

Proč je tření šroubového spoje zásadní z hlediska schopnosti procesu

White Paper

Proč je tření šroubového spoje zásadní z hlediska schopnosti procesu

od **Martin Rüedy**

Bossard Expert Team,
Bossard Central Europe

www.bossard.com

Všechna práva vyhrazena © 2023 Bossard

Uvedená doporučení a rady musí být čtenářem v praxi náležitě zkontrolována a pro konkrétní aplikaci musí být schválena jako vhodná. Změny vyhrazeny.



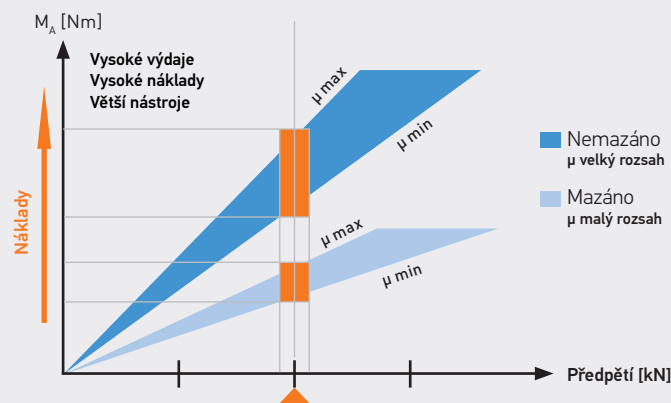
ASSEMBLY
TECHNOLOGY
EXPERT

PROČ JE TŘENÍ ŠROUBOVÉHO SPOJE ZÁSADNÍ Z HLEDISKA SCHOPNOSTI PROCESU

Úvod

„Štíhlá výroba“ je současný trend, který představuje stále více štíhlejší a cíleně zaměřené procesy. Řešení přinášející vyšší produktivitu, nižší spotřebu a delší životnost jsou předmětem neustálého výzkumu po celém světě. Když je zvažováno použití nových materiálů nebo procesů tepelného zpracování a povrchových úprav, jsou tribologické vlastnosti, jako např. tření, mazání a odolnost vůči otěru, vždy jeden z nejdůležitějších faktorů.

V průmyslové výrobě představují mechanické šroubové spoje stále důležité součásti konstrukcí při tvorbě nových designů či aplikaci modernějších materiálů. S ohledem na stále zvyšující se požadavky montážních procesů, je kladen důraz i na maximální využití materiálu a schopnosti procesů.



Obrázek 1

Témata a poznatky pro spolehlivé šroubové spoje

- Schopnost procesu
- Spolehlivost procesu při montáži
- Problematika tribologie

Výzvy v oblasti šroubové technologie

Očekávání trhu jsou vysoká – vysoce spolehlivé finální výrobky s dobrou dostupností a delšími servisními cykly. Aby bylo možné tyto požadavky splnit při zachování funkčnosti a bezpečnosti šroubových spojů, jsou vyžadovány i vhodné technologie povrchových úprav. Vhodné párování materiálů a antikorozní ochrana musí být dostatečné s ohledem na vnější vlivy prostředí a způsob namáhání dílů. Např. v oblasti fixace výfukového potrubí u spalovacích motorů je potřeba zajistit bezpečnost spoje i při vyšších provozních teplotách.

Vedle ochranné funkce však musí technické povlaky splňovat také tribologické požadavky na montážní lince. Běžně jsou šroubové spoje utahovány s existujícími třecími vlivy mezi relativně se pohybujícími plochami (např. hlava šroubu / dosedací plocha; tření v závitech), kdy výsledné předpětí spoje je dáno jako výsledek aplikovaného utahovacího momentu.

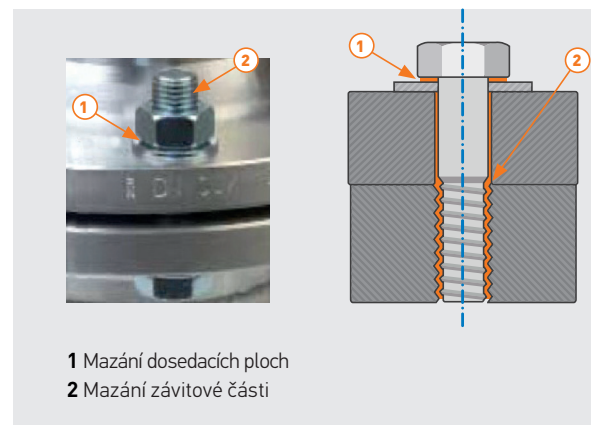
„Schopný proces“ montáže však vyžaduje konstantní a malý rozsah koeficientu tření v závitech (Obrázek 1) a na dosedací ploše šroubů/matic. Mazání spojovacích prvků je tudíž základním předpokladem pro spolehlivou kvalitu šroubového spoje.

