

Stanovení vlivu množství maziva na velikost koeficientu tření

Diplomová práce

<i>Studijní program:</i>	N2301 Strojní inženýrství
<i>Studijní obor:</i>	Strojírenská technologie a materiály
<i>Autor práce:</i>	Bc. Daniel Čtvrtečka
<i>Vedoucí práce:</i>	Ing. Jiří Sobotka, Ph.D. Katedra strojírenské technologie
<i>Konzultant práce:</i>	doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D. Katedra strojírenské technologie





Zadání diplomové práce

Stanovení vlivu množství maziva na velikost koeficientu tření

Jméno a příjmení: **Bc. Daniel Čtvrtečka**
Osobní číslo: S19000230
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie a materiály
Zadávající katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: **2020/2021**

Zásady pro vypracování:

1. Význam tribologických procesů při tváření kovů (druhy tření, používaná maziva a způsob nanášení na povrch, atd.).
2. Způsoby zjišťování koeficientu tření pro plošné technologie tváření kovů.
3. Experimentální zjištění vlivu množství maziva na velikost koeficientu tření při tribologické zkoušce protahování pásku.
4. Statistické vyhodnocení naměřených dat.
5. Diskuze a závěr.

Rozsah grafických prací: tabulky, grafy
Rozsah pracovní zprávy: cca 50
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] BHUSHAN, Bharat. *Introduction to tribology*. B.m.: John Wiley & Sons, 2013. ISBN 1-118-40322-3.
- [2] LUDEMA, K. C. *Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology*. Boca Raton: CRC Press, 1996. ISBN 978-0-8493-2685-1.
- [3] TOTTEN, George E. a Robert W. BRUCE, ed. *Handbook of lubrication and tribology*. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2006. ISBN 978-0-8493-2095-8.
- [4] STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. *Engineering tribology*. Fourth edition. Oxford: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN 978-0-12-397047-3.
- [5] ASM INTERNATIONAL, Howard KUHN a ASM INTERNATIONAL, ed. *Mechanical testing and evaluation*. [11. ed.], 1. print. Materials Park, Ohio: ASM International, 2000. ASM handbook, prepared under the direction of the ASM International Handbook Committee; Vol. 8. ISBN 978-0-87170-389-7.
- [6] MANG, Theo, ed. *Lubricants and lubrication*. 2., completely rev. and extended ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2007. ISBN 978-3-527-31497-3.
- [7] TSCHÄTSCH, Heinz. *Metal forming practise: processes – machines – tools*. Berlin ; New York: Springer-Verlag, 2006. ISBN 978-3-540-33216-9.

Vedoucí práce: Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie
Konzultant práce: doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce: 15. listopadu 2020
Předpokládaný termín odevzdání: 15. května 2022

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 15. listopadu 2020

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

2. června 2021

Bc. Daniel Čtvrtečka

Stanovení vlivu množství maziva na velikost koeficientu tření

Anotace

Hlavním cílem předložené diplomové práce bylo stanovení vlivu množství maziva na velikost koeficientu tření. Z hlediska důvodů zadání se jednalo o ověření skutečnosti, zdali s užitím většího množství maziva dochází také ke zlepšení tribologických podmínek. Teoretická část se zaměřuje na tribologii (historie a druhy tření), parametry drsnosti povrchu, maziva a povrchové úpravy ocelových plechů. V experimentální části je následně na tribologickém zařízení SOKOL 400 provedena tribologická zkouška protahováním pásků s ohledem na změnu množství daného maziva a kontaktního tlaku. Naměřené hodnoty tribologických sil byly následně zpracovány do příslušných tabulek a grafů. K samotnému výpočtu koeficientu tření pak byla použita maximální síla v ustálené oblasti označována jako F_h (N). Z hlediska testování statistických hypotéz o míře statisticky významného vlivu množství maziva na koeficient tření byla provedena také analýza rozptylu (zde 2F ANOVA). Naměřené a popsané skutečnosti jsou shrnuty v závěru.

Klíčová slova:

Tribologie, koeficient tření, množství maziva, kontaktní tlak, ANOVA

Determine the influence of the amount of lubricant on the friction coefficient

Annotation

The main aim of the presented thesis was to determine the influence of the amount of lubricant on the friction coefficient. Regarding its assignment, it was to verify whether the use of a larger amount of lubricant also improves the tribological conditions. The theoretical part focuses on tribology (history and types of friction), surface roughness parameters, lubricants and surface treatment of steel sheets. In the experimental part, a strip drawing tribological test is then carried out on the tribological equipment SOKOL 400 with respect to the change of lubricant amount and the contact pressure. The measured values of the tribological forces were subsequently processed into the corresponding tables and graphs. The maximum force in the steady region, denoted as F_h (N), was then used to calculate the friction coefficient itself. In terms of testing statistical hypotheses about the level of statistical significant about influence the lubricant amount on the friction coefficient, an analysis of variance (here 2F ANOVA) was also performed. The measured and described facts are summarized in the conclusion.

