

ČESKÉ VYSOKÉ UČETNÍ TECHNICKÉ V
PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Tribologie šroubových spojů

Autor:

Martin Junek

Studijní program:

Výroba a ekonomika ve strojírenství

Vedoucí práce:

Ing. Jiří Kuchař, Ph.D.

Akademický rok:

2020/2021



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Junek** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **466680**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Tribologie šroubových spojení

Název bakalářské práce anglicky:

Tribology of screw connections

Pokyny pro vypracování:

- 1) Rozbor problematiky tření a maziv
- 2) Problematika šroubových spojů
- 3) Závislosti utahovací moment - předpětí
- 4) Vyhodnocení a diskuze výsledků

Seznam doporučené literatury:

1. Applied tribology (Michael M. Khonsari, 2001)
2. Friction, Wear, Lubrication: A Textbook in Tribology, Second Edition (Kenneth C Ludema, Layo Ajayi, 2019)
3. Micromechanisms of Friction and Wear (Lyubimov Dmitrij, 2013)

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jiří Kuchař, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

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

Ing. Zdeněk Hazdra, ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání bakalářské práce: **15.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **06.08.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2021**

Ing. Jiří Kuchař, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze literaturu uvedenou v příloženém seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....

Martin Junek

Poděkování

Tímto bych velmi rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Jiřímu Kuchařovi Ph.D. a Ing. Zdeňkovi Hazdrovi za vedení, cenné rady a pomoc při zpracování této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině za podporu při studiu.

Anotace:

První část bakalářské práce je věnována teoretické rešerši problematiky tribologie, popisu tribologických zkoušek a zkušební metodice zaměřené na šroubové spoje. Dále se věnuje typům tření, mazivům a závislosti utahovacího momentu a předpětí. Druhá část je věnována experimentu, kde byl na připravených vzorcích zjišťován koeficient tření při použití různých povlaků.

Klíčová slova: tribologie, šroubové spoje, tření, povlaky, maziva, pin on table, pin on plate

Annotation:

The first part of the bachelor thesis is devoted to a theoretical research of tribology, description of the tribological tests and test methods focused on screw connections. It also deals with types of friction, lubricants, and dependence of tightening torque on preload. The second part describes experiment, where the coefficient of friction was determined on the prepared samples using various coatings.

Key words: tribology, screw connections, friction, coatings, lubricants, pin on table, pin on plate

Obsah

1	Úvod.....	7
2	Tribologie.....	8
2.1	Tribologický systém	8
3	Tření.....	9
3.1	Vnější tření	11
3.1.1	Kluzné (smykové) tření.....	11
3.1.2	Valivé tření.....	12
4	Metodika tribologického zkoušení.....	13
4.1	Metoda PIN on DISC	13
4.2	Metoda PIN ON PLATE	14
5	Šroubové spoje.....	15
5.1	Základní materiály šroubových spojů	15
5.1.1	Uhlíková ocel	16
5.1.2	Austenitická ocel.....	16
5.1.3	Hliníkové slitiny.....	16
6	Povrchové úpravy šroubových spojů	17
6.1	Zinkování.....	17
6.2	Fosfátování	17
6.3	Niklování	18
6.4	Eloxování hliníku	19
6.5	Technologie povlakování	19
6.5.1	Galvanicky (elektrolyticky)	20
6.5.2	Žárově (ponorem v roztaveném kovu).....	20
6.5.3	Difuzně (sheradizací)	21
6.5.4	Nanášení povlaků mikrolamel zinku (neelektrolyticky).....	21
7	Předpětí	23
8	Utahování.....	26
9	Tření v závitu	28
10	Mazání.....	29
10.1	Kapalná maziva	30
10.2	Plastická maziva	31
10.3	Pevná maziva.....	31
10.4	Kluzné laky.....	32
11	Destrukce spoje	32

12	Praktická část – měření koeficientu tření	34
12.1	Postup měření	34
12.1.1	Základní materiál	36
12.1.2	Galvanický zinek.....	39
12.1.3	Žárový zinek.....	43
12.1.4	Stříbrný elox.....	47
12.1.5	Černý elox	51
13	Diskuse výsledků	56
14	Závěr	59
15	Zdroje	60

1 Úvod

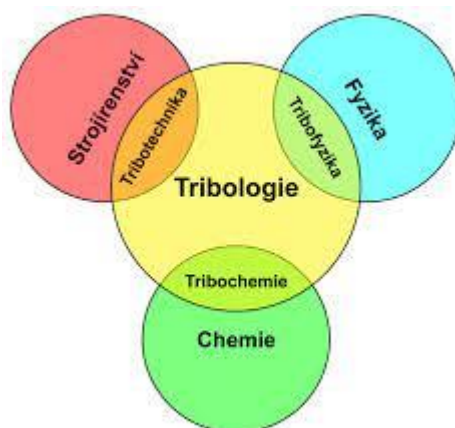
Jedním z aktuálních trendů napříč strojírenských odvětví je tlak na co nejmenší výrobní náklady, a to nejen u sestav, ale hlavně u normalizovaných komponent. Spojovací komponenty jsou vyráběny ve velkých počtech, často funkčnost a bezpečnost vyrobené sestavy či zařízení je závislá na základní komponentě, kterou je spojovací materiál. Nejpoužívanějším spojem je šroubové spojení a pro správný návrh je nutné, z pohledu bezpečnosti, zajistit několik parametrů. A to nejen technologické, jako je například povrchová úprava, ale hlavně zajistit správné nadimenzování takového spoje. Nutnou součástí návrhu spoje je výpočet bezpečnosti. Požadavkem bezpečnosti je dimenzován šroubový spoj tak, aby vydržel větší zatížení, než kterým by měl být ve skutečnosti zatěžován. Životnost a spolehlivost šroubového spoje je nejvíce ovlivňována napínací silou, na kterou má vliv koeficient a krouticí moment. Koeficient tření je výrazně ovlivňován použitým mazivem a povrchovou úpravou. [1]

Největší vliv na napětí šroubu má koeficient tření pod hlavou šroubu (50 %) a koeficient tření v závitu (40 %). Zbýlých 10 % napětí zatěžuje dřík. Proto se požaduje kontrola těchto parametrů a minimalizace jejich rozptylu, pro zajištění správného, spolehlivého a opakovatelného smontování. [1]

Cílem této bakalářské práce je porovnat vliv použití různých povrchových úprav na výsledné tribologické vlastnosti šroubového spoje. Hlavním měřeným parametrem je koeficient tření, protože nejvíce ovlivňuje předepínací osovou sílu spoje. Každý spoj by měl být utážen předepsaným momentem, tak aby splňoval odpovídající funkci a předpětí spoje.

2 Tribologie

Tribologie je vědecká, mezioborová disciplína zabývající se studiem a popisem tření, mazání a opotřebení funkčních dvojic. Zkoumá vlastnosti a vzájemné působení povrchů při jejich vzájemném kontaktu a pohybu, nebo pokusu o něj. Má za úkol shromažďovat a třídit tyto informace a následně je uplatňovat. V konkrétním případě šroubových spojů jsou zkoumány materiály šroubů, jejich povrchové úpravy a maziva, která mají snížit koeficient tření, zamezit nebo alespoň snížit opotřebení, zajistit opětovnou rozebíratelnost a prodloužit životnost spojů. [2, 8]



Obr. 1: Souvislost tribologie [2]

2.1 Tribologický systém

Tribologický systém je tvořen třecími povrchy, které jsou spolu ve vzájemném kontaktu a pohybu, mezi kterými může být vrstva maziva. V této soustavě probíhají tribologické procesy kontaktní, třecí, mazací a procesy opotřebení. Tyto procesy jsou ovlivněny provozními podmínkami systému, které mění strukturu a vlastnosti tribologické soustavy. Mezi tyto podmínky patří teplota, rychlost a druh pohybu a silové zatížení. [8]

3 Tření

Tření je způsobeno vzájemnou interakcí povrchů za vzniku pasivních odporů, působících proti jejich pohybu. Tento fyzikální jev může být jak užitečný, tak i velmi nežádoucí. Prospěšný je například při brždění jedoucího vozidla nebo při spojování rotačních součástí nalisováním, kdy je potřeba dosáhnout co nejvyššího koeficientu tření.

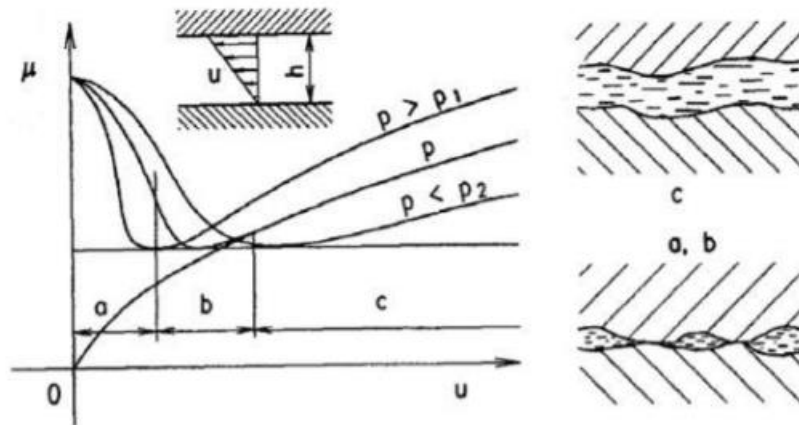
Naopak se snahou koeficient tření minimalizovat se setkáváme například v ložiskách. Proto jsou používána různá maziva, která vytváří kontaktní mezivrstvu, čímž se zamezí přímému styku povrchů a tím se sníží tření a opotřebení součástí. Třením vzniká teplo, které může být také žádoucí, či nežádoucí. Nežádoucí je hlavně v případech, kdy má negativní vliv na mazivo, degraduje ho, nebo na materiály třených součástí. [8, 9]

Důsledkem tření je ztráta mechanické energie a opotřebení kontaktních povrchů. Jedná se o proces, při kterém dochází k úbytku materiálu. Velikost tření je závislá na drsnosti povrchu, přítláčné síle a hmotnosti tělesa, případně vlastnostech použitého maziva. [8]

Tření lze rozdělit do čtyř skupin podle toho, jak jsou stykové plochy mezi tělesy odděleny od sebe.

- Tření suché (bez maziva)
- Tření s tuhým mazivem
- Tření s kapalným mazivem
- Tření s mezivrstvou plynu

Při tření s přítomností maziva může docházet ke kontaktu mikronerovností na styčných plochách. Jedná se o tření smíšené, tedy kombinaci tření s mazivem a tření suchého. Smíšené tření je v praxi velmi časté. Vzniká při tenké vrstvě maziva, které nepokryje všechny nerovnosti dotýkajících se povrchů. Závislost součinitele tření na rychlosti pohybu stykových ploch popisují Stribeckovy křivky. [9]



Obr. 2: Stribeckovy křivky [9]

V oblasti a) dochází k suchému tření, kde snižující rychlostí dochází k odírání povrchů až k jejich zadření. Oblast b) je oblast smíšeného tření, kdy klesá opotřebení vlivem zvyšující se rychlosti. Oblast c) představuje oblast kapalného tření, kde jsou povrchy pokryty mazivem. Vzhledem k opotřebení povrchů je nejvýhodnější kapalně tření, při kterém dochází k minimálnímu styku povrchů. [9]

Tab. 1: Velikost součinitele tření s různými mazivy [2]

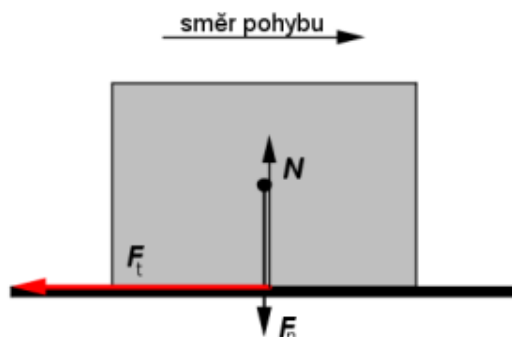
Třecí stav	Mazivo	Koeficient tření
Suché tření	-	0,01 - 0,25
Smíšené tření	Částečně mazáno	0,01 - 0,2
Kapalné tření	Kapalné mazivo	0,01 - 0,1
Valivé tření	Valivé těleso	0,001 - 0,0001
Plynové tření	Plyn, stlačený vzduch	0,0001 - 0,0005

Při konstrukci je podstatné vědět, zda je v dané situaci tření přínosem, nebo naopak nežádoucím jevem. V případech již zmíněných ložisek, motorů a dalších strojních systémů, kde je cílem dosáhnout plynulého pohybu, je nutností snížit tření, aby došlo ke zvýšení životnosti výrobků a snížení poruchovosti. Lze to také chápat jako snahu o co nejefektivnější využití dodané mechanické energie bez přeměny na energii tepelnou. [1]

V systémech, které svou konstrukcí a funkcí mají zajistit co největší možné tření mezi pohybujícími se díly, je nežádoucí přítomnost maziv. V těchto systémech, například při brždění, vzniká velké množství tepelné energie, které je potřeba dostatečně odvádět, aby v dílech nebo na jejich povrchu nedošlo k strukturním změnám materiálu. [2, 8]

3.1 Vnější tření

3.1.1 Kluzné (smykové) tření



Obr. 3: Smykové tření [6]

Součinitel kluzného tření μ je dán vztahem dle Coulombova zákona, který tento jev popsal a provedl experimentální pokus v roce 1799.

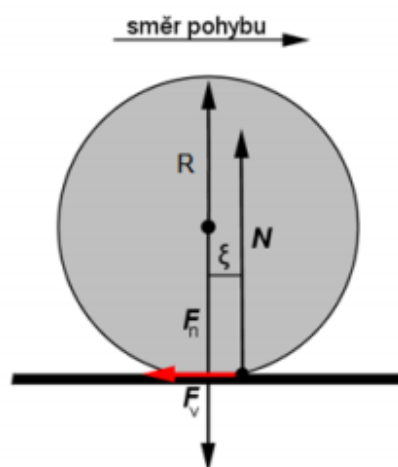
$$\mu = \frac{F_t}{F_n} [-] \quad (1)$$

Součinitel tření je označován μ . F_t je třecí síla, která působí proti směru pohybu a kolmo na tuto sílu působí síla přítlačná F_n . Rozlišujeme dva druhy koeficientu tření, statický a dynamický. Pohybující se těleso má o 20 až 30 % nižší frikční koeficient, než kdyby stejné těleso stálo na místě. [6, 9]

Tab. 2: Součinitele smykového tření pro různé kombinace materiálů stykových ploch [2]

Materiály stykových ploch	Statický	Dynamický
	μ_0	μ
Ocel/ocel – za sucha	0,15	0,1
Ocel / bronz – za sucha	0,18	0,16
Ocel / bronz – mazáno	0,1	0,01
Ocel / led	0,027	0,014
Guma / asfalt – za sucha	0,85	0,3
Guma / asfalt – mokro	0,2 - 0,5	0,15
Řemenice (ocel) / řemen (kůže, pryž)		0,2 - 0,9

3.1.2 Valivé tření



Obr. 4: Valivé tření [7]

Při pohybu tělesa kruhového pohybu po podložce vzniká valivé tření. Princip valení je znázorněn na obrázku. Normálová síla F_n působí v těžišti směrem dolů. Směrem vzhůru působí síla N , posunutá o vzdálenost ξ . Velikost ξ je rameno valivého odporu. R je poloměr valeného tělesa. Síla potřebná pro valení, značená F_v , se počítá dle následujícího vzorce. [7]

$$F_v = \xi \frac{F_n}{R} [N] \quad (2)$$

Velikost valivého tření je oproti smykovému značně menší, a to 10x až 20x. I přesto se jedná o ztrátu, a proto se pro uložení rotačních součástí používají ložiska, která tyto ztráty snižují. [7]

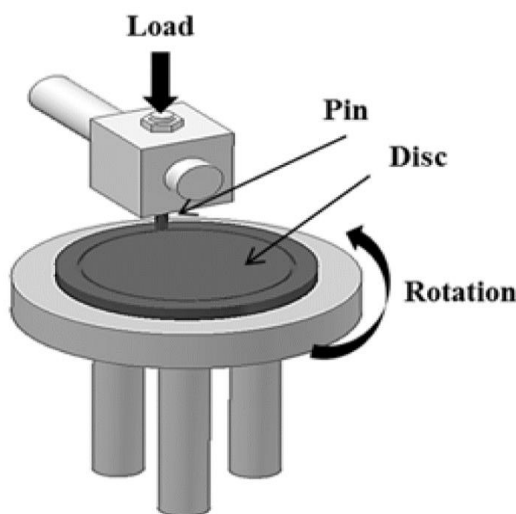
4 Metodika trilogického testování

Tribologické zkoušky mají různý průběh, vždy záleží na konkrétní metodě. Metody se odlišují hlavně druhem pohybu. Zkušební zařízení nese název tribometr. Pracovní prostor tribometru musí být izolovaný od okolního prostředí, aby nebyly ovlivněny výsledky měření. Izolace je prakticky řešena ochranným krytem, díky kterému se dosáhne při měření konstantních podmínek. V izolovaném pracovním prostoru se nachází třecí snímač, v jehož okolí je sledována teplota a vlhkost. [24]

4.1 Metoda PIN on DISC

Metoda PIN ON DISC spočívá ve vtlačování pevně uchyceného tělesa (pinu) ve tvaru kuličky do rotujícího vzorku definovanou silou. Při rotačním pohybu začne vznikat opotřebená oblast ve tvaru kružnice. Ta nesmí mít moc malý poloměr, aby hodnoty opotřebení nebyly ovlivněné teplem, vznikajícím při tření. Naměřené opotřebení a koeficient tření jsou ovlivňovány následujícími parametry: [24]

- Zatěžující síla
- Geometrie pinu
- Relativní rychlost pohybu pinu a vzorku
- Počet cyklů
- Teplota povrchu vzorku
- Fyzikální a mechanické vlastnosti použitých materiálů vzorku a pinu
- Kvalita povrchu vzorku
- Okolní prostředí (vlhkost, teplota a přítomnost maziva) [24]

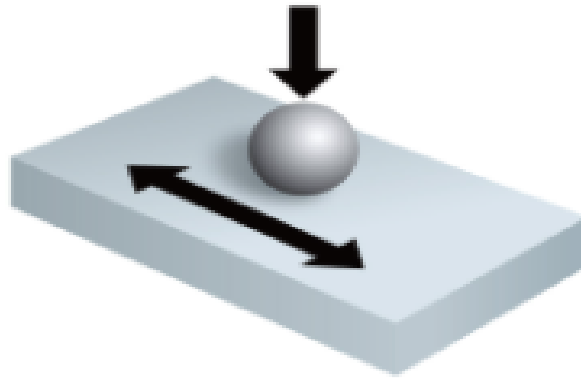


Obr. 5: Metoda PIN ON DISC [15]

4.2 Metoda BALL ON PLATE

Tato metoda využívá přímočarý, vratný pohyb mezi funkčními dvojicemi. Pevným členem je pin upnutý v paralelogramu a pohyblivým členem je zkušební deska na valivém vozíku. Tento pohyb je nerovnoměrně zrychlený, vyvolaný elektromotorem se šnekovou převodovkou s klikovým mechanismem.