V souvislosti se zákonnými ustanoveními v oblasti životního prostředí a zdravotně nezávadného použití průmyslových výrobků, je také kladen větší důraz i na finanční aspekty výroby. Tekutá maziva jsou čím dál častěji nahrazována lubrikačními aditivami přímo ve funkčních suchých povlácích na spojovacích materiálech (top coats = vrchní nátěry), které jsou běžně nanášeny na základní povlaky. Na trhu se tak etablovala ucelená široká řada nových antikorozních úprav s vysokou korozní odolností, které jsou podobné nebo mnohdy dokonce i lepší než původní chromátové povlaky obsahující 6-ti mocný chrom Cr(VI), a postupně tak tyto povlaky nahrazují. Avšak, standardizace v oblasti povrchových úprav zatím poněkud pokulhává. Standardizace v oblasti kalibrovaných hodnot koeficientu tření a korozní odolnosti se však stává mnohem obtížnější důsledkem existence širokého sortimentu povrchových úprav bez 6-ti mocného chromu (Cr(VI)-free) v kombinaci s vrchními povlaky (top coats).

Závěr

Automobilový průmysl je v současnosti hnacím motorem technologického rozvoje s ohledem na specifikace antikorozní ochrany a rozsahu hodnot koeficientů tření pro spolehlivé montážní procesy ve výrobních závodech a zajištění všech požadavků na bezpečný provoz. Mezinárodně působící firmy jsou tak stále pod větším tlakem v hledání lepších řešení, které umožní více efektivní montáže a kratší operační cykly.

Pro cílené výkonové charakteristiky se stále častěji používají komplexní řešení koncepcí povlakování. V nabídce jsou zejména různé základní vrstvy s krycími vrstvami (např. systémy povlakování zinkových lamel). Takzvané antifrikční povlaky se specifikovanými součiniteli tření jsou v ideálním případě aplikovány stejným výrobcem.



Obrázek 2 Přírubové spoje s vysokými nároky na těsnost a co nejrovnoměrnější plošný tlak díky předpětí šroubů.

PROČ JE TŘENÍ ŠROUBOVÉHO SPOJE ZÁSADNÍ Z HLEDISKA SCHOPNOSTI PROCESU

Schopnost procesu

U bezpečnostních šroubových spojů kde je třeba zajistit správné předpětí, není ruční montáž bez řízeného utahování vhodnou metodou. Je nezbytné zjistit všechny relevantní proměnné mající vliv na spolehlivost procesu, zejména pak rozptýl hodnot koeficientu tření i správné rozměry šroubů.

Racionálním přístupem vycházejícím z automobilového průmyslu můžeme odvodit praktické procedury založené na analýzách rizik spjaté se šroubovacími procesy. Norma VDI 2862 představuje potenciální základ pro klasifikační systém šroubových spojů a je průvodcem výběru vhodného šroubového spoje. Tato směrnice rozděluje šroubové spoje do tří rizikových tříd v automobilovém průmyslu. Spolehlivé montážní procesy jsou tak spjaté se správným používáním nástrojů apod.

Třída rizika A

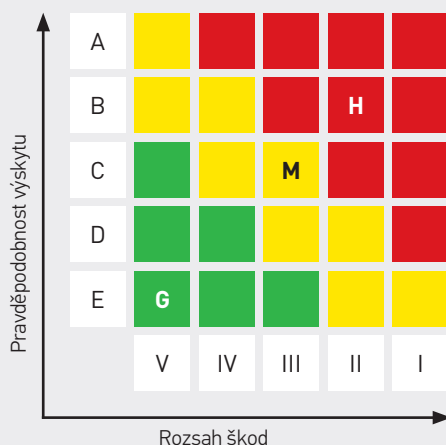
Riziko, kdy selhání šroubového spoje může s vysokou pravděpodobností vést ke kritickým poruchám bezpečnostních vlastností nebo destrukcím strojů / zařízení / vozidel, které představuje přímé nebo nepřímé ohrožení na životě, či těžké ublížení na zdraví.