Key words:

Tribology, Friction Coefficient, Amount of Lubricant, Contact Pressure, ANOVA

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. et. Bc. Jiřímu Sobotkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné připomínky a trpělivost při tvorbě práce. V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině a přátelům za neustálou podporu po dobu mého studia.

Diplomová práce byla podpořena Studentskou grantovou soutěží Technické univerzity v Liberci v rámci řešení projektu SGS-2019-5015 "Výzkum a vývoj pro inovace materiálů a výrobních technologií s aplikačním potenciálem ve strojírenství"



Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	9
1 Úvod.....	10
2 Teoretická část.....	11
2.1 Tribologie.....	11
2.1.1 Historický vývoj tribologie	12
2.2 Tření.....	15
2.2.1 Druhy tření.....	17
2.3 Drsnost povrchu a její parametry.....	23
2.3.1 Charakteristické veličiny drsnosti povrchu	23
2.4 Maziva a mazání	27
2.4.1 Režimy mazání	28
2.4.2 Druhy maziv	31
2.4.3 Využití maziv pro tažení plechu.....	33
2.5 Povrchové úpravy ocelových plechů	34
2.5.1 Povrchové úpravy ocelových plechů tvářených za studena	34
3 Experimentální část.....	37
3.1 Příprava zkušebních vzorků pro měření.....	37
3.2 Tribologické testování zkušebních vzorků.....	40
3.2.1 Postup měření na vzorku s množstvím maziva 1,5 g/m ²	43
3.2.2 Naměřené hodnoty pro vzorek s množstvím maziva 0,5 g/m ²	49
3.2.3 Naměřené hodnoty pro vzorek s množstvím maziva 1 g/m ²	50
3.2.4 Naměřené hodnoty pro vzorek s množstvím maziva 1,5 g/m ²	52
3.2.5 Naměřené hodnoty pro vzorek s množstvím maziva 2 g/m ²	53
3.2.6 Naměřené hodnoty pro vzorek s množstvím maziva 2,5 g/m ²	54
3.2.7 Naměřené hodnoty pro vzorek s množstvím maziva 3 g/m ²	55
3.2.8 Porovnání výsledných naměřených hodnot	56
4 Závěr	62
5 Seznam použité literatury	63

Seznam použitých zkratek a symbolů

Označení	Jednotky	Význam
F_T	[N]	Třecí síla
F_N	[N]	Normálová síla
μ	[1]	Koeficient tření
μ_0	[1]	Statický koeficient tření
F_t	[N]	Tangenciální síla
k_t	[N·m ⁻¹]	Tuhost dotyku
x	[m]	Posunutí
v	[m·s ⁻¹]	Rychlost posuvu
τ	[MPa]	Smykové napětí
F_S	[N]	Statická třecí síla
F_D	[N]	Dynamická třecí síla
N	[N]	Normálové zatížení
m	[kg]	Hmotnost testovaného bloku
g	[m·s ⁻²]	Gravitační tíhové zrychlení
P_t	[μ m]	Hloubka profilu
W_t	[μ m]	Hloubka vlny
R_t	[μ m]	Hloubka drsnosti
R_a	[μ m]	Průměrná aritmetická hodnota drsnosti
R_q	[μ m]	Průměrná kvadratická hodnota drsnosti
R_v	[μ m]	Hloubka největší prohlubně
R_p	[μ m]	Výška největší špičky
R_z, R_{max}	[μ m]	Hloubka drsnosti
η	[N·m ⁻²]	Viskozita
F_h	[N]	Maximální síla v tzv. ustálené oblasti
F_{max}	[N]	Maximální síla
F_s	[N]	Průměrná síla v tzv. ustálené oblasti
ΔF	[N]	Rozptyl síly
s	[mm]	Dráha
p	[MPa]	Kontaktní tlak
S	[mm ²]	Kontaktní plocha testovacích čelistí
HDG		Žárově zinkovaný povrch
EG		Elektrolyticky zinkovaný povrch
PC		Osobní počítač

1 Úvod

Tření patří mezi fyzikální jev, se kterým se lidé setkávají v každodenním životě. Ve většině případů se lidé snaží tření minimalizovat mazáním, leštěním povrchů příslušných dílů, či nanášením povlaků snižující koeficient tření. Avšak je dobré připomenout, že v některých případech je tření naopak vyžadováno a má přímý vliv na správnou funkci daných součástí či technologií. Jedná se např. o pneumatiky, brzdy a brusné kotouče. V automobilovém průmyslu neustále vzrůstají nároky na kvalitu vyráběných vozů a jejich komponenty, což má za následek zvyšující se požadavky na delší pracovní výkon průmyslového maziva. Při správném aplikování vhodného pracovního maziva dochází k omezení reklamací, zvyšování kvality provedení vyráběných vozů a v neposlední řadě k šetření pracovního času.