Rychlost vratného pohybu může být 0 až 0,192 m/s. Pákový mechanismus paralelogramu přenáší zatížení na pin, který je tím přitlačován na zkušební desku. Naměřené hodnoty jsou ovlivňovány stejnými parametry jako u metody PIN ON DISC. [2]



Obr. 6: Metoda BALL ON PLATE [25]

Mezi další metody tribologického zkoušení patří například metoda block on table, block on ring a V-pair blocks on pin. [25]

5 Šroubové spoje

Spojování dílů lze rozdělit do dvou hlavních skupin, spoje rozebíratelné a spoje nerozebíratelné. Spojení lze zvolit na základě jeho funkce, způsobu zatížení, splnění požadavků na pevnost, ale i s přihlédnutím k hledisku ekonomickému. Rozebíratelné spojení lze uskutečnit mnoha způsoby, například pomocí šroubů, čepů, klínů, kolíků, pojistných kroužků a drážkových spojů. Patří sem všechny spoje, které lze po spojení opět rozebrat bez poškození spojených dílů. Naopak nerozebíratelné spoje lze rozebrat pouze za vzniku trvalé deformace dílů. Mezi nerozebíratelné spoje patří spoje nýtové, svařované, pájené a lepené. [3, 14]

Spojení pomocí šroubů je jedno z nejpoužívanějších řešení rozebíratelného spojení. Funkční plochou šroubu a matice je závit. Šroubové spoje rozdělujeme na:

- Maticové šrouby s hlavou a maticí
- Závrtné šrouby
- Šrouby a matice pro speciální použití

Šrouby mohou mít hlavu šestihrannou, čtyřhrannou, válcovou, zápustnou, půlkulatou nebo ve tvaru T. Běžné šrouby a matice jsou normalizovány pro jednodušší zaměnitelnost. [14]

Z konstrukčního hlediska lze rozdělit šroubové spoje na spoje bez předpětí a předepjaté. Šroubové spoje bez předpětí jsou používány zřídka. Většina šroubových spojů je předepjatá. Šrouby jsou utaženy potřebným kroutícím momentem na předepsané montážní předpětí Q_0 . Tímto předpětím vznikne osová síla, která má za následek vznik silových vazeb v kontaktních plochách závitu. Tímto způsobem je dosaženo pevnosti celého spoje. [14]

5.1 Základní materiály šroubových spojů

Mezi nejčastěji používané materiály pro výrobu spojovacích součástí patří uhlíková ocel a austenitická ocel. Pro lehké konstrukce, například v leteckém průmyslu, jsou šrouby vyráběny z titanových nebo hliníkových slitin. Šrouby a matice jsou vyráběny z různých materiálů a různými postupy, čímž lze dosáhnout rozdílných mechanických vlastností. Rozdělujeme je do pevnostních tříd. [10]

5.1.1 Uhlíková ocel

Jedná se o nejběžnější a nejlevnější materiál. U těchto šroubů jsou používána maziva například ve formě past nebo olejů. Při použití maziva se na bocích závitů vytvoří film, který usnadní smontování i případnou demontáž. Povolování spoje bez použití maziva způsobuje problémy velkým zatížením závitových boků. Může to vést k poškození závitu, kdy je nutno při opětovné montáži použít nový šroub a matici. Také může dojít k zadření závitové dvojice nebo k úplné destrukci spoje. [10]

5.1.2 Austenitická ocel

Šrouby zhotovené z austenitické oceli vykazují mnohem větší náchylnost k zadření než šrouby z uhlíkové oceli. Toto je způsobeno mechanickými vlastnostmi jako je houževnatost a tažnost. Při suchém tření tento šroubový spoj dosahuje vysokého součinitele tření od 0,2 do 0,5. [10]

Na snížení součinitele tření u těchto materiálů nejsou oleje vhodné. Nejčastěji se používají pasty s tuhými mazivy a kluzné laky, které koeficient sníží na hodnoty obvyklé u šroubů uhlíkové oceli (0,03 – 0,08). [10]

Austenitická ocel je používána kvůli její odolnosti vůči korozi a konstantní houževnatosti v širokém teplotním rozsahu od -200 °C do +500 °C. Nejčastěji jsou používány v elektrárnách, jaderných reaktorech a chemických zařízeních. Použití za vyšších teplot vyžaduje maziva bez obsahu síry, která se může za těchto podmínek odštěpit i ze sloučeniny (například MoS_2). Poté dojde k reakci s niklem. Ta probíhá na hranicích zrn a u namáhaného dílu je příčinou vzniku koroze pod napětím. [10]

5.1.3 Hliníkové slitiny

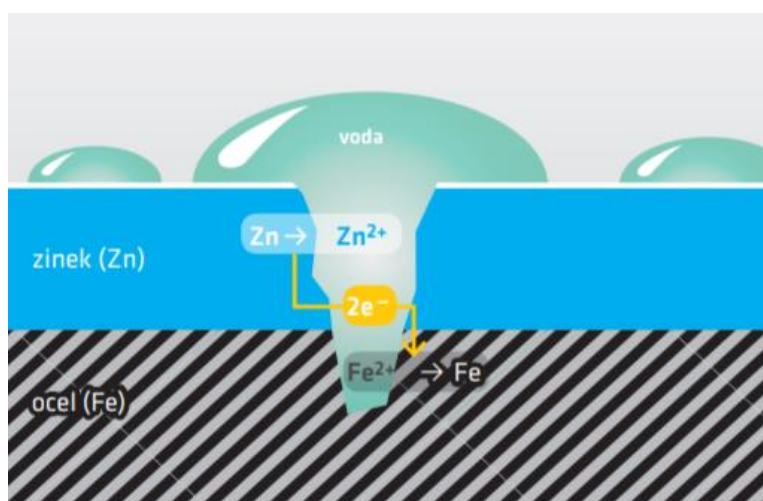
Šrouby z hliníkových slitin jsou nejčastěji používány pro odlehčení konstrukcí. Tyto slitiny jsou odolné korozi i při porušení jejich ochranné vrstvy vytvořené elektrolytickou oxidací, takzvaná eloxovaná vrstva. Tyto vrstvy mohou mít velké barevné spektrum, a proto jsou také velmi žádané jako designové prvky. [26]

6 Povrchové úpravy šroubových spojů

Povrchové úpravy rozebíratelných spojů ovlivňují tření, životnost a bezpečnost. Stejně jako maziva mají povrchové úpravy vliv na napínací síly. Protikorozní odolnost, otěruvzdornost a snadná montáž/demontáž spoje závisí na zvolené povrchové úpravě, případně vhodném mazivu. Povrchové úpravy spojů pomáhají odolávat vysokým teplotám, agresivnímu prostředí a velkému zatěžování. [4, 12]

6.1 Zinkování

Nejpoužívanější povrchovou úpravou jsou povlaky zinku a jeho slitin. Tento povlak je využíván, protože zajišťuje katodickou ochranu. Železo a zinek spolu ve vlhku vytváří elektrický člunek za vzniku hydroxidu zinečnatého. Tato reakce probíhá do úplného spotřebování zinku.



Obr. 7: Schéma katodické ochrany zinkového povlaku [22]

Děje se tak díky vyšší ušlechtilosti železa nad zinkem z pohledu elektrochemie. Základní materiál tedy není narušen korozí i když dojde k porušení povlaku, ochráněny jsou tak souvislé plochy, hrany i profily závitů. Výhodou zinkového povlaku je dobrá korozní odolnost, nízké náklady a dlouhá životnost (i 40 a více let dle tloušťky povlaku). [4, 22]

6.2 Fosfátování

Fosfátování je chemický děj, při kterém dochází k přeměně fosforečnanů, odstraní se mikroskopická vrstva železa a vznikne tenká vrstva oxidu manganického nebo oxidu zinečnatého. Povrch získá šedo-černé zbarvení a je odolný vůči otěru.

Fosfátovat nelze korozivzdornou ocel, oceli s vyšším obsahem niklu a neželezné kovy. Fosfátový povlak nechrání povrch proti korozi kvůli velké porézitě vrstvy. Pro dosažení střední úrovně korozní odolnosti jsou fosfátové povlaky dodatečně napuštěny olejem. Porézní vrstva je dobrým nosičem lubrikantů, čehož se využívá, aby se snížil koeficient tření na povrchu. Chemická podstata této vrstvy elektricky izoluje povrch součásti. [15]

6.3 Niklování

Niklové povlakování se provádí galvanicky nebo chemicky. Galvanické povlaky jsou často nedokonalé. Problém je především nerovnoměrná tloušťka povlaku a malý podíl zabudovaných částic. Při galvanickém pokovení je nanášena vrstva niklu, při chemickém je výsledný povlak slitinou niklu a polytetrafluorethylenu (PTFE). PTFE bývá ve směsi obvykle 20 až 30 %. [20]

Chemicky vytvořené niklové povlaky vykazují oproti galvanickým mnohem lepší rovnoměrnost vrstvy u vnějších i vnitřních ploch dílů. Také dosahují vyšší korozní odolnosti, tvrdosti a oteruvzdornosti. Podíl zabudovaných částic je také větší. Tyto povlaky jsou aplikovány na tření namáhané součásti například u pump, motorů a na spojovací materiál. [20]

Dalšími možnými příměsemi v niklovém povlaku může být diamant, používá se syntetický, nebo levnější varianta s karbidem křemíku (SiC). Obsah PTFE je pak nižší než 20 %. Kompozitní povlaky chemického niklu dosahují nízkého koeficientu tření, mnohem vyšší tvrdosti a oteruvzdornosti. Lze jimi nahradit povlaky tvrdochromu. Používají se například u ventilů, forem a řezných nástrojů. [20]

Avšak i chemické pokovení má své nedostatky a tou je hlavně náročnost procesu. Problémem je nutnost kontinuální filtrace, kterou suspenze někdy neumožňuje. Při přidání částic s velkým povrchem dochází k velké zátěži lázně. Navíc proces je potenciaálně termodynamicky nestabilní. Přítomností cizích látek v lázni vzniká riziko lokálního rozkladu lázně. [20]

Tab. 3: Porovnání koeficientu tření. Základní údaje: Tloušťka povlaku cca. 20 μm , $F=20\text{ N}$, $v=800\text{ mm/min}$, $Ra=0,9$ až $1,1\ \mu\text{m}$, $t=60\text{ min}$, poloměr pinu $r=5\text{ mm}$, ocel (0,4 % C) [20]

Testovaná soustava	Zatížení		Kof. dyn. tření	
	Pin (m^3/Nm)	Disk (m^3/Nm)	Začátek	Konec
Ocel/Ocel	$5,5 \times 10^{-12}$	$8,2 \times 10^{-12}$	0,48	0,73
Ocel/ Chemický nikl (9 %)	$3,4 \times 10^{-13}$	$7,4 \times 10^{-13}$	0,44	0,56
Ocel/Tvrdochrom	$6,9 \times 10^{-14}$	$5,0 \times 10^{-15}$	0,25	0,71
Ocel/Chemický nikl PTFE	$3,0 \times 10^{-15}$	$3,5 \times 10^{-15}$	0,15	0,16

6.4 Eloxování hliníku

Mezi nejvýznamnější povrchové úpravy hliníku a jeho slitin patří anodická oxidace – eloxování (elox, eloxal – elektrolytická oxidace Al). Eloxované vrstvy mají dobrou korozní odolnost, otěruvzdornost i tvrdost a jsou dobře barvitelné přidáním pigmentu. Při procesu eloxování se na povrchu součásti vytváří vrstva oxidu hlinitého (Al_2O_3), působením stejnosměrného (méně často střídavého) proudu. Katoda je tvořena elektrodou z olova, hliníku, titanu nebo korozivzdorné oceli. [26]

6.5 Technologie povlakování

Základním předpokladem správně vytvořeného povlaku je čistý základní materiál. Snahou je, se co nejvíce přiblížit ideální čistotě povrchu, čímž lze významně zlepšit přilnavost vrstvy na základním materiálu. U difuzních povrchových úprav nečistoty brání prostupu prvků do povrchové vrstvy.

Před samotným provedením povrchové úpravy, musí být pokovovaná součást zbavena nečistot. Pevné částice, například zbytky barvy nebo strusky po svařování je nutno očistit mechanickými postupy. Například tryskáním, kartáčováním nebo broušením. Oleje a tuky se odstraňují ponorem do alkalických odmašťovacích roztoků. Rzi a okují se povrch následně zbaví mořením za použití zředěné kyseliny chlorovodíkové (HCl) nebo sírové (H_2SO_4).

Častěji se používá kyselina chlorovodíková, protože roztok dosahuje vysoké účinnosti již při 25 až 30 $^\circ\text{C}$. U roztoku kyseliny sírové je zapotřebí teplota 45 až 60 $^\circ\text{C}$. Jde tedy o velmi značný rozdíl spotřeby energie při udržování mořicích lázní na daných teplotách. Po moření musí vždy následovat oplach. Celý tento proces se souhrnně nazývá předúprava povrchu.

6.5.1 Galvanicky (elektrolyticky)

Galvanické pokovení probíhá na principu elektrolýzy, lze ho použít pouze na pokovení vodivých materiálů. Soustavu tvoří vana s elektrolytem, ve kterém jsou ponořeny elektrody, kterými prochází stejnosměrný proud ze zdroje. Katodou je pokovovaný předmět, anoda zastává funkci doplňování kovu do elektrolytu, též nazývána obětovanou elektrodou. Proto musí být vyrobena z čistého kovu, u zinku se požaduje čistota 99,95 % Zn. Elektrolyt je roztok jedné nebo více solí kovu, který nanášíme na povrch součásti. Může být kyselý, zásaditý i neutrální.

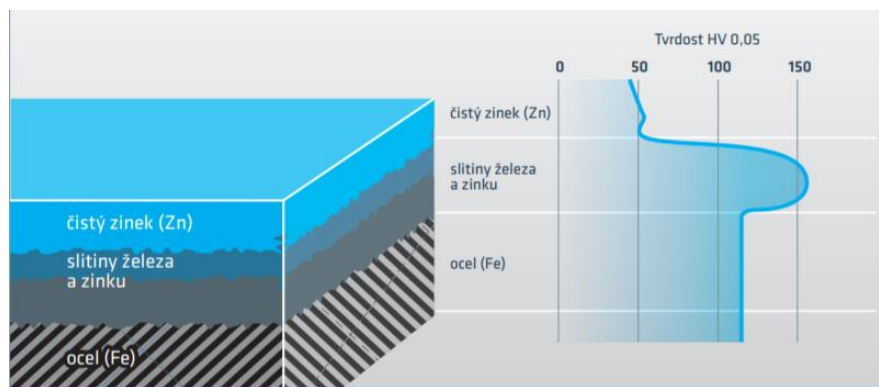
Tloušťka vrstvy je snadno ovlivnitelná, například dobou průchodu proudem, galvanický povlak se vyznačuje jemnozrnnou strukturou. Ekonomicky se vyplácí do vrstvy 15 až 20 μm , poté je již výhodnější žárový zinek.

Galvanicky lze také vytvořit kompozitní povlaky poskytující samomaznost, kluznost, tvrdost a otěruvzdornost. Povlak bývá označován ECC (Elektrodeposited Composite Coating). Kompozitní povlak Zn-PTFE je složen z galvanicky vyloučené zinkové matrice a disperzních částic PTFE, rozptýlených v kovové matrici. Předností tohoto povlaku je nízký součinitel tření, dosahující díky teflonovým částicím hodnot pod 0,2. [4]

6.5.2 Žárově (ponorem v roztaveném kovu)

Po proběhnutí předúpravy povrchu je potřeba použití tavidla, které rozpouští oxidy jak na ocelovém podkladu, tak i na povrchu zinkové lázně. Při ponoru do zinkové lázně tak dojde k čistému styku kovů. Žárové pokovení probíhá ponorem do tavné lázně, v níž je roztavený zinek o teplotě 450 °C. Vzniklý povlak dosahuje tloušťky 50 až 200 μm a chrání celoplošně i v dutých prostorech. [4, 22]

Vzniklý povlak má velmi dobrou soudržnost se základním materiálem, díky vzájemné difuzi kovů vzniknou pevné slitiny železa a zinku, které vykazují vyšší tvrdost i odolnost vůči korozi. [22]



Obr. 8: Schématické naznačení žárově zinkovaného povlaku [22]

6.5.3 Difuzně (sherardizací)

Sherardizace je prakticky tepelně-chemické zpracování materiálu, kdy zinek difunduje do povrchu součásti, čímž změní jejich chemické složení a vlastnosti. Jde tedy o nízkoteplotní termodifuzní zinkování. [21]

Nejprve musí být základní materiál důkladně očištěn od pevných nečistot, mastnoty, rzi a okují. Následuje moření a poté důkladné sušení, aby se zabránilo vniknutí páry při sherardizaci. Ta by mohla mít za následek výbuch. Sherardování probíhá v bubnech s práškovou směsí při teplotách 300 až 400 °C. Za vyšších teplot probíhá difuze lépe, ale musí být menší, než je teplota tavení zinku (419 °C). [21]

Směs je tvořená alespoň z 95 % zinkovým práškem a zbytek je křemenný písek. Ten pracuje jako unášec zinkového prášku v bubnu a zároveň brání slevování zinkového prášku. Lze dosáhnout tloušťky povlaku 15 až 120 μm , záleží na délce trvání procesu. Velkou výhodou povlaku je schopnost kopírovat obrysy povrchu, čehož se využívá například u závitů. [21]

Povrchová vrstva je odolná proti korozi, dosahuje vyšší otěruvzdornosti a chrání před vodíkovou křehkostí. Také lépe odolává střídavým teplotním změnám a má vyšší teplotní odolnost než žárový povlak zinku. Tato technologie je vhodná pro hromadné aplikování na menší díly, šrouby, matice, nýty a další. Je omezená rozměry bubnů. [21]

6.5.4 Nanášení povlaků mikrolamel zinku (neelektrolyticky)

Povlaky s mikrolamelami zinku jsou rozděleny na systémy ředidlové a vodní. Oba systémy se nanášejí na lince Dip-Spin, která se používá pro hromadné pokovování

šroubů. Princip spočívá v ponoření koše se šrouby do studené emulze, následným odstředěním pomocí gravitace a vytvrzení v peci. Výhodou je zamezení vzniku vodíkové křehkosti. [11, 18]

Povrchová úprava Delta MKS je neelektrolyticky nanášený povlak, ředitelný na bázi vody ze zinkových mikrolamel. Povlak je složen ze směsi zinku, hliníku a pojiva. Změnou obsahu pojiva lze ovlivňovat součinitel tření. Díky malým rozměrům mikrolamel lze získat velmi tenký povlak (4 μm). [11, 18]