Třída rizika B („Selhání funkčnosti“)

Riziko, kdy selhání šroubového spoje vede k funkční poruše vozidla.

Třída rizika C („nepříjemnost pro zákazníka“)

Riziko, kdy selhání šroubového spoje vede k nepříjemnosti a nespokojenosti zákazníka.



Obrázek 3

H = Naléhavě nezbytná opatření

M = Zlepšení je třeba vzít v úvahu

G = Organizační nebo personální opatření

Zlepšení změnitelného procesu pomocí klíčových údajů

Indexy schopnosti procesu C_p a C_{pk} jsou klíčovými ukazateli statistického vyhodnocení stability procesu. Zadáte úroveň shody s cílovými tolerancemi testované veličiny dle výchozí specifikace. Hodnota koeficientu tření, specifikovaný utahovací moment a konečné předpětí součásti mohou být definovány jako testované charakteristiky.

Hodnota C_{pk} je definována pomocí střední hodnoty μ , odpovídající směrodatné odchylky σ a horní (OSG) nebo dolní (USG) toleranční meze:

$$C_{pk} = \frac{\min(\mu - USG; OSG - \mu)}{3\sigma}$$

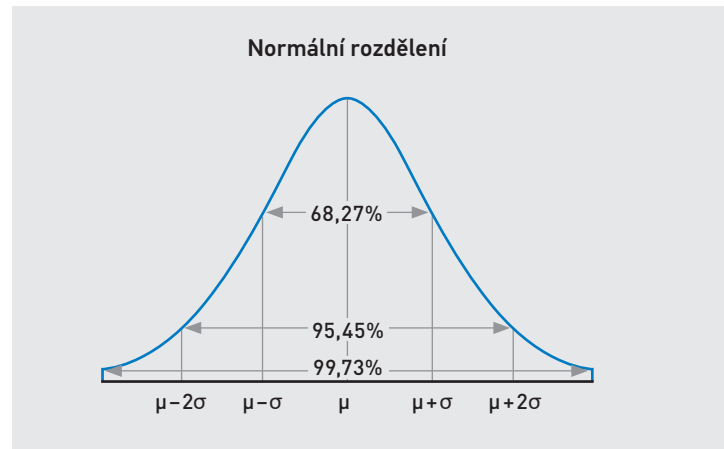
Čím je tato hodnota vyšší, tím je větší pravděpodobnost, že měřená veličina v rámci výrobní dávky je v tolerancích, které udává specifikace (stabilnější proces).

Hodnota C_p je definována jako:

$$C_p = \frac{OSG - USG}{6\sigma}$$

Hodnotu C_p lze vypočítat pouze tehdy, pokud jsou definovány horní (OSG) a dolní (USG) toleranční meze.

Zatímco hodnota C_p udává pouze poměr mezi stanovenými tolerančními mezemi a rozptylem procesu, hodnota C_{pk} zahrnuje také umístění průměrné hodnoty vzhledem ke střední hodnotě. V ideálním případě (střední hodnota je přesně uprostřed tolerančního pole), $C_{pk} = C_p$; jinak platí, $C_{pk} < C_p$.



Obrázek 4 Normální nebo Gaussovo rozdělení (podle Carl Friederich Gauss)

