě zahrnuje optimalizaci hodnot předpětí z hlediska dodržení potřebné třídy těsnosti a pevnosti přírubového spoje. Můžeme si tak zobrazit maximální i minimální hodnotu utahovacího momentu, s ohledem na rozptyl součinitelů tření včetně kontroly míry namáhání šroubu krutem, vůči tahu.

Závěr

Abychom byli schopni přesně definovat proces utahování při návrhu a výpočtu těsných přírubových spojů podle EN 1591-1, které podléhají přísným požadavkům podle EN 1127 ed.2, provádíme si experimentální měření v souladu s normou ČSN EN 16047. Cílem zkoumání bylo ověřit součinitele tření v závitě a pod maticí pro vybraná maziva. Dále byl ověřován vliv technologie výroby závitů či vliv tvrdosti dosedacích ploch, použití podložek atd.

Experiment prokázal, že mnohá pravidla nelze pokládat za obecně platná. Údaje výrobců maziv nejsou dostačující, není tak možné dodržet požadavky normy. Návrh trvale těsného přírubového spoje se tak stává ještě komplikovanějším.

Naměřená data, nám vyplňují mezeru v návrhu přírubového spoje dle ČSN EN 1591-1. Díky tomuto propojení lze navrhnout optimální velikost utahovacího momentu, včetně možného rozptylu, pro danou hladinu zatížení a použité mazivo.

Experimentální měření nám také potvrdila, že používání suchých maziv (kluzný lak) přináší potřebnou jistotu do celého návrhu a výpočtu utahovacích momentů.

Mazivo pro spojovací materiál

Mazivo tedy musí mechanicky odolávat velkému zatížení v tlaku a současně pohybu na třecích plochách závitů při utahování. Suché mazivo musí být trvale ukotveno do základního materiálu šroubu. Musí zajistit konstantní součinitel tření (viz grafy 4,5) při zvyšujícím se zatížení od

utahovacího momentu v každém šroubu příruby - dosažení stejné osově síly (předpětí). Tak dosáhne montér při řízeném utažení rovnoměrného stlačení těsnění po celém jeho obvodu. Některé druhy suchých maziv kromě výše zmíněných mechanických vlastností také zabraňují přenosu náboje při spojení dvou různých materiálu kovu (např.: nerez / uhlíková ocel, litina) a tím spolehlivě **zabraňuje vzniku galvanické koroze**.

Power®torque LF kote 450

Abychom měli jistotu, že i při montáži bude zajištěn konstantní součinitel tření, rovnoměrný přenos sil ve šroubu a tím rovnoměrné stlačení těsnění, vyvinuli jsme si již více jak před 10 lety kluzný lak Power®torque LF kote 450.

Jde o suché mazivo, které díky své interkrystalické struktuře pronikne do povrchu materiálu a vytvoří stálou, plošnému tlaku odolnou vrstvu (pevnost v tlaku více jak 1750 MPa), která výrazně zlepšuje tření, případně chrání povrch kovů před galvanickou korozí.

Na obrázcích z elektronového mikroskopu je patrné stálost suchého maziva před i po utažení.