7 Předpětí

Únosnost šroubového spoje závisí na velikosti tření mezi dosedacími povrchy, předpínací síle, vyvozené utažením šroubu, a na velikosti i tvaru otvoru pro šroub. V praxi je většinou využívána předpínací síla rovná 63 % meze kluzu u šroubů z materiálu pevnostní třídy 10.9 a 56 % meze kluzu u materiálu pevnostní třídy 8.8. [16]

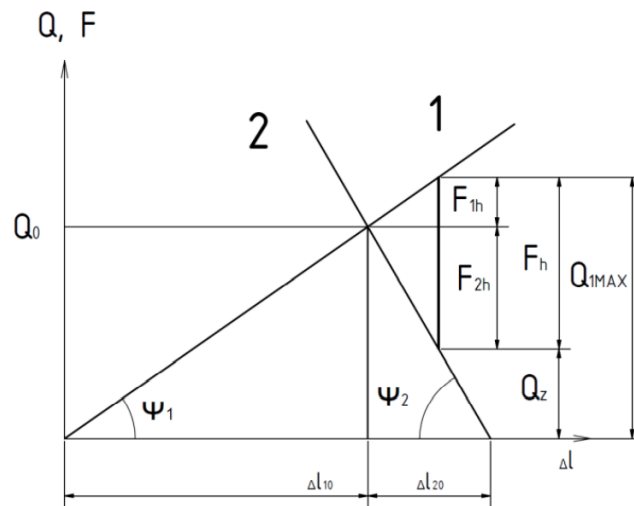
Předpínací sílu lze kontrolovat pomocí utahovacího momentu, úhlu pootočení šroubu nebo kombinovanou metodou. Sílu lze ověřit i pomocí měrek. Do spoje se umístí speciální podložky, které se při utažení danou silou elasticky deformují a poté se měrkou zjistí velikost spáry, tedy uzavření spoje. [16]

Velikosti předpětí šroubového spoje Q_0 závisí na tuhostech přitěžovaných částí spoje C_1 a odhlehčovaných částí C_2 spoje. Také závisí na součiniteli provozního předpětí q_z a zatěžující síle F_h , podle vzorce:

$$Q_0 = \left(q_z + \frac{C_2}{C_1 + C_2} \right) \cdot F_h \quad (3)$$

Tuhosti jednotlivých částí se odvíjejí od velikosti spojovaných dílů a jejich mechanických vlastností. [14]

Utažením vyvozená osová síla Q_0 namáhá šroub na tah a zároveň jsou stejnou silou svírány spojované díly. Pro určení maximální osově síly působící na šroub a pro výpočet pevnostní kontroly spoje slouží montážní diagram předepjatého spoje. Utahováním spoje dochází k prodloužení šroubu a zároveň ke stlačování spojovaných dílů k sobě. [14]



Obr. 9: Montážní a pracovní diagram předepjatého šroubového spoje [14]

Popis veličin z montážního diagramu předepjatého šroubového spoje na obrázku 9:

Q_0 [N] ... montážní předpětí spoje

ΔL_1 [mm] ... deformace (prodloužení) šroubu vlivem montážního předpětí

ΔL_2 [mm] ... deformace (stlačení) sevřených částí vlivem montážního předpětí

$C_1 = \operatorname{tg} \psi_1$ [$N * mm^{-1}$] ... konstanta tuhosti šroubu

$C_2 = \operatorname{tg} \psi_2$ [$N * mm^{-1}$] ... konstanta tuhosti sevřených částí

Q_{1MAX} [N] ... maximální provozní napětí zatěžující spoj

F_{1h} [N] ... část složky osově provozní síly přitěžující šroub

F_{2h} [N] ... část složky osově provozní síly odlehčující sevřené části

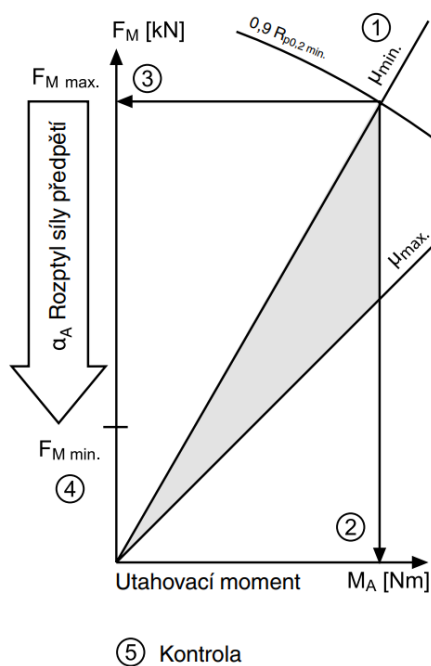
F_h [N] ... maximální vnitřní osová síla ve šroubu

Q_z [N] ... zbytkové předpětí sevřených částí

Pro spolehlivou kontrolu předpínací síly utahovacím momentem, úhlem pootočení šroubu nebo kombinovanou metodou se dané sestavy (šroub, matice, podložky a mazivo) experimentálně ověřují normovou zkouškou dle ČSN EN 14399 1 až ČSN EN 14399 10. [16]

Velikost předpětí, rozpětí maximální a minimální předepínací síly, lze u normalizovaných šroubů přibližně určit pomocí řady tabulek, experimentálně sestavených švýcarskou společností Bossard. Tento postup návrhu předpětí shrnuje diagram na obrázku 10. Jde pouze o orientační návrh, je tedy nutné před použitím ověřit údaje výpočtem nebo normovanou zkouškou. [27]

V první kroku je určen dle typu povlaku minimální tabulkový koeficient tření těchto povrchů. V druhém kroku se určí maximální utahovací moment při povoleném využití 90 % smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$. V tabulce závislosti síly předpětí a utahovacího momentu se pomocí maximálního momentu zjistí maximální síla předpětí. Přibližnou minimální sílu předpětí lze vypočítat vydělením maximální síly koeficientem utahování, pro nějž byla rovněž sestavena tabulka na základě experimentálních výsledků. [27]

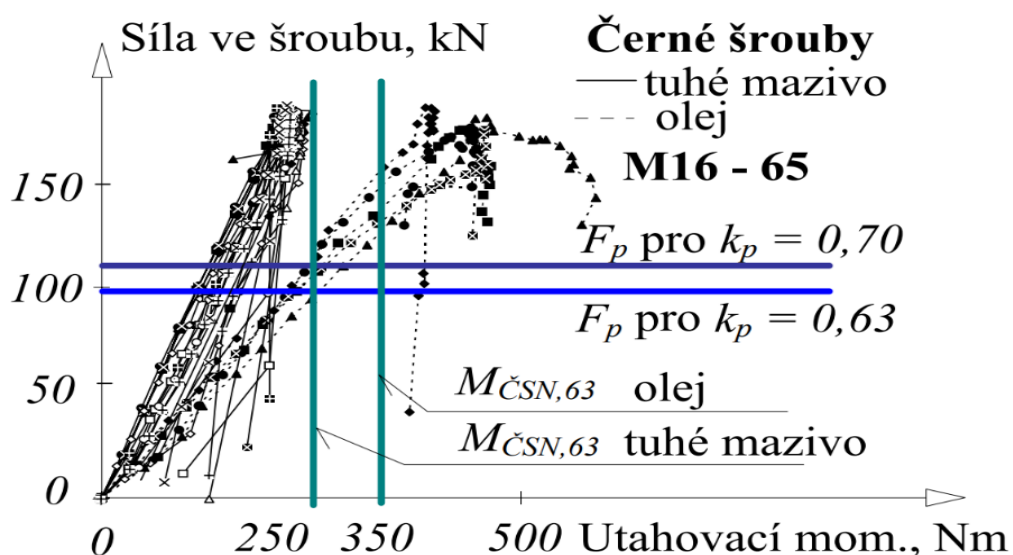


Obr. 10: Postup zjištění rozptylu síly předpětí [27]

8 Utahování

Montáž šroubového spoje by měla probíhat v určité posloupnosti několika základních kroků za použití správného vybavení. V první řadě je třeba ze závitů odstranit pevné nečistoty, které se mohou usadit v profilu závitu při skladování nebo přepravě. Mohlo by dojít k zadření závitu vlivem jejich sevření mezi závity šroubu a matice. [23]

Druhým krokem je použití předepsaného nebo vhodného maziva pro daný spojovací materiál na předepsaných plochách. Obvykle jde o plochy pod hlavou šroubu, pod maticí a o profil závitu. Tím se sníží koeficient tření a zajistí možnost opětovné demontáže. [23]



Obr. 11: Vliv maziva na utahování šroubu [16]

Třetím důležitým krokem je vlastní utažení. Každý spoj má předepsaný utahovací moment, který by měl být dodržen. Při výskytu více šroubů v jedné oblasti spoje se doporučuje šrouby utahovat postupně křížem a alespoň ve 3 krocích. Ideální je nejprve utáhnout všechny šrouby rukou a poté postupně dotahovat momentovým klíčem na 40, 70 a 100 % předepsaného utahovacího momentu. Nakonec probíhá kontrola všech šroubů, zda jsou utaženy na 100 % daného utahovacího momentu. Pak lze spoj prohlásit za správně smontovaný. [23]

Správné utahování šroubových spojů lze provádět metodami měření utahovacího momentu, měření úhlu otočení, měření prodloužení šroubu, nebo hydraulickým utahováním. [23]

V praxi je nejčastější metoda měření utahovacího momentu, kdy se používá kalibrovaných ručních, elektrických, pneumatických nebo hydraulických momentových klíčů. Šrouby se nemusí nijak upravovat a dosahuje se dostatečné přesnosti utahovacího momentu. [23]

Měření prodloužení šroubu se provádí pomocí mikrometru, ale šrouby vyžadují úpravu čela šroubu. Nebo se prodloužení měří tenzometrickým napětím, je tedy nutné na každý šroub instalovat snímače. Při potřebě velmi přesného měření lze provést měření pomocí ultrazvuku, ale jedná se o finančně velmi nákladnou možnost. [23]

Hydraulické utahování se provádí za pomoci napínáků, kdy po uvolnění tlaku dojde k dosednutí ploch závitů a materiálů. Výhodou je rychlost, možnost utahovat více šroubů zároveň a přesnost. Nevýhodou je nutnost použití delších šroubů, kvůli upnutí do napínáku, a metoda je prostorově náročnější. [23]

Tab. 4: Přesnost a rozptyl sil uvažovaných ve výpočtu dle ČSN EN 1591-1 pro jeden šroub [23]

Utahovací metoda	Měří se	Ovlivňující veličiny	Rozptyl [%]	
			-	+
klíč	bez měření, podle citu	tření, tuhost, zkušenost	$30+50\alpha$	$30+50\alpha$
nárazový klíč	bez měření	tření, tuhost, kalibrace	$20+50\alpha$	$20+50\alpha$
momentový klíč	moment	tření, tuhost, kalibrace	$10+50\alpha$	$10+50\alpha$
hydraulický momentový klíč	hydraulický tlak	tuhost, délka šroubu, kalibrace	20	40
klíč nebo hydraulický momentový klíč	prodloužení šroubu	tuhost, délka šroubu, kalibrace	15	15
klíč	úhel natočení matice	tuhost, tření, kalibrace	10	10
klíč	moment a natočení matice	kalibrace	7	7
α je součinitel tření mezi šroubem a maticí				
Při použití hydraulického momentového klíče nejsou rozptyly stejné, protože se vyvolá dodatečná síla dřív na šroub než na matici				

Tab. 5: Přesnost a rozsahy momentových klíčů [23]

MOMENTOVÉ NÁŘADÍ – KLÍČE				
Typ pohonu	RUČNÍ	ELEKTRICKÝ	PNEUMATICKÝ	HYDRAULICKÝ
Orientační rozsahy utahovacích momentů	(0) 10 až 2.800 Nm	35 až 50.000 Nm	35 až 50.000 Nm	170 až 85.000 Nm Provozní tlaky 20 až 700 bar
Přesnost	+/- 6 %	+/- 5 %	+/- 5 %	+/- 3 %

9 Tření v závitu

Míra tření v závitech a mezi stykovými plochami matic a hlav šroubů je ovlivněna: materiálem, ze kterého byla matice či šroub zhotoven, drsností dotýkajících se ploch, povrchovou úpravou materiálu, mazivem a velikostí zatížení. Vyšší součinitele tření v závitech odpovídají vyššímu zatížení šroubového spojení, nižší pak nižšímu. Průměrné hodnoty součinitele tření ve stykové ploše vybraných povlaků uvádí literatura [3] v rozmezí od 0,13 do 0,25. [3]

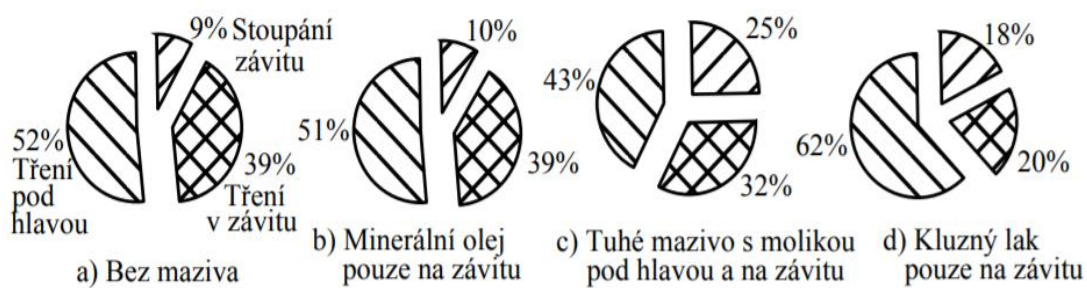
Tab. 6: Příklady součinitele tření v závitech f_z [3]

Povrch závitu šroubu	Nemazaný	Mazaný
Kovově lesklý (neupravený)	0,20 - 0,35	0,16 - 0,24
Fosfátovaný	0,28 - 0,40	0,17 - 0,30
Pozinkovaný	0,15 - 0,35	0,14 - 0,18
Kadmiovaný	0,10 - 0,18	0,10 - 0,17

10 Mazání

Prioritní funkcí maziv je zabránit dotyku povrchů dílů, které jsou ve vzájemném pohybu, a tím eliminovat koeficient tření v tribologickém uzlu a snížit v něm míru opotřebení. [2]

Významný vliv k dosažení napínací síly ve šroubových spojkách má výběr vhodného maziva. Správně zvolené mazivo významně prodlužuje životnost spoje. Vrstva maziva ve spojkách snižuje pnutí v závitu, méně se namáhá dřík šroubu na krut a při utahování spoje dochází k menšímu otěru než při utažení za sucha. Pokud není použito mazivo, vznikají při utahování povrchové kapiláry a třením dojde ke vzniku mikrosvarů, které vedou k zadření spoje. [16]



Obr. 12: Vliv použití různých maziv na tření ve šroubovém spoji [16]

K tomuto nežádoucímu jevu dochází především u šroubů, které byly vyrobeny z vysoce legovaných materiálů, mezi něž se řadí např. austenitická ocel. Tento typ oceli nevytváří tenkou oxidovou vrstvu na povrchu, která by za normálních okolností snižovala tření. Pro dosažení větších svěrných sil u šroubů z těchto ocelí, kdy součinitel tření nabývá hodnot větší než 0,3, je nutné použít vhodné mazivo s malým součinitelem tření. [5]

Zkoumané vlastnosti maziv lze rozdělit na funkční, kam patří hustota, relativní hustota a vlastnosti reologické. Reologické jsou tokové vlastnosti, patří mezi ně dynamická a kinematická viskozita, stlačitelnost a tepelná vodivost. Další skupinou jsou vlastnosti elektrické, jde o elektrickou vodivost a permitivitu. Mezi životnostní vlastnosti patří odolnost proti oxidaci a odolnost proti působení různých energií, například světla, elektrických výbojů, záření nebo tepelné energie. Do skupiny povrchových vlastností patří maznost, čistící a rozptylovací schopnost olejů, schopnost ochrany před korozí, pění olejů, schopnost tvořit emulze a rozpouštěcí schopnost.

Poslední skupinou jsou fyziologické vlastnosti, jde o zmenšení nežádoucích dopadu na životní prostředí, škodlivý účinek maziv na živé organismy, postih dýchací a trávicí soustavy, kůže či karcinogenost. [2]

Maziva lze rozdělit v závislosti na skupenském stavu na:

- Kapalná
- Plastická
- Pevná

10.1 Kapalná maziva

Z hlediska konstrukce tribologických systémů je nejvhodnějším, a tedy i nejčastěji používaným mazivo v kapalném stavu. Způsoby dosažení kontinuálního mazání lze rozdělit na hydrodynamické, hydrostatické a elastohydrodynamické. [2]

Při hydrodynamickém mazání se tlak v mazací vrstvě tvoří samočinně mezi pohybujícími povrchy díky proudění v klínové mezeře. Pro správnou funkci této konstrukce je nutným předpokladem přilnutí maziva k povrchům pohybujících se těles a existence relativního pohybu mezi vnějším zatížením a prouděním maziva. Klínová mazací mezera se musí zužovat ve směru relativního pohybu. [2]

Hydrostatické mazání používá pro vytvoření nosné vrstvy maziva tlak hydrogenerátoru, který přivádí mazivo do uzlu pod tlakem 2 až 4x větším, než je střední hodnota tlaků v systému vzniklých geometrií uložení a jeho zatížením. [2]

Elastohydrodynamické mazání je principiálně stejné jako hydrodynamické mazání, avšak zohledňuje pružné deformace třecích členů v závislosti na nerovnoměrném zatížení a na změně vlastností maziva za proměnných podmínek. [2]

Kapalná maziva se používají při hydrodynamickém, hydrostatickém mazání, dochází ke kapalinovému a smíšenému tření. Jsou nejpoužívanějším typem lubrikantů, které jsou nadále rozvíjeny pomocí aditiv, které zlepšují jejich vlastnosti. Jsou rozlišovány ropné oleje, syntetické oleje a anorganická kapalná maziva a taveniny, což jsou vodné roztoky nebo taveniny sodných skel, převážně používané při zpracování kovů. [2]

Jedním z problémů při používání olejů k mazání šroubových spojů, je jejich kapalnost. Mohou samovolně vytékat ze spoje, či vlivem gravitace vytvořit nerovnoměrný

mazací film. Také poměrně rychle vysychají. Mezi další nevhodné vlastnosti patří změna viskozity, jejich rychlá degradace, karbonizace a zejména pak nedostatečná odolnost vůči tlakům při utahování spoje [5, 10]

10.2 Plastická maziva

Plastická maziva, dříve označována jako mazací tuky jsou převážně vyráběna jako gely nebo pasty. Skládají se ze dvou částí, spojitá (disperzní) část tvoří mazací film a druhou částí je zpevňovadlo, tedy dispergovaná fáze. Vzhledem ke složení plastických maziv, kdy jejich hlavní složkou jsou ropné nebo syntetické oleje (až 85 %), mají podobné vlastnosti jako mazací oleje. Nesnesou vysoké teploty a tlaky, díky zpevňovadlům mají vyšší viskozitu. Často se používají pro ložiska, ozubená soukolí a kluzná vedení. [2, 10]

10.3 Pevná maziva

Tuhá maziva se začala vyrábět a používat vzhledem k potřebě mazat za extrémních tlaků a teplot, záření a dalších vlivů. Při těchto podmínkách, které maziva na bázi ropných i syntetických olejů nemají šanci snést, si udržují dobrou stálost i mazné vlastnosti. [2, 10]

Pevná maziva lze rozdělit na:

- Anorganické s laminární strukturou – jedná se o sulfidy, selenidy, molybden (Mo), wolfram (W), titan (Ti), grafit, fluorid a další.
- Anorganické s jinou strukturou – Sb_2S_3 , B_2O_3 , PbO , LiF apod.
- Organické – Polymerní, polyaromatické tuky, vosky a jejich deriváty
- Měkké kovy – Pb, Sn, In, Cd, Ag a jejich slitiny
- Kluzné látky – třecí plochy dílů se stříkají grafitem, sulfidy nebo siričkem molybdeničitým (MoS_2) při teplotách přes 500 C a následně se vypalují.