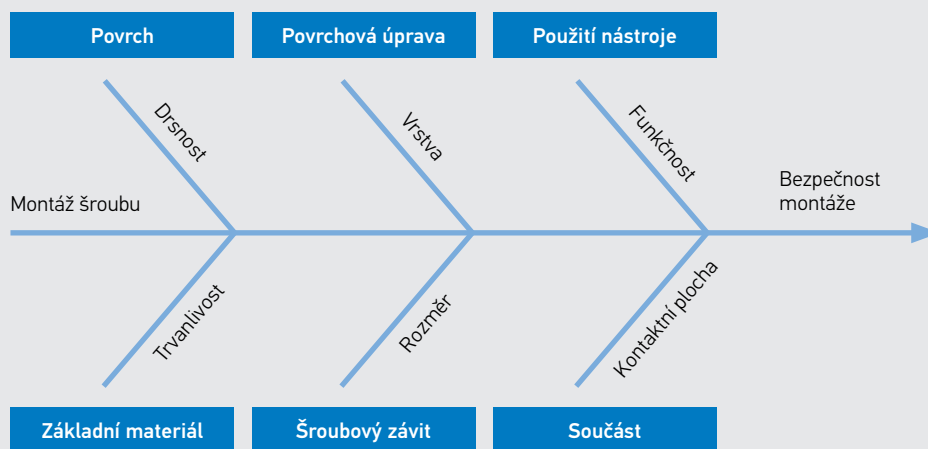
Závěr

Montážní schopnost procesu je důležitým parametrem, díky kterému je zajištěna krátká časová prostupnost výrobku montážními procesy. Odchylky v oblasti tření nebo dokonce samotné selhání šroubů vede často k neplánovaným prostojům ve výrobě. Tomu je třeba zabránit správným nastavením podmínek pro šroubovací a montážní operace. Vysoká úroveň spolehlivosti procesu proto znamená schopnost zajistit správné předpětí šroubového spoje v souladu s požadavky konstrukce.

PROČ JE TŘENÍ ŠROUBOVÉHO SPOJE ZÁSADNÍ Z HLEDISKA SCHOPNOSTI PROCESU

Spolehlivost procesu v montáži

Spolehlivost je určena převážně montážním předpětím. Montáž je prováděna na základě montážních podmínek a tribologických mezních podmínek. Síla předpětí je během montáže výrazně ovlivněna třením mezi závity a třením mezi kontaktními plochami (spojovací prvek - součást). Účinnost montáže šroubových spojů je přibližně 10 až 20%! (viz také Obrázek 8)



Obrázek 5

Tribologické mezní podmínky ve šroubovém spoji

Je zřejmé, že výsledného předpětí, které odpovídá kalkulacím konstrukce, může být dosaženo pouze v případech s jasně definovanými tribologickými mezními podmínkami. Spolehlivé montážní procesy navíc vyžadují minimální rozptyl hodnot koeficientu tření. Pro spoje kde bezpečnost konstrukce je prioritou, je nutné definovat i správně podmínky aplikace maziva. Stejně tak jako „štíhlá výroba“ přinášející kratší produkční časy a úsporu nákladů, musí i tok informací, od stanovení požadavků až po finální přijetí výrobku, být optimalizován. Činnosti ve výrobě jako např. dodatečné přípravné měření dílů nepřinášejí ve skutečnosti žádnou přidanou hodnotu a je vhodné se těmto procesům vyhnout. Tribologické suché povlaky nanášené přímo na spojovacích prvcích zlepšují požadovanou spolehlivost montáže díky definovanému rozsahu koeficientu tření pro dosažení požadovaného předpětí (např. Bossard ecosyn®-lubric). Pro zajištění spolehlivosti opakované montáže náhradních dílů je doporučeno používat vždy nové šrouby s integrovaným mazivem (tribologické povlaky).

Závěr

Ekonomická montáž je založena na jednoduchých montážních procesech s použitím správných montážních nástrojů. Tribologické vlastnosti spojovacích prvků jsou stěžejní z hlediska dosažení požadovaného předpětí spoje.

Bezpečnostní spoje by měly být tvořeny novými spojovacími prvky, v případě potřeby též příhodně označené s podpůrnou dokumentací (dohledatelnost výrobní dávky).

PROČ JE TŘENÍ ŠROUBOVÉHO SPOJE ZÁSADNÍ Z HLEDISKA SCHOPNOSTI PROCESU

Problematika tribologie

Již starověcí Egypťané kolem roku 1880 př.n.l. dokázali pohybovat obřími alabastrovými sochami díky opatřením snižujících vliv tření. Ze starých záznamů tak můžeme odvodit i současný koncept mazání s jasně definovanými tribologickými podmínkami v oblasti řízeného utahování.