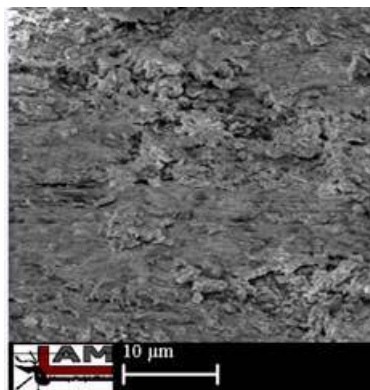


Foto z elektronového mikroskopu před utahováním

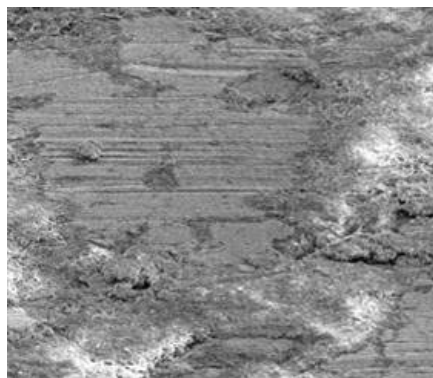
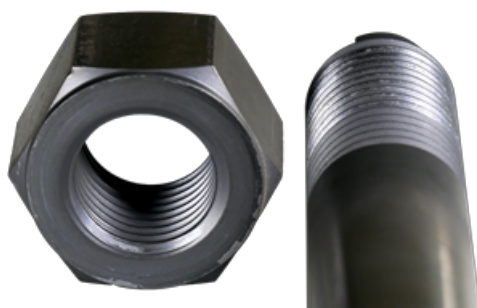
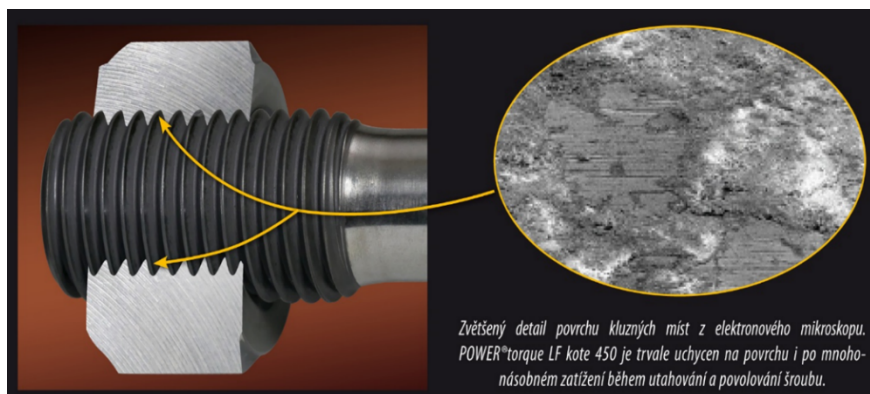
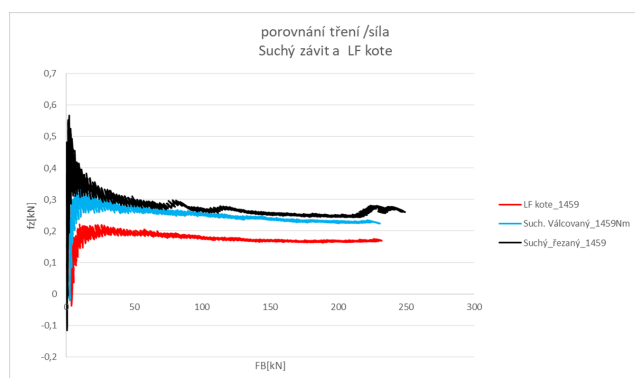


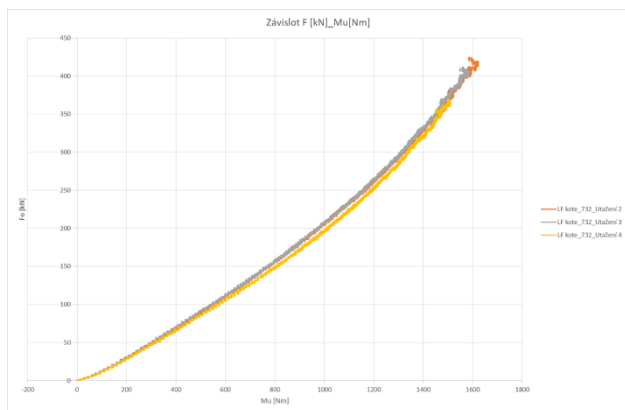
Foto z elektronového mikroskopu po utažení



Kluzný lak Power®torque LF kote 450 po utahování je zaleštěn do povrchu a nepoškozen



Porovnání tření mezi suchým závitem a kluzným lakem Power®torque LF kote 450 (z grafu je patrné, že se součinitel tření ustálí a se vzrůstajícím zatížením se nemění)



Opakované utažení Power®torque LF kote 450

(při opakovaném utažení a povolení se měřené hodnoty nemění- součinitel tření je konstantní)

Ing. Martin Tesař

Manažer skupiny Flange management



Pokorný, spol. s r. o.

Trnkova 115

628 00 Brno-Líšeň

Česká republika

Použitá literatura:

¹ **Pospíšil F.** - *Závitová a šroubová spojení*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1968

² **ČSN EN 1127-1 ed.2** - *Výbušná prostředí - Prevence a ochrana proti výbuchu- Část1: Základní koncepce a metodika, 1.2012, příloha B Těsnost zařízení*

³ **ČSN EN 1591-1** - *Příruby a přírubové spoje-pravidla pro navrhování těsnění kruhových přírubových spojů- Část 1: Výpočet, 5.2015*

⁴ **ČSN EN 16047** - *Spojovací součásti- Zkoušení točivým momentem/upínací silou: ČNI 2005*