Jedná se o pevné látky, které jsou schopny od sebe oddělit povrchy, které po sobě kloužou, a tedy snížit tření v uzlu vlastním úbytkem. Kromě grafitu je často využívaná měď, olovo, hliník, nikl či siričk molybdeničitý (Mo_2S). [5, 10]

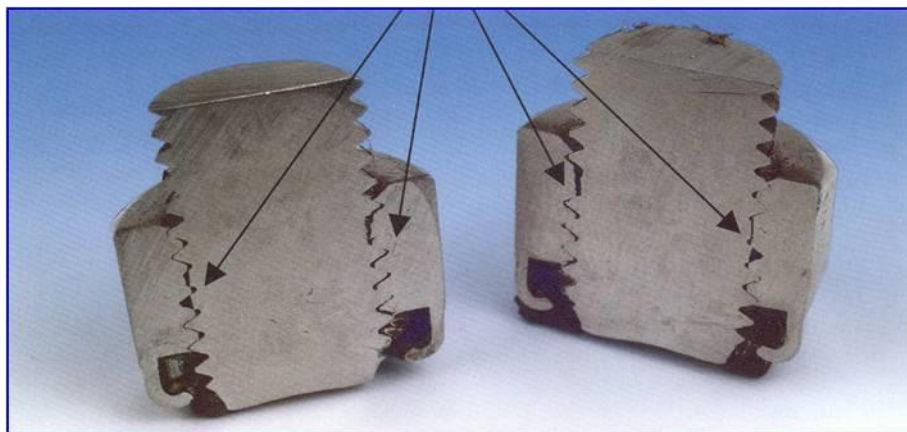
10.4 Kluzné laky

Jedná se o druh speciálních nátěrů nebo nástřiků, které mohou být používány i při teplotách dosahujících 300° C. Takto ošetřené povrchy dosahují velmi nízkého koeficientu tření, kolem 0,03. Kluzné laky se aplikují v bubnu. Poté následuje sušení a k získání vyšší odolnosti se vypalují. Kluzné laky ve spreji se aplikují nástřikem, po kterém následuje sušení. [5, 10]

11 Destrukce spoje

Nejčastěji dochází k selhání šroubového spoje při nedostatečné napínací síle. Důsledkem vibrací dojde k únavovému lomu šroubu, a tedy k selhání šroubového spoje. Pomocí utahovacích úkonů, tj. otočení o jistý úhel, dotažení stanoveným kroučícím momentem nebo jejich kombinací lze dosáhnout požadovaného předepnutí šroubového spoje. Pro tyto účely používáme například měřidla úhlu pootočení a momentové klíče. [4, 5]

Také kvůli vysokým kontaktním tlakům a následnému vzniku mikrosvarů dochází k zadření závitu a tím k selhání šroubového spoje. Při utahování dochází ke styku závitu šroubu a matice. Nejprve dochází ke tření na úrovni nerovností stykových ploch. Pokud je šroubový spoj narušen korozí nebo je nedostatečně promazán, dochází ke zvýšení tření a ke zvyšování teploty ve spoji. Při stálém zvyšování tření dojde k zadrhnutí a při další manipulaci, například při následném utahování se šroub ukrotí. Nejvíce náchylné k zadření jsou šroubové spojení vyrobené z austenitické oceli a hliníku. [4, 5]



Obr. 13: Zadření šroubového spoje [17]

Při vystavení šroubového spoje vyšší teplotě dochází díky tepelné roztažnosti k namáhání materiálu. Vlivem použitého materiálu vznikne na šroubu vrstva okují,

kteřá zabraňuje povolení šroubového spoje. K nejčastějšímu poškození korozi dochází u nelegované oceli. Při utahování šroubu, kdy každý závit má boční vůli, vznikají kapiláry, do kterých vniká vlhkost či plyny, způsobující korozi. [10, 19]

Vhodným použitím patřičného maziva můžeme snadno předejít většině příčinám selhání šroubových spojů, tj. nedostatečná napínací síla či zadření. To, že napínací síle je velmi závislá na součiniteli tření, tzn. na použití maziva, popisuje následující rovnice. [10, 19]

$$M_a = F_M * \left(0,16 * P + 0,58 * d_2 * \mu_G + \frac{D_{km}}{2 * \mu_K} \right) \quad (4)$$

M_a [Nm] ... utahovací moment

F_M [N] ... napínací síla

P [mm] ... stoupání závitu

d_2 [mm] ... střední průměr šroubovice závitu

μ_G [-] ... součinitel tření v závitě

$D_{km}/2$ [°] ... účinný třecí rádius hlavy

μ_K [-] ... součinitel tření dosednutí hlavy

Aby nedocházelo k povolení a později rozpadu šroubového spoje, při vyvození osově síly, je potřeba brát v potaz geometrické vlastnosti závitu. Pojmem samosvornost se rozumí vlastnost, při které za předpokladu působení osově síly nedochází k samovolnému otáčení šroubu. Podmínka samosvornosti říká, že úhel stoupání šroubovice γ musí být menší nebo roven redukovanému úhlu tření φ' . [3]

$$\gamma \leq \varphi'$$

12 Praktická část – měření koeficientu tření

Experimentální část bakalářské práce se zabývá měřením koeficientu tření na základním materiálu šroubu a porovnáním s koeficienty naměřenými na ochranných povlacích běžně používaných v praxi. Celé měření probíhalo na sucho, tedy bez přítomnosti maziv. Měřené vzorky byly připraveny z jiných experimentů, pro tento účel měření byly upraveny rozměry vzorků z důvodu způsobilosti upnutí do měřicího zařízení.

12.1 Postup měření

Každý vzorek byl nejprve očištěn a odmaštěn za použití technického lihu a vždy nového ubrousku. Poté proběhlo měření tloušťky povlaku pomocí přístroje Elcometr 456, který lze použít na měření povlaků ocelových dílců. Pro měření eloxované vrstvy na hliníku byl použit přístroj Elcometr 224. Oba přístroje byly předem zkalibrovány.



Obr. 14: Elcometr 456 [foto autora]



Obr. 15: Elcometr 224 [28]

Následně byla měřena drsnost povrchu vzorků, neboť drsnost povrchu je jeden z hlavních parametrů, který ovlivňuje výsledný koeficient tření. Zaznamenávaly se parametry drsnosti Ra a Rz pomocí přístroje Mitutoyo SJ-301 ve dvou na sebe kolmých směrech.



Obr. 16: Drsnoměr Mitutoyo SJ-301 [foto autora]

Dále následovalo vážení vzorků na váze. Poté byly vzorky opět odmaštěny a provedeno tribologické měření na tribometru od firmy RTEC, konkrétně šlo o stroj MFT 5000. Každý vzorek byl měřen 5x za stejných podmínek na proměřených plochách. Jedno měření trvalo 30 minut a probíhalo na dráze 25 a 35 mm, podle toho, jaký byl výsledný rozměr měřeného vzorku. Zátěžnou zkušební silou bylo 10 N. Jako pin byla použita kulička z korundu o poloměr 6,3 mm. Tato kuličku, uchycená v kleštině, byla po každém měření pootočená a odmaštěna, aby bylo docíleno konstantních podmínek jednotlivých měření. Počítač propojený s tribometrem pomocí programu od firmy RTEC ukládal data a graficky vyhodnocoval proběhnutá měření.



Obr. 17: Tribometr MFT-5000 propojený s počítačem [foto autora]

Po každém jednom měření byl vzorek vyjmut ze stroje, stopa po pinu očištěna od oddělených částí povlaku a vzorek byl znovu zvážen. Postupně jsem zaznamenal hmotnostní úbytky všech povlaků i základního materiálu.

Následuje souhrn všech naměřených hodnot u zkoumaných vzorků.

12.1.1 Základní materiál

Jako základní materiál šroubu byla pro experiment zvolena ocel, konkrétně uhlíková ocel 12 040 ve formě obdélníkového profilu o rozměrech 50x12x8 mm.



Obr. 18: Základní materiál před měřením [foto autora]



Obr. 19: Základní materiál po měření [foto autora]

Tab. 7: Vážení vzorků základního materiálu před a po měření

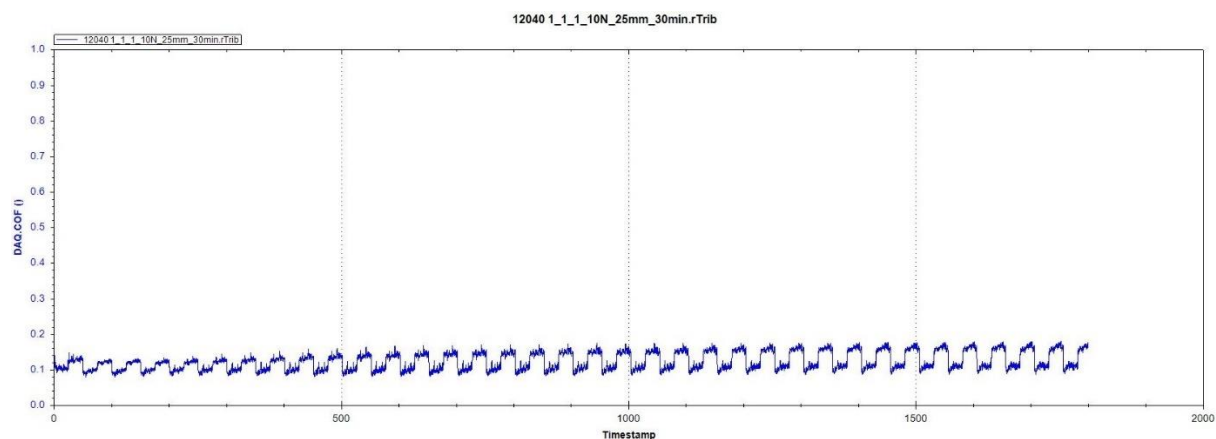
1. vzorek	Hmotnost [g]					
	Před	Po				
		Dráha 1	Dráha 2	Dráha 3	Dráha 4	Dráha 5
	91,3113	91,3112	91,3112	91,3111	91,3110	91,3109
	91,3114	91,3112	91,3111	91,3111	91,3108	91,3108
	91,3112	91,3113	91,3111	91,3110	91,3109	91,3108
Průměr	91,3113	91,3112	91,3111	91,3111	91,3109	91,3108

Hmotnostní úbytek základního materiálu je 0,000094 g.

Tab. 8: Měření drsnosti vzorku základního materiálu

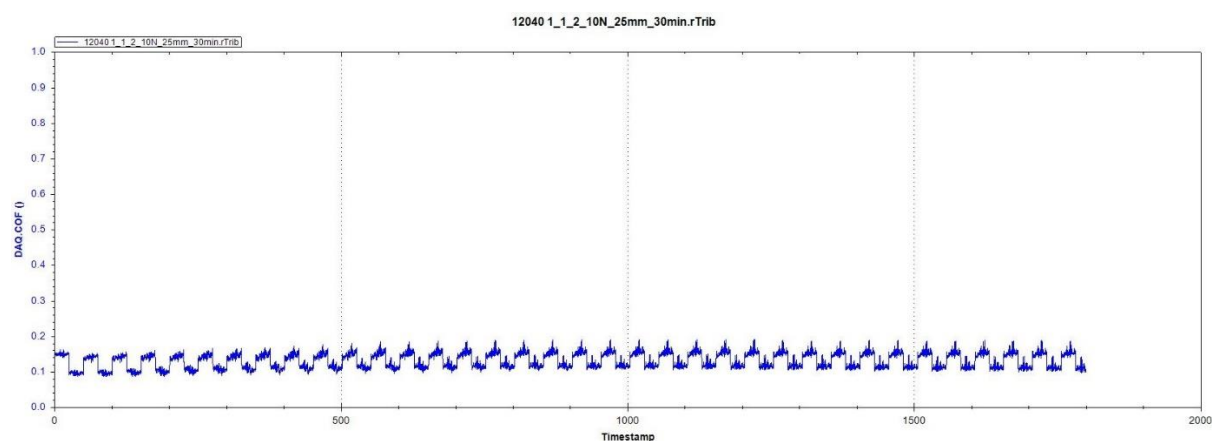
Měření	Vzorek 1				Vzorek 2			
	Strana 1				Strana 1			
	Směr y		Směr x		Směr y		Směr x	
	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1	2,63	13,97	2,73	16,38	1,53	10,72	1,88	12,88
2	2,2	10,63	2,83	14,8	2,92	15,24	2,64	14,17
3	2,46	14,4	2,38	13,57	2	10,32	2,71	15,02
4	2,97	15,85	2,4	13,67	1,76	10,6	2,74	13,73
5	2,31	13,03	3,06	15,47	2,2	12,66	2,8	16,64
Průměr	2,51	13,58	2,68	14,78	2,08	11,91	2,55	14,49
	Strana 2				Strana 2			
1	2,45	14,13	2,51	14,13	1,98	11,23	2,17	11,65
2	2,63	15,25	2,74	16,97	2,12	11,98	1,89	10,96
3	2,42	12,98	2,26	13,21	2,65	14,86	1,94	11,24
4	2,12	10,28	2,84	14,68	2,37	13,67	2,54	13,25
5	2,23	11,34	3,01	16,24	2,16	12,62	2,39	12,66
Průměr	2,37	12,80	2,67	15,05	2,26	12,87	2,19	11,95

Grafické záznamy průběhu tribologického měření:



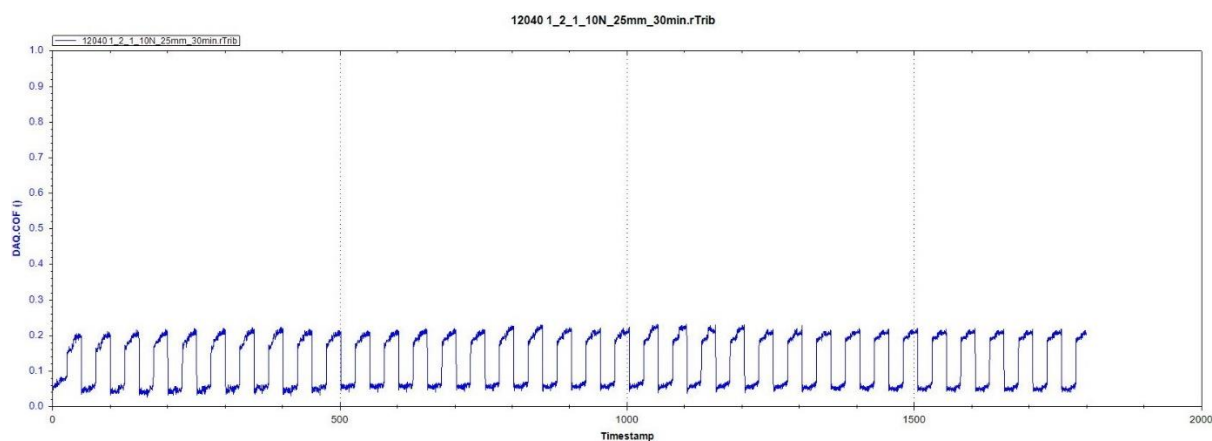
Graf 1: Záznam tribologického měření na vzorku základního materiálu 1, strana 1, dráha 1

Průměrný koeficient tření při prvním měření na základním materiálu je 0,1238.



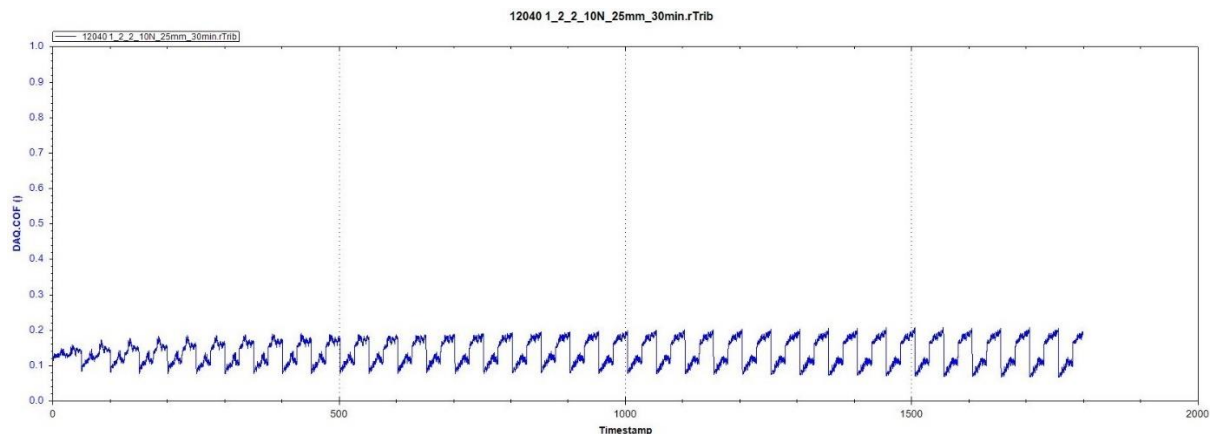
Graf 2: Záznam tribologického měření na vzorku základního materiálu 1, strana 1, dráha 2

Průměrný koeficient tření při druhém měření na základním materiálu je 0,1309.