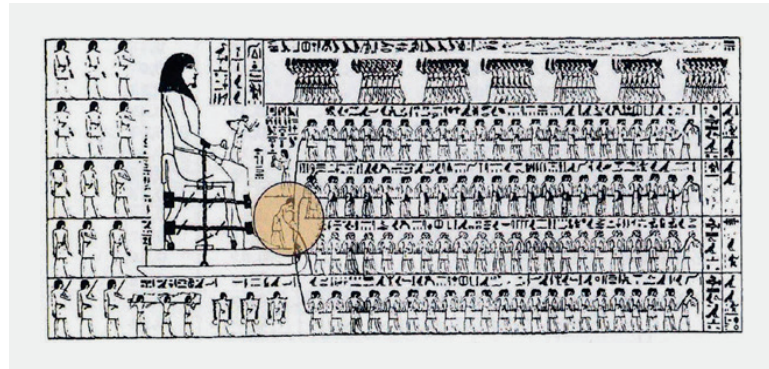
V souladu s normou DIN 51834-2 je tribologie popsána následovně: "Tribologie je věda a technologie o površích, které se vzájemně ovlivňují relativním pohybem vůči sobě navzájem. Zabývá se celou problematikou tření a opotřebení, včetně mazání, a zahrnuje i příslušná vzájemná působení hraničních povrchů jak mezi samotnými pevnými tělesy, tak i mezi pevnými tělesy, kapalinami a plyny.

Tření je interakce mezi kontaktními povrchy dvou těles. Působí v protisměru vzájemného relativního pohybu a způsobuje ztrátu mechanické energie při změně pohybu. Tření může být také definováno jako nevratný termodynamický děj.

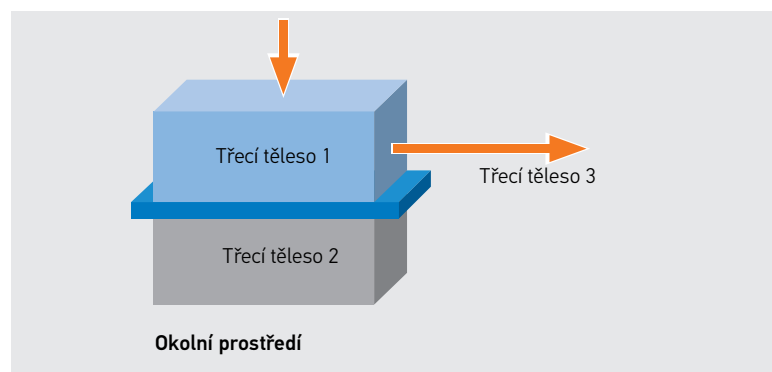
Možné rozdělení podle třídy tření vzhledem k referenčním hodnotám různých materiálů/povrchů a stavu mazání šroubových spojů naleznete v normě VDI 2230.

Uvedené data obvykle platí v laboratorních podmínkách, při pokojových teplotách a musí být proto přizpůsobeny reálné situaci, konkrétní aplikaci a podmínkám použití. Hodnoty koeficientů tření μ_{tot} , μ_{th} , μ_b vykazují určitý rozptyl, neboť jsou závislé na mnoha faktorech, např. druhu párovaných materiálů, kvalitě povrchu dílů (drsnoti), povrchové úpravě (holé, galvanické, zinkové lamely, pečetící vrstvy atd.) a stavu mazání (s/bez oleje, sulfid molybdenu, grafitové pasty, maziva PTFE atd.).

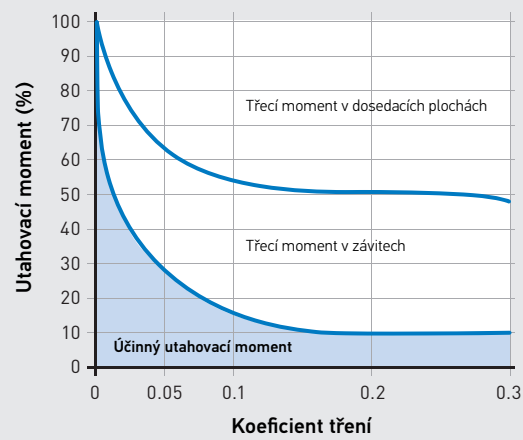
Definované rozptyly koeficientu tření jsou důležité jak pro kontaktní dosedací plochy, i pro závitovou část a předurčují tak kvalitu samotné konstrukce či spolehlivost montáže.