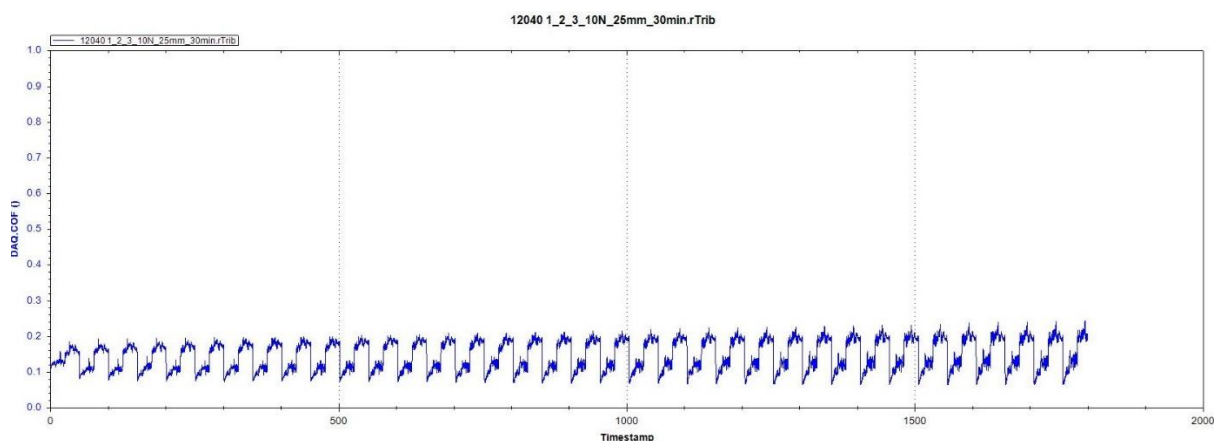
Graf 3: Záznam tribologického měření na vzorku základního materiálu 1, strana 2, dráha 1

Průměrný koeficient tření při třetím měření na základním materiálu je 0,1257.



Graf 4: Záznam tribologického měření na vzorku základního materiálu 1, strana 2, dráha 2

Průměrný koeficient tření při čtvrtém měření na základním materiálu je 0,1376.



Graf 5: Záznam tribologického měření na vzorku základního materiálu 1, strana 2, dráha 3

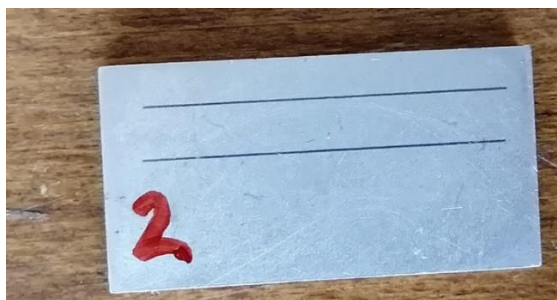
Průměrný koeficient tření při pátém měření na základním materiálu je 0,1464.

12.1.2 Galvanický zinek

Na desku základního materiálu byl galvanicky nanesen povlak zinku. Vzorky měly rozměry 30x15x4 mm.



Obr. 20: Vzorek s galvanickým zinkem před měřením [foto autora]



Obr. 21: Vzorek s galvanickým zinkem po měření [foto autora]

Tab. 9: Vážení vzorků s galvanickým zinkem před a po

2. vzorek	Hmotnost [g]					
	Před	Po				
		Dráha 1	Dráha 2	Dráha 3	Dráha 4	Dráha 5
	12,7036	12,7034	12,7031	12,7029	12,7028	12,7027
	12,7037	12,7034	12,7032	12,7030	12,7029	12,7028
	12,7035	12,7034	12,7032	12,7030	12,7028	12,7026
Průměr	12,7036	12,7034	12,7032	12,7030	12,7028	12,7027

Průměrný úbytek povlaku galvanického zinku byl naměřen 0,00018 g.

Tab. 10: Měření tloušťky povlaku galvanického zinku v μm

Vzorek	1		2		3	
č. měření	1. strana	2. strana	1. strana	2. strana	1. strana	2. strana
1	12,6	18	14,5	18,1	15,8	18,2
2	13,1	18,1	15,3	18,8	15,8	18,4
3	14,3	18,9	15,7	18,9	16	18,8
4	14,6	19	15,8	19	16,1	18,9
5	14,7	19,4	16	19,4	16,5	19,3
6	14,8	19,4	16,1	19,4	16,8	19,6
7	15,6	20,4	16,6	19,5	17	19,9
8	15,7	20,6	16,8	22,3	17,1	20,8
9	16,4	22,5	17,6	22,9	17,5	21,1
10	16,5	22,8	18,6	25,5	17,6	23,4
Průměr	14,9	19,8	16,2	20	16,6	19,6
Směr. Odchylka	0,943398	1,27224	0,683625	1,513068	0,561249	0,897218

Tab. 11: Měření drsnosti povlaku galvanického zinku, vzorek 2

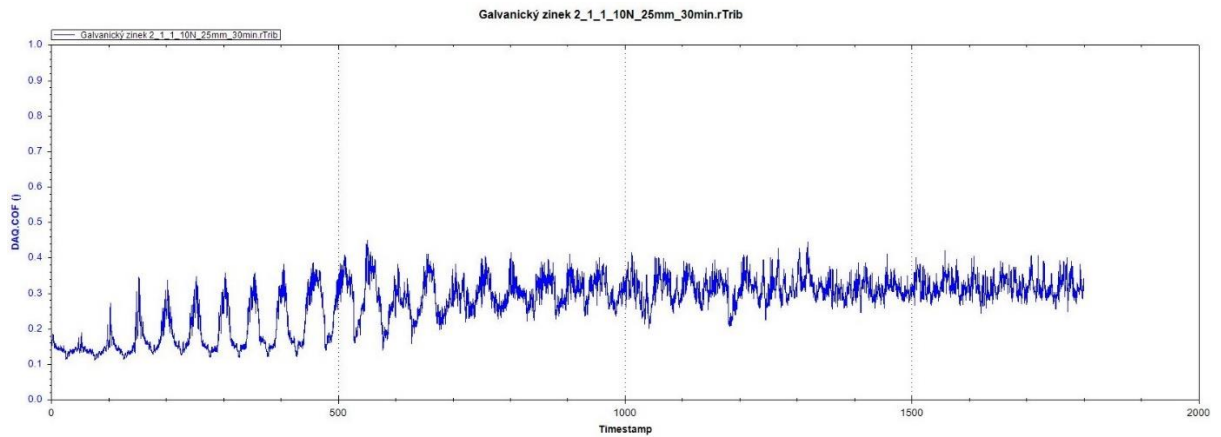
Vzorek 2				
Měření	1. strana		2. strana	
Směr y	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1	0,45	4,3	0,5	4,72
2	0,43	3,11	0,45	3,81
3	0,51	3,98	0,64	7,25
4	0,4	3,36	0,45	3,88
5	0,4	3,2	0,4	3,37
Průměr	0,44	3,59	0,489	4,61
Směr x	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1	0,63	5,91	0,47	4,18
2	0,44	3,79	0,48	4,19
3	0,45	3,67	0,41	3,92
4	0,41	2,88	0,48	3,96
5	0,45	3,05	0,51	4,03
Průměr	0,48	3,86	0,47	4,06

Tab. 12: Měření drsnosti povlaku galvanického zinku, vzorek 3

Vzorek 3				
Měření	1. strana		2. strana	
Směr y	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1	0,44	3,68	0,43	3,35
2	0,33	2,63	0,5	3,47
3	0,43	3,66	0,47	3,77
4	0,38	2,97	0,39	3,48
5	0,36	3,25	0,53	4,84
Průměr	0,39	3,24	0,46	3,78
Směr x	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1	0,31	2,57	0,5	5,13
2	0,33	2,91	0,39	3,99
3	0,37	3,36	0,3	3,82
4	0,4	4,02	0,32	4,19
5	0,49	4,63	0,38	3,56
Průměr	0,38	3,5	0,38	4,14

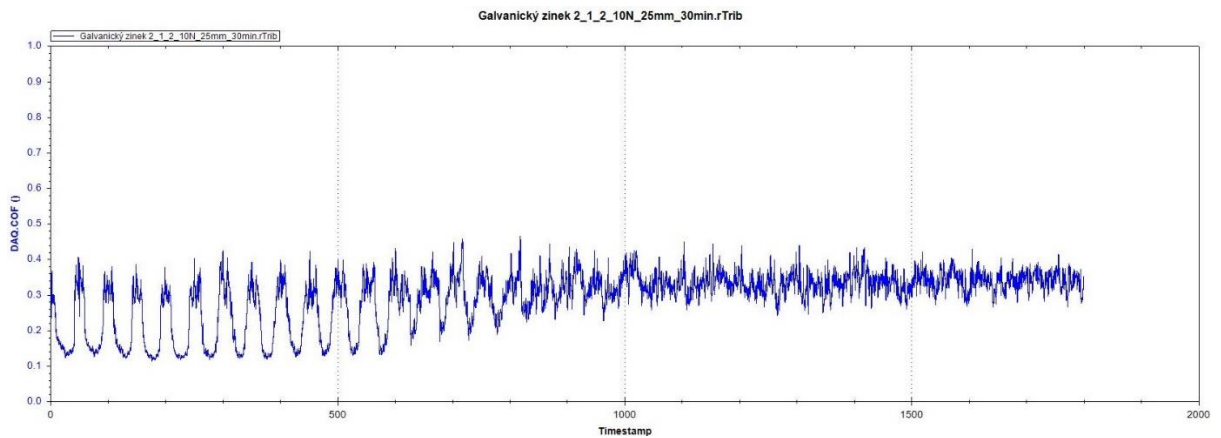
Na vzorku 1 se vyskytovala značná rýha způsobená nešetrnou manipulací, proto by výsledky měření drsnosti byly zkreslené. Z tohoto důvodu vzorek nebyl proměřen.

Grafické záznamy průběhu tribologického měření:



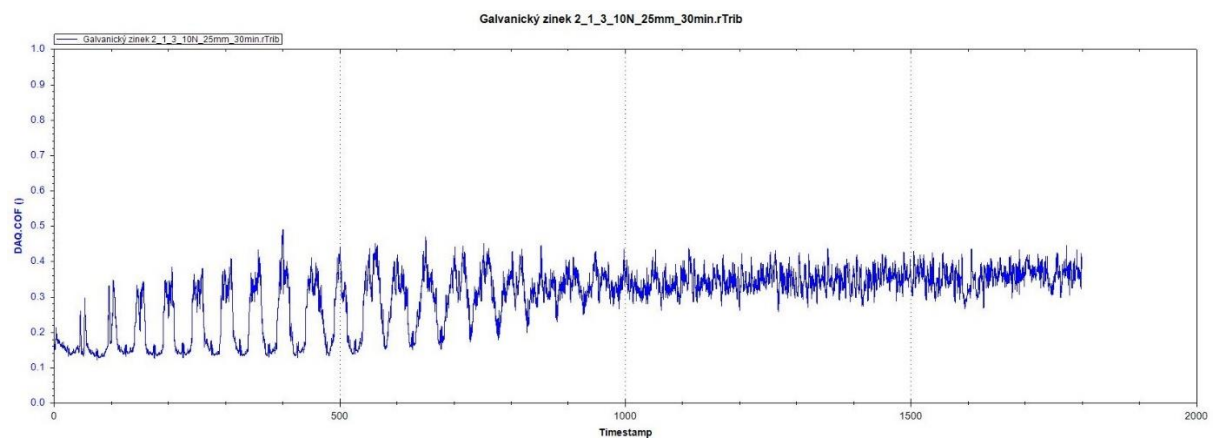
Graf 6: Záznam tribologického měření na vzorku galvanického zinku 2, strana 1, dráha 1

Průměrný koeficient tření při prvním měření na galvanickém zinku je 0,2738.



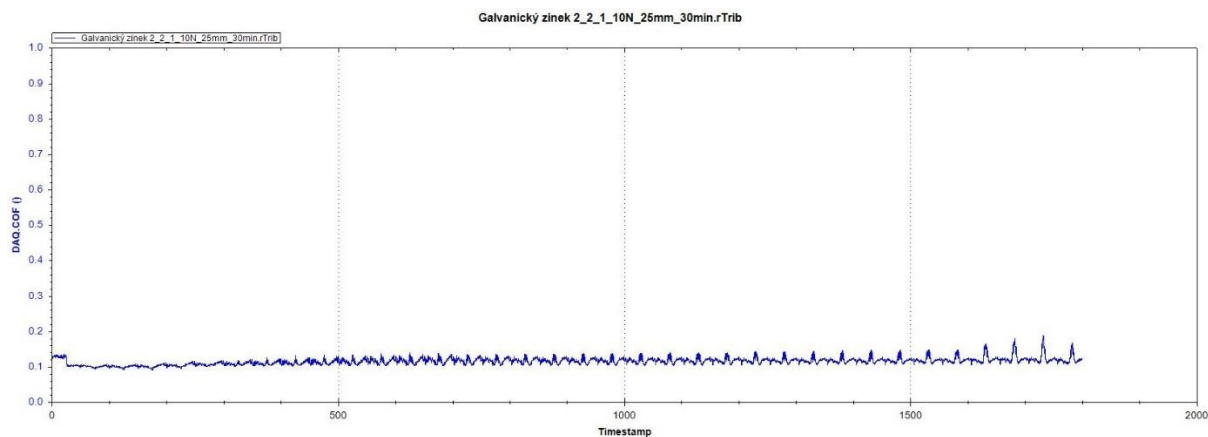
Graf 7: Záznam tribologického měření na vzorku galvanického zinku 2, strana 1, dráha 2

Průměrný koeficient tření při druhém měření na galvanickém zinku je 0,2916.



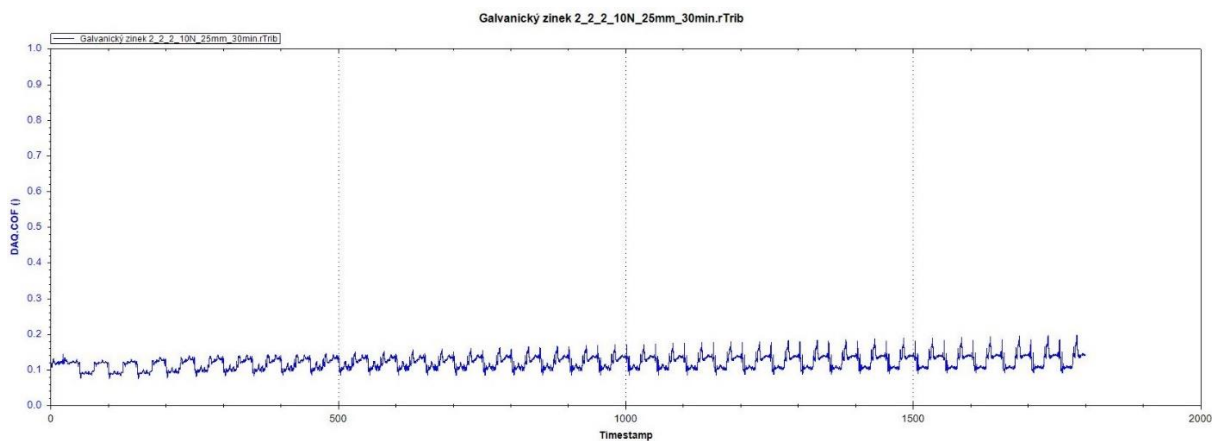
Graf 8: Záznam tribologického měření na vzorku galvanického zinku 2, strana 1, dráha 3

Průměrný koeficient tření při třetím měření na galvanickém zinku je 0,2989.



Graf 9: Záznam tribologického měření na vzorku galvanického zinku 2, strana 2, dráha 1

Průměrný koeficient tření při čtvrtém měření na galvanickém zinku je 0,1151.



Graf 10: Záznam tribologického měření na vzorku galvanického zinku 2, strana 2, dráha 2

Průměrný koeficient tření při pátém měření na galvanickém zinku je 0,1204.

12.1.3 Žárový zinek



Obr. 22: Deska s žárovým zinkem před měřením [foto autora]



Obr. 23: Deska s žárovým zinkem po měření [foto autora]

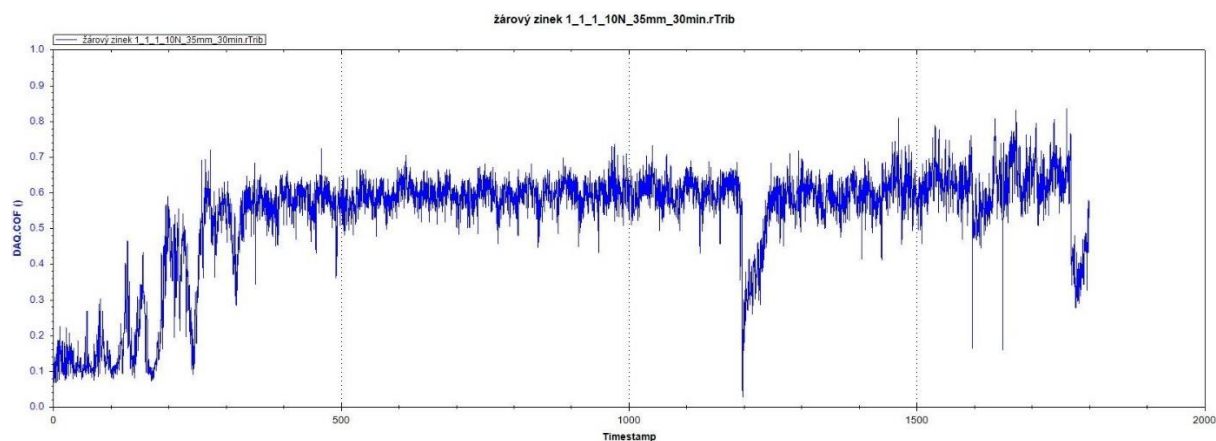
Na desku základního materiálu byl žárově nanesen povlak zinku. Z jednoho rozměrného vzorku byly následně odděleny 3 menší vzorky. Zkoumané vzorky měly rozměry 100x50x4 mm.

Tab. 13: Vážení vzorků s žárovým zinkem před a po měření

1. vzorek	Hmotnost [g]					
	Před	Po				
		Dráha 1	Dráha 2	Dráha 3	Dráha 4	Dráha 5
	151,4164	151,4147	151,413	151,4115	151,4098	151,4078
	151,4165	151,4148	151,413	151,4115	151,4097	151,4076
	151,4166	151,4149	151,4131	151,4115	151,4097	151,4077
Průměr	151,4165	151,4148	151,413	151,4115	151,4097	151,4077

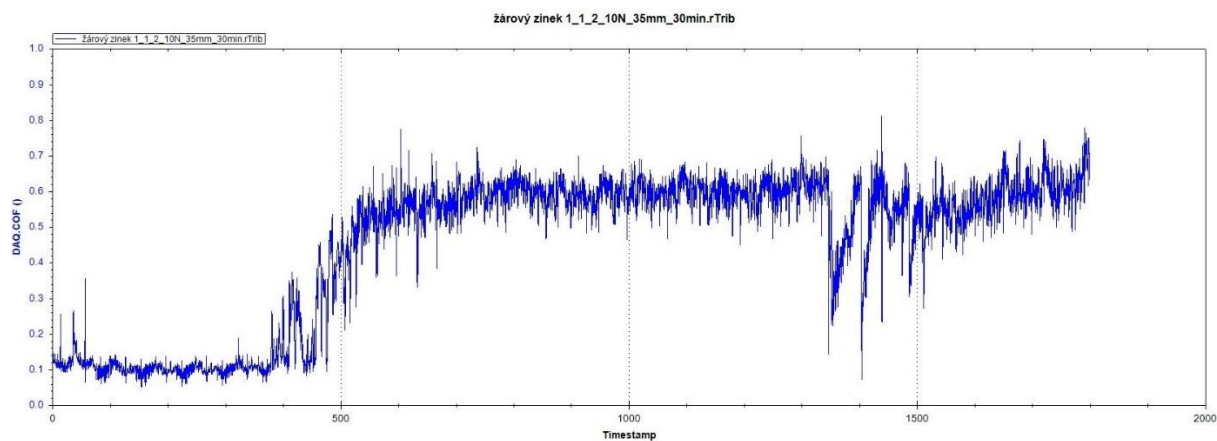
Průměrný hmotnostní úbytek povlaku žárového zinku byl 0,00176 g.

Grafické záznamy tribologického měření:



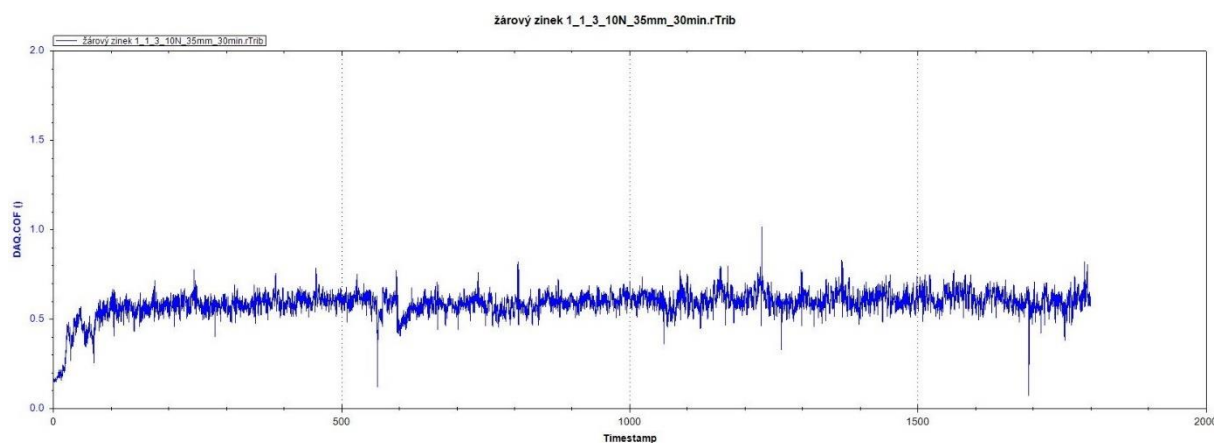
Graf 11: Záznam tribologického měření na vzorku žárového zinku 1, strana 1, dráha 1

Průměrný koeficient tření při prvním měření na žárovém zinku je 0,5316.



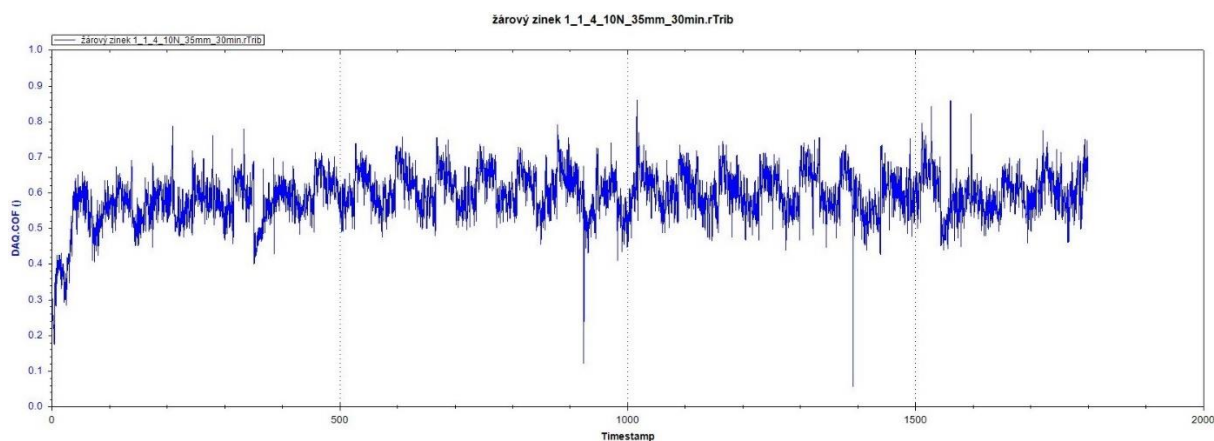
Graf 12: Záznam tribologického měření na vzorku žárového zinku 1, strana 1, dráha 2

Průměrný koeficient tření při druhém měření na žárovém zinku je 0,4516.



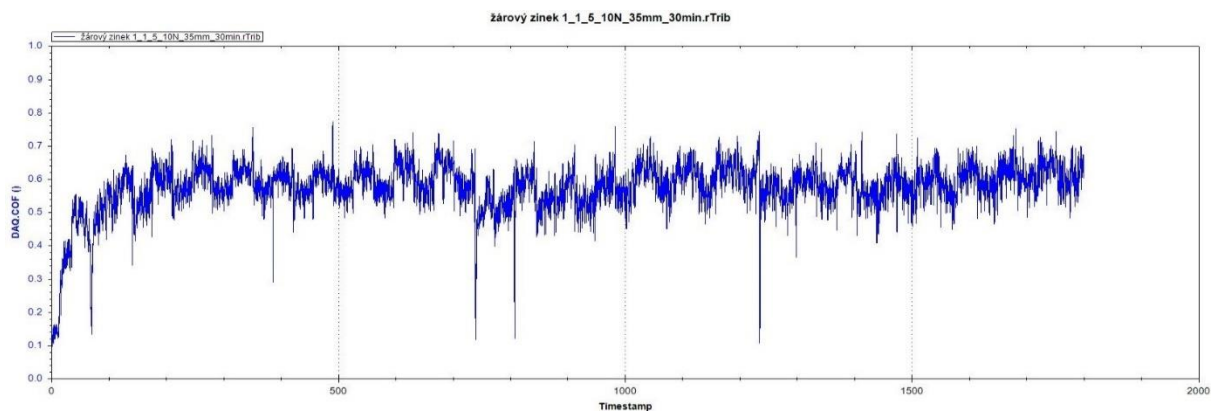
Graf 13: Záznam tribologického měření na vzorku žárového zinku 1, strana 1, dráha 3

Průměrný koeficient tření při třetím měření na žárovém zinku je 0,5851.



Graf 14: Záznam tribologického měření na vzorku žárového zinku 1, strana 1, dráha 4

Průměrný koeficient tření při čtvrtém měření na žárovém zinku je 0,5910.



Graf 15: Záznam tribologického měření na vzorku žárového zinku 1, strana 1, dráha 5

Průměrný koeficient tření při pátém měření na žárovém zinku je 0,5749.

Tab. 14: Měření tloušťky povlaku žárového zinku

Měření tloušťky povlaku [μm]		
Měření	1. Strana	2. strana
1	76,2	84,1
2	77	85,1
3	77,3	85,8
4	79,6	86,3
5	79,8	87,5
6	80,3	87,6
7	80,7	88
8	80,7	88,1
9	81,5	88,2
10	81,7	88,7
11	81,9	89,1
12	82,6	89,2
13	83,2	89,4
14	83,2	89,5
15	83,8	89,7
16	84,7	89,9
17	85	90,4
18	85	90,6
19	85,6	90,8
20	86,5	90,9
21	86,7	91
22	87,7	91,2
23	87,7	92,8
24	88,3	93,8
25	90,3	95,4
26	90,6	96,2
27	91	97,6
28	91,1	97,6
29	92,4	100
30	92,9	101
Průměr	84,5	90,7

Tab. 15: Měření drsnosti vzorků s žárovým zinkem

Vzorek 1					Vzorek 2			
Měření	1. strana		2. strana		1. strana		2. strana	
Směr y	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1	1,39	6,36	0,8	4,19	0,92	4,94	1,33	7,41
2	1,62	8,87	1,18	6,41	0,86	4,55	1,51	7,71
3	1,54	7,99	1,44	7,88	1,11	5,83	1,47	7,93
4	1,71	7,97	1,3	7,52	1,4	6,75	1,6	8,61
5	1,51	7,81	1,23	5,88	1,63	7,71	1,19	6,67
6	1,06	5,18	1,59	8,31	1,71	8,41	1,41	7,55
7	1,18	5,53	2,17	11,11	1,91	8,91	0,64	3,59
Průměr	1,43	7,10	1,39	7,33	1,36	6,73	1,31	7,07
Směr x	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1	1,76	9,16	0,84	5,43	0,99	6,01	1,04	4,75
2	1,74	8,98	0,85	4,53	1,02	5,51	1,02	5,15
3	1,34	7,23	1,14	5,48	1,18	6,31	0,89	4,61
4	1,49	8,7	1,12	5,45	0,95	5,9	1,31	7,03
5	1,67	8,37	1,33	6,79	1,55	6,89	1,23	5,84
6	1,56	8,86	1,56	8,95	1,54	6,93	1,24	6,56
7	1,46	7,89	1,53	7,31	1,5	7,41	1,67	8,8
Průměr	1,57	8,46	1,20	6,28	1,25	6,42	1,20	6,11

12.1.4 Stříbrný elox



Obr. 24: Stříbrný elox před měřením [foto autora]



Obr. 25: Stříbrný elox po měření [foto autora]

Na základním materiálu z hliníku byla vytvořena stříbrná dekorativní anodická oxidace.

Tab. 16: Vážení vzorků se stříbrným eloxem před a po měření

	Hmotnost [g]					
	Před	Po				
		Dráha 1	Dráha 2	Dráha 3	Dráha 4	Dráha 5
1. vzorek	9,7033	9,7033	9,7033	9,7033	9,7031	9,7033
	9,7034	9,7031	9,7032	9,7033	9,7033	9,7033
	9,7033	9,7033	9,7033	9,7033	9,7032	9,7033
Průměr	9,7033	9,7032	9,7033	9,7033	9,7032	9,7033

Vzorek nevykázal žádný materiálový úbytek, naměřená odchylka je způsobena vnějšími vlivy při měření. Ochranná vrstva neubývala, protože při měření byly použity stejné podmínky jako pro ocelové vzorky, které jsou tvrdší. Při měření na hliníku došlo ke vmáčknutí kuličky do povrchu, ale nedošlo k porušení vrstvy eloxu.

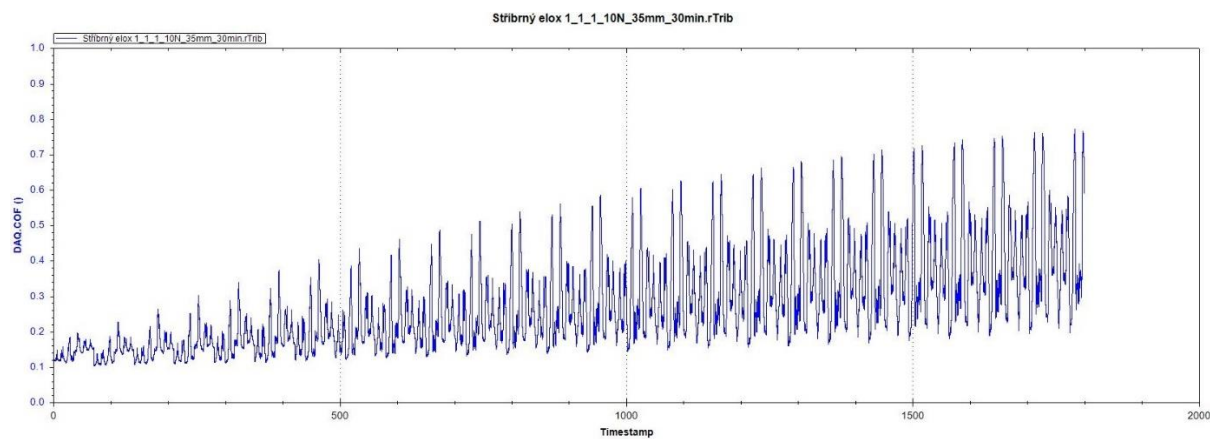
Tab. 17: Měření tloušťky povlaku stříbrného eloxu

Měření tloušťky povlaku [μm]		
č. měření	1. Strana	2. strana
1	15	10
2	19	12
3	19	15
4	21	18
5	23	19
6	23	20
7	24	21
8	24	21
9	26	23
10	28	24
11	28	24
12	29	26
13	32	26
14	33	27
15	35	28
16	38	31
17	39	32
18	41	35
19	45	38
20	55	45
Průměr	29	24
S. O.	7,592435	6,584681

Tab. 18: Měření drsnosti povlaku stříbrného eloxu

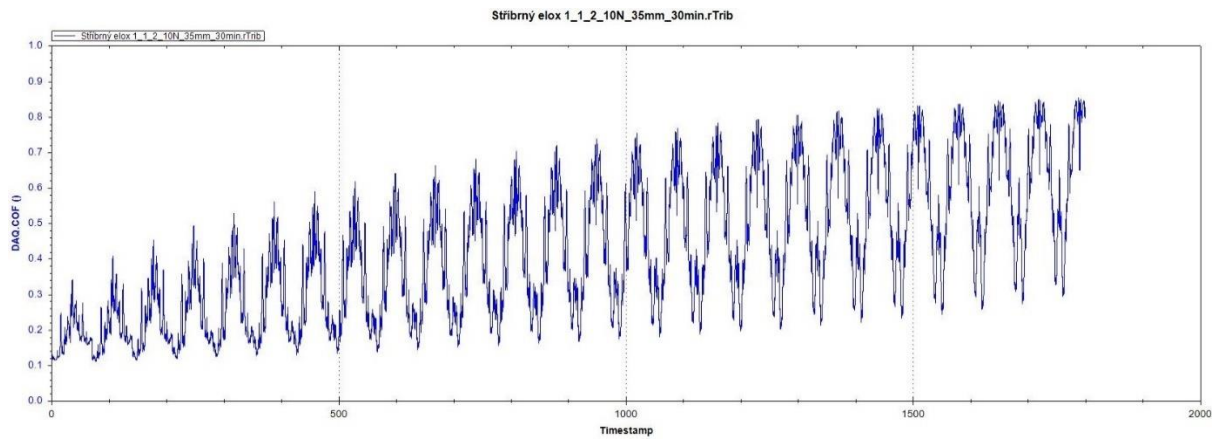
Vzorek 1				
Měření	1. strana		2. strana	
Směr y	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1	0,17	1,23	0,92	6,31
2	0,18	1,33	0,91	4,98
3	0,24	1,73	0,7	3,93
4	0,23	1,4	0,65	3,83
5	0,16	1,16	0,59	4,24
6	0,14	1,1	0,62	3,5
7	0,21	1,46	0,54	3,53
Průměr	0,19	1,34	0,70	4,33
Směr x	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1	0,24	1,76	0,73	6,23
2	0,26	1,59	0,85	7,33
3	0,29	1,69	0,84	6,27
4	0,22	1,49	0,91	7,9
5	0,3	1,88	0,88	6,44
6	0,31	1,92	0,89	7,47
7	0,28	1,83	0,7	5,95
Průměr	0,27	1,74	0,83	6,80

Grafické záznamy tribologického měření:



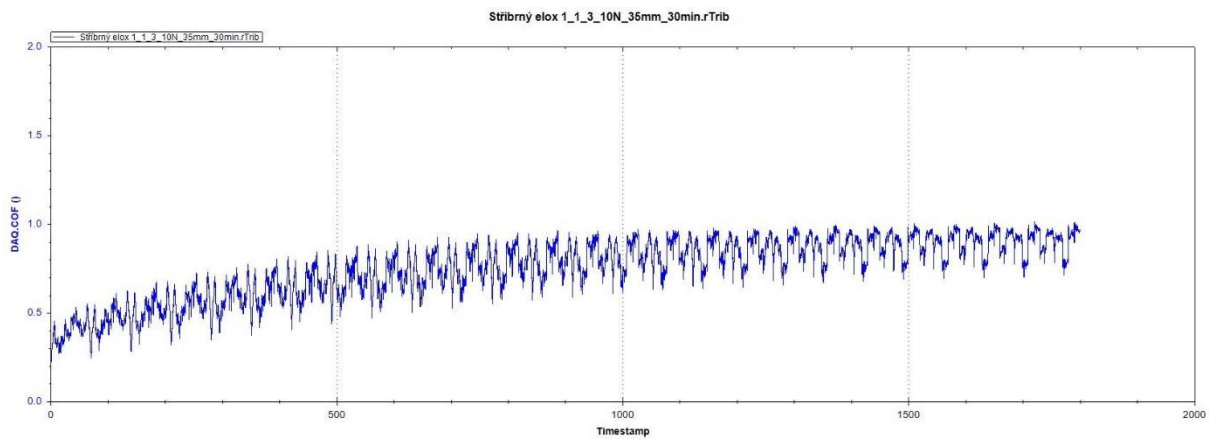
Graf 16: Záznam tribologického měření na vzorku stříbrného eloxu 1, strana 1, dráha 1

Průměrný koeficient tření při prvním měření na stříbrném eloxu je 0,2716.



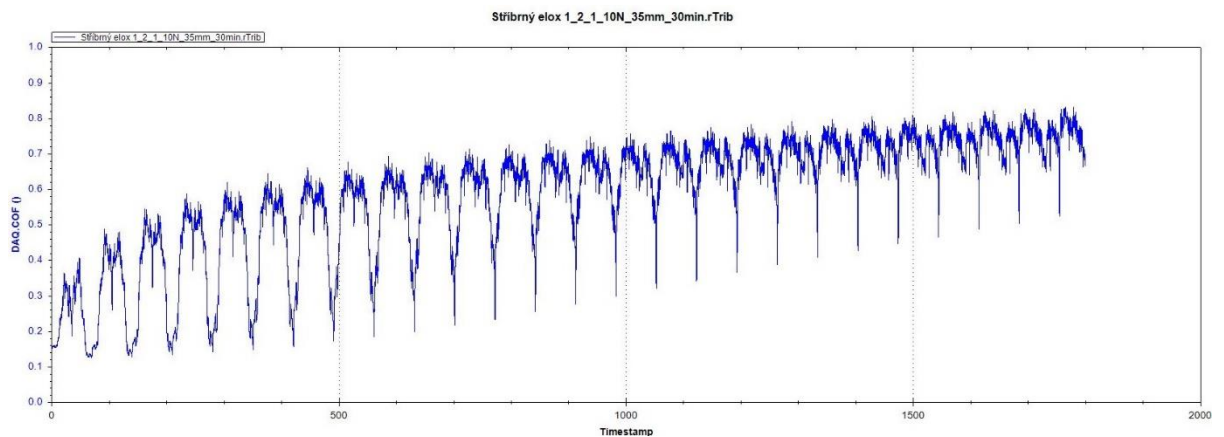
Graf 17: Záznam tribologického měření na vzorku stříbrného eloxu 1, strana 1, dráha 2

Průměrný koeficient tření při druhém měření na stříbrném eloxu je 0,4205.