Obrázek 6 Přeprava alabastru Colossus v Egyptě



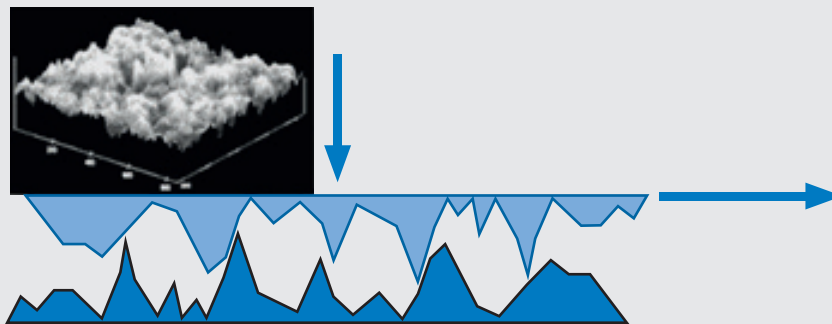
Obrázek 7 Tření ve šroubovém spoji a dělicích rovinách a jejich proměnné vlivy



$$M_A = F_M \left[\frac{d_2}{2} \tan(\rho + \rho_0) + \frac{D_{km}}{2} \tan \rho_k \right]$$

Obrázek 8 Hodnota tření μ je do značné míry závislá na: párování materiálu, kvalitě povrchu, úpravě povrchu, mazání.

Opotřebení je definováno jako progresivní ztráta materiálu z povrchu pevného tělesa způsobená mechanickou příčinou, tj. při styku a relativním pohybu dvou a více materiálů, případně v interakci s okolním kapalným či plynným prostředím. Míra opotřebení je vyjádřena výskytem rozpuštěných částic (opotřebovaných), změnou materiálu a tvarů, které mění tribologické podmínky povrchu součástí.



Obrázek 9 Opotřebení

Mazání

Celkový koeficient tření μ_{tot} maziva je stěžejní pro stanovení vhodného utahovacího momentu a výsledné síly předpětí šroubového spoje.

Bezpečnostní šroubové spoje musí být vždy mazány, zejména pak holé, galvanické či neelektrolytické povlaky stejně tak jako nerezové prvky. Běžná provozní teplota šroubových spojů je obecně mezi -50°C až max. $+80^{\circ}\text{C}$. Konvenční rozsah koeficientu tření pro spolehlivou montáž je odvozen od koeficientu tření $\mu_{tot} \geq 0.1$ (rozptyl $\mu_{tot} = 0.1-0.14$).

Je-li použito jiné mazivo s rozptylem větším než $\mu_{tot} = 0.1-0.14$ doporučuje se provést kontrolní výpočty a přenastavení procesů k zajištění požadované kvality. Hodnoty reálného koeficientu tření by měly být v případě potřeby překontrolovány pomocí odpovídajících zkoušek.

Stav „suchý“ bez použití maziva vyžaduje zvláštní pozornost a nemůže být uvažován k montáži s řízeným utahováním (koeficienty tření nejsou definovány).

Místo tekutých maziv se stále častěji využívají tribologické suché povlaky, tzv. „anti-třecí povlaky“, které jsou výhodnější s ohledem na ekonomičnost montáže.

- Mazání s definovaným koef. tření s vyšší spolehlivostí při montáži a údržbě
- Na mazání nebude zapomenuto
- Ekonomická montáž, demontáž bez dalších přípravných prací (nanášení maziva, čištění)
- Snížení nákladů montáže díky efektivnější pracovní metodě

Tribologické suché povlaky jsou systematická řešení pro mechanicky namáhané montážní prvky (šrouby, matice, podložky). Povlaky se obvykle skládají z neelektrolytických nanášených vrstev s integrovanými mazacími vlastnostmi. Vrchní povlaky, tzv. „top coats“ (např. antifrikční povlaky) vytvářejí hladký film, který vyrovnává všechny nedokonalosti na povrchu a tím optimalizuje třecí podmínky, a to i v podmínkách extrémního namáhání/napětí.