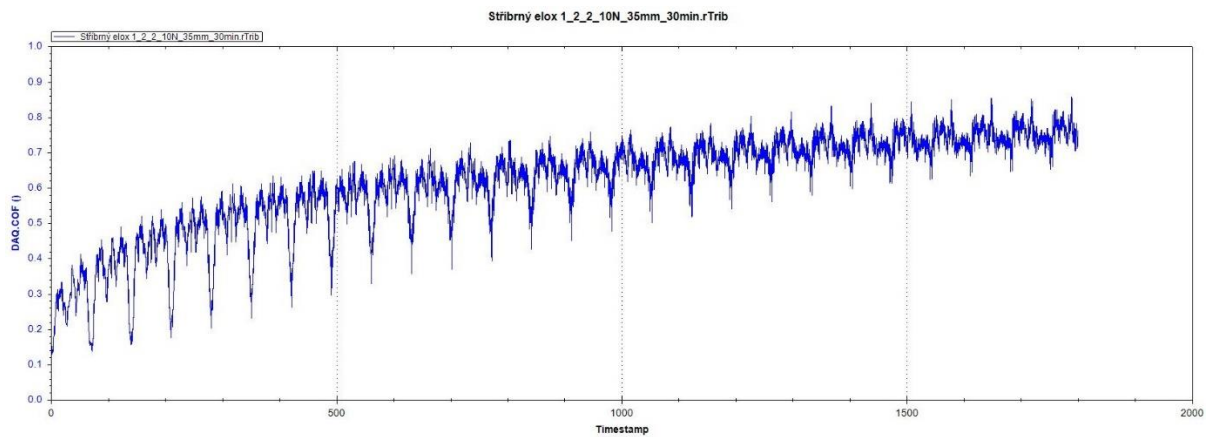
Graf 18: Záznam tribologického měření na vzorku stříbrného eloxu 1, strana 1, dráha 3

Průměrný koeficient tření při třetím měření na stříbrném eloxu je 0,5859.



Graf 19: Záznam tribologického měření na vzorku stříbrného eloxu 1, strana 2, dráha 1

Průměrný koeficient tření při čtvrtém měření na stříbrném eloxu je 0,6142.

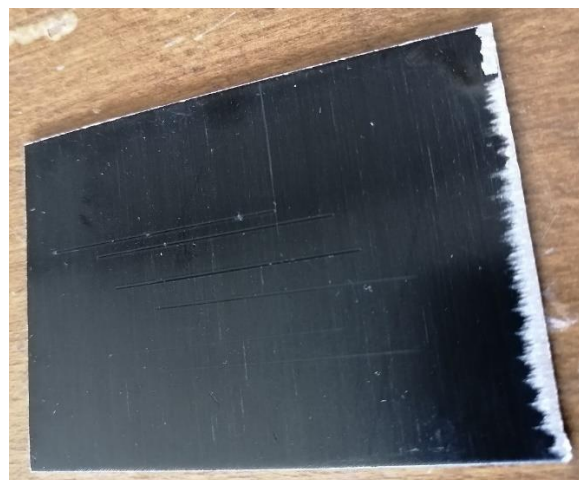


Graf 20: Záznam tribologického měření na vzorku stříbrného eloxu 1, strana 2, dráha 2
Průměrný koeficient tření při pátém měření na stříbrném eloxu je 0,6049.

12.1.5 Černý elox



Obr. 26: Černý elox před měřením [foto autora]



Obr. 27: Černý elox po měření [foto autora]

Na stejný základní materiál byla aplikována dekorativní anodická oxidace, tentokrát s přidáním černého pigmentu.

Tab. 19: Vážení vzorků se černým eloxem před a po

		Hmotnost [g]				
1. vzorek	Před	Po				
		Dráha 1	Dráha 2	Dráha 3	Dráha 4	Dráha 5
	9,5332	9,5332	9,5333	9,5333	9,5333	9,5333
	9,5333	9,5332	9,5332	9,5334	9,5331	9,5331
	9,5332	9,5333	9,5331	9,5332	9,5332	9,5331
Průměr	9,5332	9,5332	9,5332	9,5333	9,5332	9,5332

I tento hliníkový vzorek nevykázal žádný hmotnostní úbytek ze stejného důvodu, jako u stříbrného eloxu.

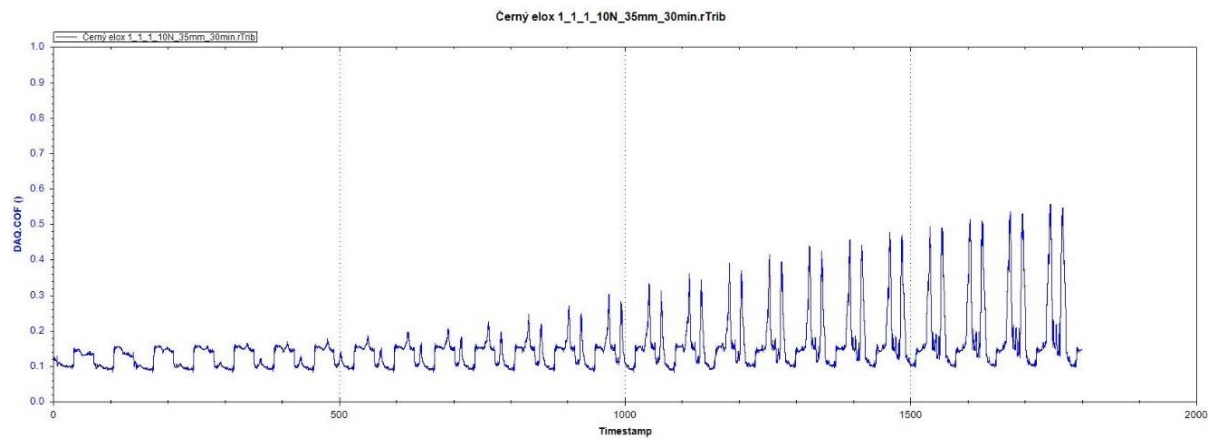
Tab. 20: Měření tloušťky povlaku černého eloxu

Měření tloušťky povlaku [μm]		
č. měření	1. Strana	2. strana
1	10	16
2	17	17
3	18	17
4	18	18
5	19	18
6	19	19
7	20	20
8	21	21
9	21	24
10	21	26
11	22	26
12	22	26
13	23	27
14	23	27
15	25	28
16	26	29
17	27	32
18	28	41
19	30	42
20	32	56
Průměr	22	25
S. O.	3,598697	7,18967

Tab. 21: Měření drsnosti povlaku černého eloxu

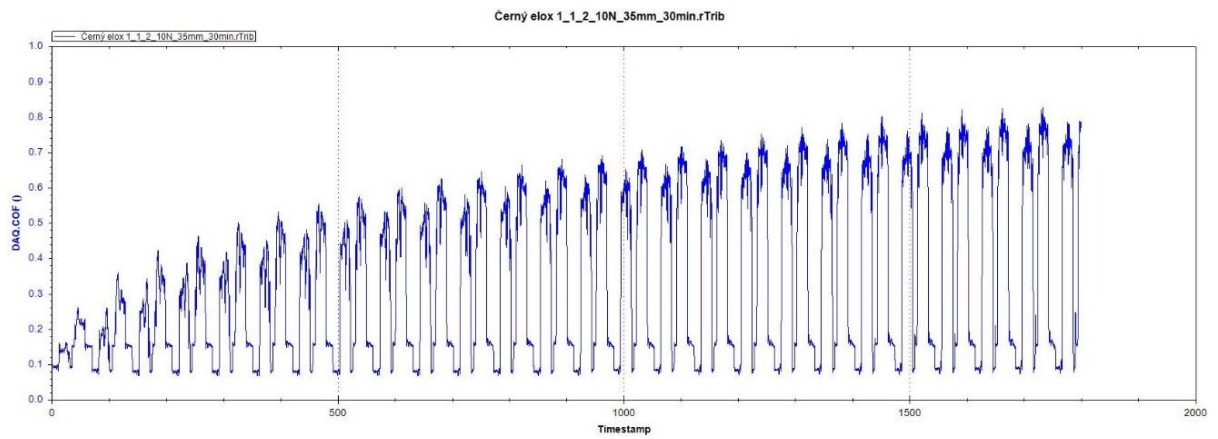
Vzorek 1				
Měření	1. strana		2. strana	
Směr y	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1	0,73	4,4	0,14	1,31
2	0,77	5	0,18	1,33
3	0,55	3,48	0,23	1,51
4	0,5	2,93	0,21	1,74
5	0,39	2,45	0,23	1,76
6	0,75	5,38	0,19	1,26
7	0,45	2,6	0,16	1,36
Průměr	0,59	3,75	0,19	1,47
Směr x	Ra [μm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rz [μm]
1	0,78	6,57	0,22	1,55
2	0,94	6,57	0,28	2,76
3	0,92	6,95	0,18	1,3
4	0,87	6,76	0,31	2,17
5	0,99	6,67	0,2	1,32
6	0,78	5,69	0,27	1,73
7	1,01	6,06	0,5	2,77
Průměr	0,90	6,47	0,28	1,94

Grafické záznamy průběhu tribologického měření:



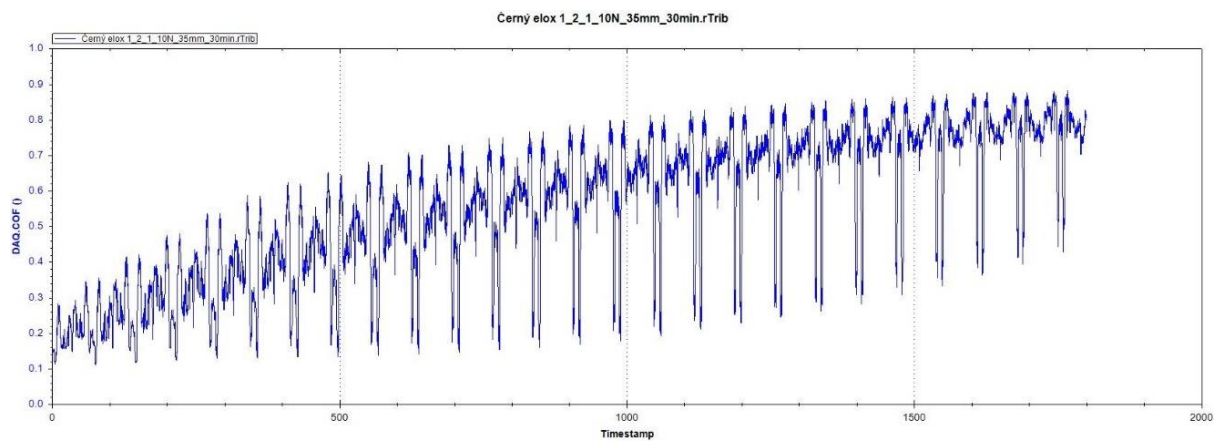
Graf 21: Záznam tribologického měření na vzorku černého eloxu 1, strana 1, dráha 1

Průměrný koeficient tření při prvním měření na černém eloxu je 0,1504.



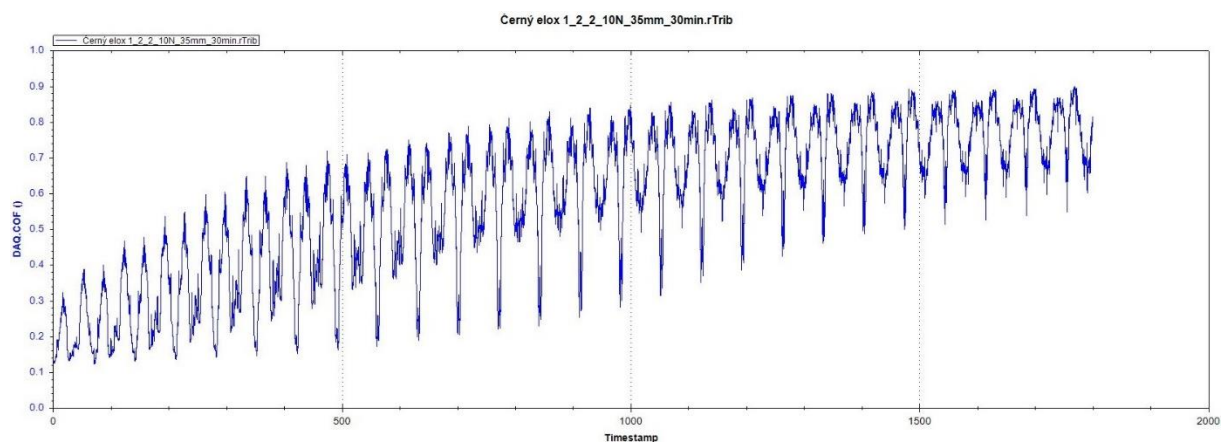
Graf 22: Záznam tribologického měření na vzorku černého eloxu 1, strana 1, dráha 2

Průměrný koeficient tření při druhém měření na černém eloxu je 0,3436.



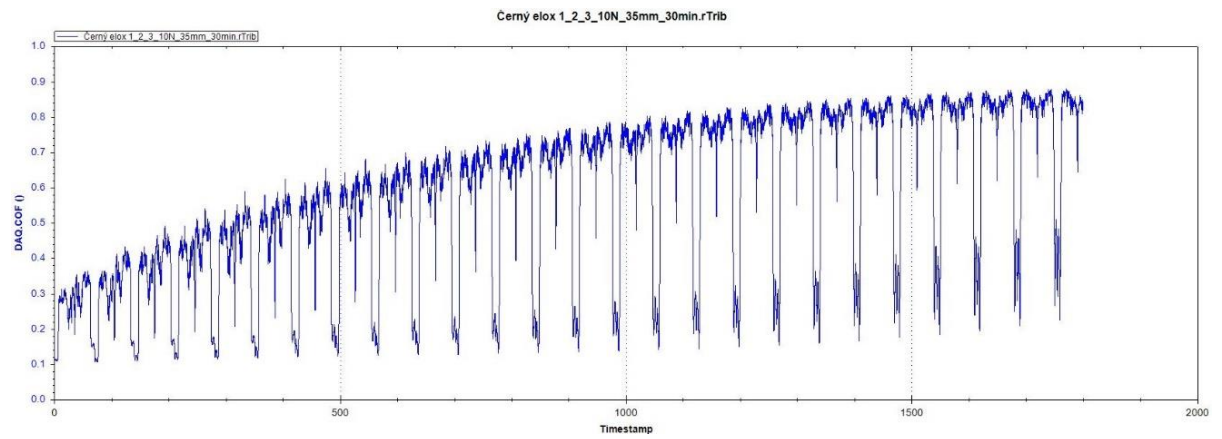
Graf 23: Záznam tribologického měření na vzorku černého eloxu 1, strana 2, dráha 1

Průměrný koeficient tření při třetím měření na černém eloxu je 0,5563.



Graf 24: Záznam tribologického měření na vzorku černého eloxu 1, strana 2, dráha 2

Průměrný koeficient tření při čtvrtém měření na černém eloxu je 0,5832.



Graf 25: Záznam tribologického měření na vzorku černého eloxu 1, strana 2, dráha 3

Průměrný koeficient tření při pátém měření na černém eloxu je 0,5778.

13 Diskuse výsledků

Z naměřených hodnot a grafů byly zjištěny průměrné hodnoty koeficientu tření při jednotlivých měřeních. Tyto hodnoty byly následně pro každý vzorek zprůměrovány.

Proměřením vzorků základního materiálu bylo zjištěno, že průměrná drsnost povrchu R_a je ve směru x (R_{a_x}) 2,514 μm a ve směru y (R_{a_y}) je 2,68 μm . Naměřený průměrný koeficient tření na této ploše pak činil 0,1329. Ocel 12 040 v rámci experimentu vykázala nejmenší průměrný koeficient tření a minimální úbytek materiálu, který celkem činil $4,7 \times 10^{-4}$ gramu.

Tab. 22: Výsledné průměrné koeficienty tření vzorků základního materiálu

Povlak:	Základní materiál
	Koeficient tření
1. měření	0,1238
2. měření	0,1309
3. měření	0,1257
4. měření	0,1376
5. měření	0,1464
Průměr	0,1329

Na vzorku žárového zinku o průměrné tloušťce povlaku 84,5 μm , průměrnou drsností ve směru x $R_{a_x} = 1,57 \mu\text{m}$ a $R_{a_y} = 1,43 \mu\text{m}$ byl naměřen průměrný koeficient tření 0,5468. Jde o nejvyšší naměřený koeficient tření v celém experimentu. Naměřené hodnoty jednotlivých drah jsou podobné, nevyskytují se žádné velké výkyvy hodnot. Naměřený hmotnostní úbytek povlaku je celkem 88×10^{-4} gramu. Jedná se o největší hodnotu v prováděných experimentech.

Tab. 23: Výsledné průměrné koeficienty tření vzorku s žárovým zinkem

Povlak:	Žárový zinek
	Koeficient tření
1. měření	0,5316
2. měření	0,4516
3. měření	0,5851
4. měření	0,5910
5. měření	0,5749
Průměr	0,5468

Vzorek pokovený galvanicky zinkem, o průměrné tloušťce povlaku 16,24 μm na první straně a 20,03 μm na straně druhé, vykázal při měření rozdílné hodnoty koeficientu tření. Na straně s menší tloušťkou vrstvy byl naměřen průměrný koeficient tření 0,2881, zato druhá strana vykázala nejnižší jednotlivé hodnoty celého experimentu, v průměru 0,1178. Avšak celkový průměrný koeficient tohoto povlaku se řadí, s hodnotou 0,22, na druhé místo za základní materiál. Přitom drsnosti povrchu obou stran vzorku byly velmi podobné.

Jediným rozdílným parametrem je hodnota Rz, kdy je rozdíl mezi stranami průměrně 1 μm . Materiálový úbytek povlaku je celkově 9×10^{-4} gramu.

Tab. 24: Výsledné průměrné koeficienty tření vzorku s galvanickým zinkem

Povlak:	Galvanický zinek
	Koeficient tření
1. měření	0,2738
2. měření	0,2916
3. měření	0,2989
4. měření	0,1151
5. měření	0,1204
Průměr	0,22

Vzorek hliníkového plechu se stříbrným eloxem na povrchu vykázal průměrný koeficient tření 0,4994. Tento vzorek ukázal velký rozptyl hodnot koeficientů tření, na jedné straně se lišil o víc jak 0,3. Na druhé straně byl naměřený koeficient přibližně stejný, avšak vyšší než na straně druhé. Pravděpodobně díky rozdílné drsnosti povrchu na obou stranách vzorku, která se lišila přibližně 0,5 μm u hodnoty Ra a o 3 μm u hodnoty Rz.