Koeficient tření v závitech bez mazání

| Materiál šroubu | Materiál matice | Rozptyl | 0.06 | 0.07 | 0.08 | 0.09 | 0.1 | 0.11 | 0.12 | 0.13 | 0.14 | 0.15 | 0.16 | 0.17 | 0.18 | 0.19 | 0.2 | 0.21 | 0.22 | 0.23 | 0.24 | 0.25 | 0.26 | 0.27 | 0.28 | 0.29 | 0.3 | 0.31 | 0.32 | 0.33 | 0.34 | 0.35 | 0.36 | 0.37 | 0.38 | 0.39 | 0.4 | 0.41 | 0.42 |
|----------------------|----------------------|-------------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|
| holý – bez PU | holý – bez PU | 0.18 – 0.35 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| holý – fostátovaný | holý – bez PU | 0.25 – 0.40 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| galvanicky zinkovaný | holý – bez PU | 0.11 – 0.36 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| holý – fostátovaný | holý – fostátovaný | 0.13 – 0.24 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| galvanicky zinkovaný | galvanicky zinkovaný | 0.18 – 0.42 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Koeficient tření v závitech lehce mazáno

| Materiál šroubu | Materiál matice | Rozptyl | 0.06 | 0.07 | 0.08 | 0.09 | 0.1 | 0.11 | 0.12 | 0.13 | 0.14 | 0.15 | 0.16 | 0.17 | 0.18 | 0.19 | 0.2 | 0.21 | 0.22 | 0.23 | 0.24 | 0.25 | 0.26 | 0.27 | 0.28 | 0.29 | 0.3 | 0.31 | 0.32 | 0.33 | 0.34 | 0.35 | 0.36 | 0.37 | 0.38 | 0.39 | 0.4 | 0.41 | 0.42 |
|----------------------|----------------------|-------------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|
| holý – bez PU | holý – bez PU | 0.14 – 0.26 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| holý – fostátovaný | holý – bez PU | 0.17 – 0.30 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| galvanicky zinkovaný | holý – bez PU | 0.11 – 0.20 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| holý – fostátovaný | holý – fostátovaný | 0.11 – 0.17 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| galvanicky zinkovaný | galvanicky zinkovaný | 0.13 – 0.22 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |












Koeficient tření v závitech se specifickým tribologickým povlakem na šroubech

| Materiál šroubu | Materiál matice | Rozptyl | 0.06 | 0.07 | 0.08 | 0.09 | 0.1 | 0.11 | 0.12 | 0.13 | 0.14 | 0.15 | 0.16 | 0.17 | 0.18 | 0.19 | 0.2 | 0.21 | 0.22 | 0.23 | 0.24 | 0.25 | 0.26 | 0.27 | 0.28 | 0.29 | 0.3 | 0.31 | 0.32 | 0.33 | 0.34 | 0.35 | 0.36 | 0.37 | 0.38 | 0.39 | 0.4 | 0.41 | 0.42 |
|---|----------------------|-------------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|
| galv. ZN + tribologický povlak v souladu s VDA235-104 | galvanicky zinkovaný | 0.09 – 0.14 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| galv. ZN + tribologický povlak antifrikční povlaky | galvanicky zinkovaný | 0.09 – 0.12 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Obrázek 10 Vliv mazání

Závěr

Tribologie může být popsána jako samostatná, interdisciplinární věda pro optimalizaci mechanického namáhání pomocí redukce tření, opotřebení a materiálových ztrát. Jelikož současné povrchové úpravy podléhají vlivům okolí, porušením povrchu, ztrátě barevnosti, změnám povrchových podmínek v závislosti na použitém materiálu šroubů, představují tribologické povlaky progresivní technologii, která dále snižuje riziko selhání šroubových spojů. Je doporučeno provádět plánované kontroly a údržbu bezpečnostních šroubových spojů.

| Cíle tribolog.opatření vedoucí k optimalizaci mechanicky namáhaných systémů | Četnost uvedených případů, dle požadavků zákazníků (100 % = 978 referencí) |
|---|---|
| 1. Prodloužení životnosti |  |
| 2. Bezúdržbovost |  |
| 3. Zvýšení zátěže/otáček (RPM) |  |
| 4. Zlepšení výroby |  |
| 5. Snižování energ.náročnosti, ztrát kapacity |  |
| 6. Snižování úniku média, těsnění |  |
| 7. Snižování hlučnosti |  |
| 8. Vysoce teplotní aplikace |  |
| 9. Snižování vibrací |  |
| 10. Snižování hmotnosti |  |
| 11. Různé |  |

Obrázek 11 Charakteristické úkoly v oblasti tribologie



Pokud potřebujete více informací, navštivte prosím naše stránky www.bossard.com/cs a kontaktujte vaši nejbližší obchodní jednotku.