Tab. 25: Výsledné průměrné koeficienty tření vzorku se stříbrným eloxem

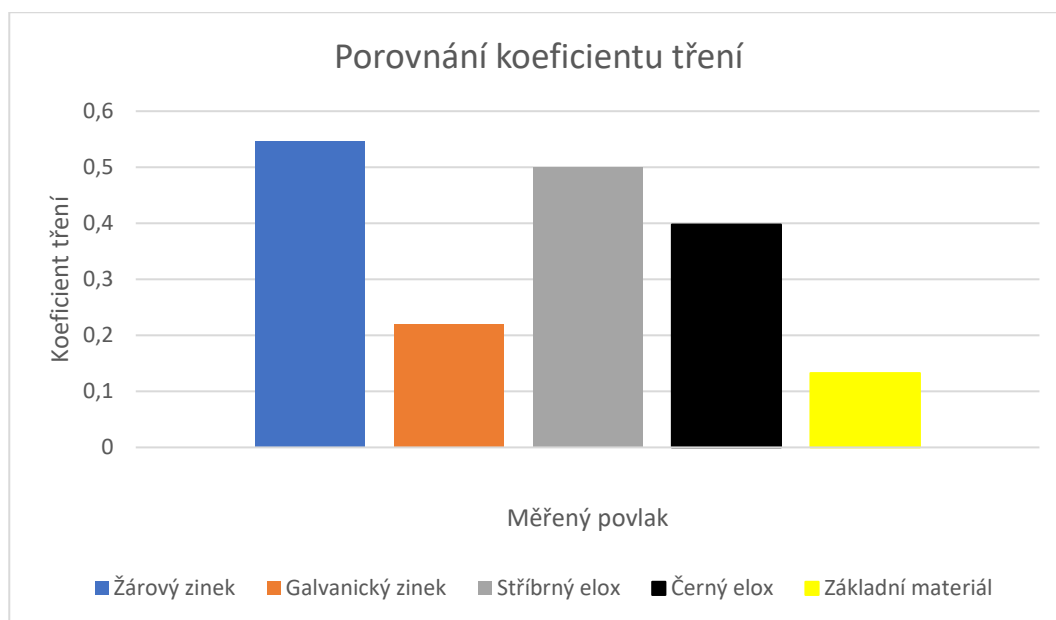
Povlak:	Stříbrný elox
	Koeficient tření
1. měření	0,2716
2. měření	0,4205
3. měření	0,5859
4. měření	0,6142
5. měření	0,6049
Průměr	0,4994

Na vzorku s černým eloxem byl naměřen průměrný koeficient tření 0,4423, tedy přibližně o 0,05 menší než u eloxu stříbrného. Přičemž hodnoty jednotlivých měření se pohybovaly v rozmezí přibližně 0,43. Vzorek měl též velké rozdíly vlastností povrchu na jednotlivých stranách. Průměrný parametr Ra se mezi stranami lišil o 0,6 μm a parametr Rz o 4,4.

Tab. 26: Výsledné průměrné koeficienty tření vzorku se stříbrným eloxem

Povlak:	Černý ELOX
	Koeficient tření
1. měření	0,1504
2. měření	0,3436
3. měření	0,5563
4. měření	0,5832
5. měření	0,5778
Průměr	0,4423

Při měření obou vzorků z hliníku kulička pinu vždy vytvořila stopu – rýhu na materiálu, ale pouze vmáčknutím do povrchu. Ani u jednoho vzorku nedošlo k materiálovému úbytku.



Graf 26: Srovnání průměrného koeficientu tření

14 Závěr

Povrchové úpravy šroubů mají za úkol chránit základní materiál před opotřebením, korozí i zlepšovat koeficient tření. Povlaky ze zinku jsou u šroubů dominantní, lze je tvořit vícero metodami v různých kvalitách a ekonomicky výhodně. Zinek chrání ocelový základ šroubu katodickou ochranou, porušení zinkového povlaku tedy není katastrofickou závadou, ale samozřejmě snižuje životnost povlaku, potažmo šroubu.

Pokud to provozní podmínky vyžadují, přistupuje se ke šroubům ošetřeným odolnějšími povlaky, například niklem, a použití maziv vhodných do daných podmínek. Také je možné použití jiného základního materiálu, například austenitických ocelí.

Na zkoumaných vzorcích povlaků byly naměřeny vyšší koeficienty tření než na základním materiálu. Měření probíhalo na sucho, bez přítomnosti maziv. Z toho vyplývá, že zkoumané povrchové úpravy mají hlavně funkci ochrannou. Použití takto ošetřeného spojovacího materiálu tedy vyžaduje přidání maziva pro zmenšení koeficientu tření a zajištění opětovné rozebíratelnosti spoje. Při montáži je potřeba dodržovat správný pracovní postup a použít vhodné a zkalibrované nářadí, aby bylo zajištěno docílení předepsaného předepnutí spoje.

15 Zdroje

- [1] GRABON, W.A., M. OSETEK a T.G. MATHIA. *Friction of threaded fasteners*. In: Tribology International [online]. 2018, 118, s. 408-420 [cit. 2020-11-28]. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.10.014. ISSN 0301679X. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X17304747>
- [2] HELEBRANT, F., J. ZIEGLER a D. MARASOVÁ. *TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA A SPOLEHLIVOST I. TRIBODIAGNOSTIKA* [online]. Ostrava, 2000 [cit. 2020-11-28]. Dostupné z: http://www.340.vsb.cz/doc/cms_library/skripta-technicka-diagnostika-i-tribo193.pdf
- [3] BOLEK, A. a J. KOCHMAN. *Části strojů*. Vyd. 5., přeprac. (v SNTL 1. vyd.). Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1989. Technický průvodce. ISBN 80-030-0046-7.
- [4] KUDLÁČEK, J., V. KREIBICH, P. DRAŠNAR a D. BENEŠOVÁ. *Povrchové úpravy závitových dvojic*. MM Průmyslové spektrum [online]. 1997, 14. prosince 2010 [cit. 2020-12-02]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/povrchove-upravy-zavitovych-dvojic.html>
- [5] WALD, F., L. ROZLÍVKA, Z. SOKOL a H. ŠERTLER. *VLIV MAZIVA NA UTAHOVÁNÍ ŠROUBŮ TŘECÍCH SPOJŮ* [online]. [cit. 2020-12-02]. Dostupné z: [http://people.fsv.cvut.cz/~wald/Clanky%20v%20Adobe%20\(Pdf\)/Vliv_maziva_na_VP_srouby.pdf](http://people.fsv.cvut.cz/~wald/Clanky%20v%20Adobe%20(Pdf)/Vliv_maziva_na_VP_srouby.pdf)
- [6] KRÁLOVÁ, M. *Smykové tření*. In: Techmania Science Center [online]. 2005 [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/sila/odporove-sily/smykovetreni>
- [7] KRÁLOVÁ, M. *Valivé tření*. In: Techmania Science Center [online]. 2005 [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/sila/odporove-sily/valive-treni>
- [8] KHONSARI, M., M. a E. R. BOOSER. *Applied Tribology: Bearing Design and Lubrication*. 3. Hoboken, New York: Wiley, 2017. ISBN 9781118700266.
- [9] BEČKA, J. *Tribologie*. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-010-1621-8.
- [10] GÄNSHEIMER, J. *Optimalizace šroubových spojů za pomoci tuhých maziv*. Nacházel, s.r.o., [2001].
- [11] HOUŠTĚK, J. *Povrchové úpravy šroubů*. MM Průmyslové spektrum [online]. 12. dubna 2006 [cit. 2020-12-07]. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/povrchove-upravy-sroubu.html>

- [12] KREIBICH, V. a K. HOCH. *Koroze a technologie povrchových úprav*. 2. vydání. Praha: České vysoké učení technické, 1991. ISBN 9788001004760.
- [13] LUDEMA, K. C. *FRICITION, WEAR, LUBRICATION: A TEXTBOOK IN TRIBOLOGY*. 1. Londýn: CRC Press, 1996. [online] ISBN 0-8493-2685-0. [cit. 2021-5-20]
- [14] ŠVEC, V. *Části a mechanismy strojů: Spoje a části spojovací*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2002. ISBN 8001025330.
- [15] KUBENKA M., *Tribologie rozebíratelných spojů*. Praha, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní.
- [16] WALD, F., L. ROZLÍVKA, Z. SOKOL a D. GREGOR *Utahování šroubů třecích spojů*. [online]. 12. dubna 2006 [cit. 2021-5-20]. Dostupné z: http://people.fsv.cvut.cz/~wald/Clanky%20v%20Adobe%20%28Pdf%29/22_Wald_Utahovani_sroubu_W12.pdf
- [17] EFEKT ZATUHNUTÍ U NEREZOVÉHO SPOJOVACÍHO MATERIÁLU. In: Fabory [online]. [cit. 2021-05-25]. Dostupné z: https://www.fabory.com/cs/knowledge_center/technical/stainless_steel/the_seizing_of_stainless_steel_fasteners
- [18] BOHÁČEK, J. *Neelektrolytický vylučované povlaky s mikrolamelami zinku technologie Delta MKS* [online]. 2007 [cit. 2021-05-28]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-52012/neelektrolytický-vylucovanepovlaky-s-mikrolamelami-zinku-technologie-delta-mks.html>
- [19] KREIBICH, V. *Příčiny a důsledky nevhodných aplikací povrchových úprav*. [online] [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://portal.cvut.cz/wp-content/uploads/2017/04/HP2004-15.pdf>
- [20] KREIBICH, V., J. KUDLÁČEK, J. ČERVENÝ, M. PAKOSTA, P. DRAŠNAR, K. VOJKOVSKÝ. *Povrcháři* [online]. 2010, 7. číslo, stránky 2-3. [cit. 2021-05-28]. ISSN 1802-9833. Dostupné z: http://povrchari.cz/kestazeni/201007_povrchari.pdf
- [21] KREIBICH, V., J. KUDLÁČEK, J. ČERVENÝ, M. PAKOSTA, P. DRAŠNAR. *Povrcháři* [online]. 2008, 7. číslo, strana 8. [cit. 2021-05-28]. ISSN 1802-9833. Dostupné z: http://www.povrchari.cz/kestazeni/200803_povrchari.pdf

- [22] WIEGEL. *Žárové zinkování* [online]. 2013. [cit. 06.07.2021]. Dostupné z: https://wiegel.cz/fileadmin/redaktion/files-allgemein/Feuerverzinken/cz/WIEGEL_2013-11_InformaceProZaroveZinkovani_cz.pdf
- [23] *Utahovací postup pro přírubové spoje*. [online]. Copyright © DocPlayer.cz [cit. 06.08.2021]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/343692-Utahovaci-postup-pro-prirubove-spoje.html>
- [24] KŘÍŽ, A. *Tribologická analýza pin-on-disc*. Plzeň, 2004 [cit. 2020-12-27] Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/TRIBOLOGICKA_ANALYZA_PIN-ON-DISC.pdf
- [25] What is friction? In: Copyright © Kyowa Interface Science Co., Ltd. [online] [cit. 12.08.2021]. Dostupné z: https://www.face-kyowa.co.jp/english/en_science/en_what_friction.html
- [26] KREIBICH V., J. KUDLÁČEK, J. ČERVENÝ, M. PAKOSTA, P. DRAŠNAR. *Povrcháři* [online]. 2009, 3. číslo. [cit. 2021-05-28]. ISSN 1802-9833. Dostupné z: http://povrchari.cz/kestazeni/200903_povrchari.pdf
- [27] BOSSARD. *Předpětí a utahovací momenty, F_047_CZ*. [online]. Dostupné z: <https://www.bossard.com/cz-cs/assembly-technology-expert/technicke-informace/technicke-zdroje/preload-and-tightening-torques/>
- [28] Digitální profiloměr Elcometer 224. In: Elcometer.cz. [online]. Copyright © 2021 Omega Design, s.r.o. [cit. 14.07.2021]. Dostupné z: <https://www.elcometer.cz/elcometer-224/>

Seznam obrázků

Obr. 1: Souvislost tribologie [2].....	8
Obr. 2: Stribeckovy křivky [9].....	10
Obr. 3: Smykové tření [6]	11
Obr. 4: Valivé tření [7].....	12
Obr. 5: Metoda PIN ON DISC [15]	13
Obr. 6: Metoda BALL ON PLATE [25]	14
Obr. 7: Schéma katodické ochrany zinkového povlaku [22]	17
Obr. 8: Schématické naznačení žárově zinkovaného povlaku [22]	21
Obr. 9: Montážní a pracovní diagram předepjatého šroubového spoje [14].....	24
Obr. 10: Postup zjištění rozptylu síly předpětí [27]	25
Obr. 11: Vliv maziva na utahování šroubu [16].....	26
Obr. 12: Vliv použití různých maziv na tření ve šroubovém spoji [16]	29
Obr. 13: Zadření šroubového spoje [17]	32
Obr. 14: Elcometr 456.....	34
Obr. 15: Elcometr 224 [28]	34
Obr. 16: Drsnoměr Mitutoyo SJ-301	35
Obr. 17: Tribometr MFT-5000 propojený s počítačem	36
Obr. 18: Základní materiál před měřením.....	36
Obr. 19: Základní materiál po měření	37
Obr. 20: Vzorek s galvanickým zinkem před měřením	39
Obr. 21: Vzorek s galvanickým zinkem po měření.....	40
Obr. 22: Deska s žárovým zinkem před měřením.....	43
<i>Obr. 23: Deska s žárovým zinkem po měření.....</i>	<i>44</i>
Obr. 24: Stříbrný elox před měřením	47
Obr. 25: Stříbrný elox po měření	47
Obr. 26: Černý elox před měřením	51
Obr. 27: Černý elox po měření.....	51

Seznam grafů

Graf 1: Záznam tribologického měření na vzorku základního materiálu 1, strana 1, dráha 1	38
Graf 2: Záznam tribologického měření na vzorku základního materiálu 1, strana 1, dráha 2	38
Graf 3: Záznam tribologického měření na vzorku základního materiálu 1, strana 2, dráha 1	38
Graf 4: Záznam tribologického měření na vzorku základního materiálu 1, strana 2, dráha 2	39
Graf 5: Záznam tribologického měření na vzorku základního materiálu 1, strana 2, dráha 3	39
Graf 6: Záznam tribologického měření na vzorku galvanického zinku 2, strana 1, dráha 1	42
Graf 7: Záznam tribologického měření na vzorku galvanického zinku 2, strana 1, dráha 2	42
Graf 8: Záznam tribologického měření na vzorku galvanického zinku 2, strana 1, dráha 3	42
Graf 9: Záznam tribologického měření na vzorku galvanického zinku 2, strana 2, dráha 1	43
Graf 10: Záznam tribologického měření na vzorku galvanického zinku 2, strana 2, dráha 2	43
Graf 11: Záznam tribologického měření na vzorku žárového zinku 1, strana 1, dráha 1 ..	44
Graf 12: Záznam tribologického měření na vzorku žárového zinku 1, strana 1, dráha 2 ..	45
Graf 13: Záznam tribologického měření na vzorku žárového zinku 1, strana 1, dráha 3 ..	45
Graf 14: Záznam tribologického měření na vzorku žárového zinku 1, strana 1, dráha 4 ..	45
Graf 15: Záznam tribologického měření na vzorku žárového zinku 1, strana 1, dráha 5 ..	46
Graf 16: Záznam tribologického měření na vzorku stříbrného eloxu 1, strana 1, dráha 1	49
Graf 17: Záznam tribologického měření na vzorku stříbrného eloxu 1, strana 1, dráha 2	50
Graf 18: Záznam tribologického měření na vzorku stříbrného eloxu 1, strana 1, dráha 3	50
Graf 19: Záznam tribologického měření na vzorku stříbrného eloxu 1, strana 2, dráha 1	50
Graf 20: Záznam tribologického měření na vzorku stříbrného eloxu 1, strana 2, dráha 2	51
Graf 21: Záznam tribologického měření na vzorku černého eloxu 1, strana 1, dráha 1 ..	53
Graf 22: Záznam tribologického měření na vzorku černého eloxu 1, strana 1, dráha 2 ..	54
Graf 23: Záznam tribologického měření na vzorku černého eloxu 1, strana 2, dráha 1 ..	54
Graf 24: Záznam tribologického měření na vzorku černého eloxu 1, strana 2, dráha 2 ..	54
Graf 25: Záznam tribologického měření na vzorku černého eloxu 1, strana 2, dráha 3 ..	55
Graf 26: Srovnání průměrného koeficientu tření	58

Seznam tabulek

Tab. 1: Velikost součinitele tření s různými mazivy [2]	10
Tab. 2: Součinitele smykového tření pro různé kombinace materiálů stykových ploch [2]	11
Tab. 3: Porovnání koeficientu tření. Základní údaje: Tloušťka povlaku cca. 20 μm , $F=20\text{ N}$, $v=800\text{ mm/min}$, $R_a=0,9\text{ až }1,1\text{ }\mu\text{m}$, $t=60\text{ min}$, poloměr pinu $r=5\text{ mm}$, ocel (0,4 % C) [20].....	19
Tab. 4: Přesnost a rozptyl sil uvažovaných ve výpočtu dle ČSN EN 1591-1 pro jeden šroub [23]	27
Tab. 5: Přesnost a rozsahy momentových klíčů [23]	27
Tab. 6: Příklady součinitele tření v závitech f_z [3]	28
Tab. 7: Vážení vzorků základního materiálu před a po.....	37
Tab. 8: Měření drsnosti vzorku základního materiálu	37
Tab. 9: Vážení vzorků s galvanickým zinkem před a po	40
Tab. 10: Měření tloušťky povlaku galvanického zinku	40
Tab. 11: Měření drsnosti povlaku galvanického zinku, vzorek 2	41
Tab. 12: Měření drsnosti povlaku galvanického zinku, vzorek 3	41
Tab. 13: Vážení vzorků s žárovým zinkem před a po	44
Tab. 14: Měření tloušťky povlaku žárového zinku	46
Tab. 15: Měření drsnosti vzorků s žárovým zinkem.....	47
Tab. 16: Vážení vzorků se stříbrným eloxem před a po.....	48
Tab. 17: Měření tloušťky povlaku stříbrného eloxu	48
Tab. 18: Měření drsnosti povlaku stříbrného eloxu	49
Tab. 19: Vážení vzorků se černým eloxem před a po	52
Tab. 20: Měření tloušťky povlaku černého eloxu	52
Tab. 21: Měření drsnosti povlaku černého eloxu.....	53
Tab. 22: Výsledné průměrné koeficienty tření vzorků základního materiálu.....	56
Tab. 23: Výsledné průměrné koeficienty tření vzorku s žárovým zinkem	56
Tab. 24: Výsledné průměrné koeficienty tření vzorku s galvanickým zinkem.....	57
Tab. 25: Výsledné průměrné koeficienty tření vzorku se stříbrným eloxem.....	57
Tab. 26: Výsledné průměrné koeficienty tření vzorku se stříbrným eloxem.....	58