Cílem této diplomové práce bylo experimentálně stanovit vliv množství maziva na velikost koeficientu tření. Z tohoto důvodu se experimentální část předložené diplomové práce zabývala zjišťováním vlivu množství maziva na změnu koeficientu tření. Poznatky z praxe hovoří o tom, že při výrobních procesech se používá spíše většího množství maziva, než je pro dané výrobní procesy potřeba. Nicméně existují i takové výrobní procesy, při kterých je nutné použít většího množství maziva např. kritická místa.

Zkušebním materiálem byl pozinkový pásek, který byl testován pomocí tribologické zkoušky protahováním pásku. Tribologická zkouška probíhala na tribologickém zařízení Sokol 400 – viz obr. 1. K finálnímu vyhodnocení stanovených výsledků byla použita analýza rozptylu (2F ANOVA).



Obr. 1 Testovací zařízení Sokol 400

2 Teoretická část

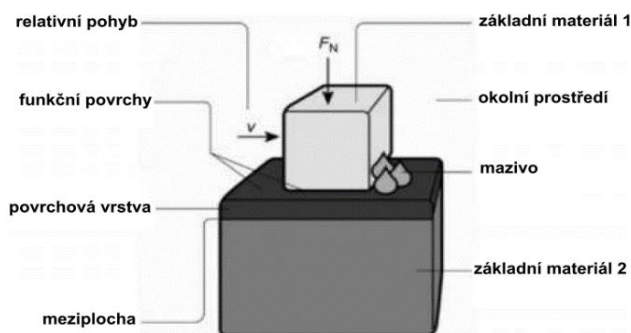
Teoretická část předložené DP se zaměřuje na vědecký obor tribologie, která se zabývá problematikou tření, opotřebení a mazání. Poslední bod této části popisuje povrchové úpravy využívané v automobilovém průmyslu.

2.1 Tribologie

Tribologie je vědní obor, který se zabývá procesy tření, opotřebení a mazání. Hlavním cílem tribologie je výzkum chování příslušných povrchů součástí, které se dotýkají a vzájemně vykonávají relativní nebo vzájemný pohyb. Pod pojmem vzájemný pohyb si lze představit typy pohybů jako např. kmitavý, kluzný, nárazový nebo valivý pohyb.

V dnešním světě je tribologie obsažena ve většině technologických odvětví. Je to dáno tím, že problematika tření, opotřebení a mazání je široce zastoupena zejména v automobilovém i leteckém průmyslu. Odhady hovoří o tom, že ztráty způsobené nesprávnou aplikací tribologických zásad tvoří až 30 % vyrobené energie. Stroje vyřazené v důsledku škod z opotřebení tenkých povrchových vrstev dokonce dosahují hodnot v rozmezí 80–90 %. Mezi hlavní příčiny patří nevhodně zvolená metoda, respektive způsob mazání a zanedbání vlivu okolí, či nevhodná volba třecích dvojic. Při správné aplikaci tribologických zásad je zřejmé, že se dosahuje vyšší spolehlivosti a životnosti.

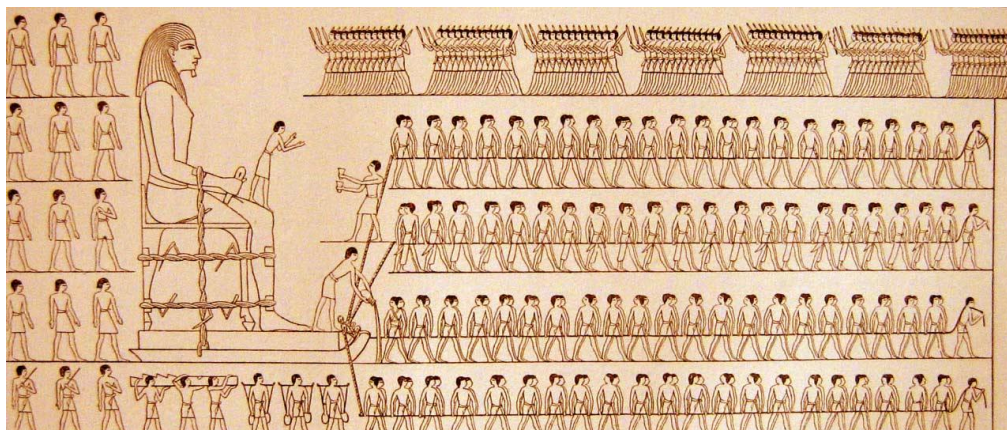
Tribologický systém se rozděluje na umělý nebo přirozený materiální systém základní úrovně, ve kterém probíhá tření. Tření je způsobeno vzájemným působením minimálně dvou struktur systémových prvků – viz obr. 2. Přirozený tribologický systém zahrnuje klouby člověka a zvířat, jejich pohybový aparát, ale i kořeny rostlin. Umělý tribologický systém zahrnuje části technických systémů vytvořené člověkem [1, 8, 9].



Obr. 2 Schéma základního tribologického systému [10]

2.1.1 Historický vývoj tribologie

Název tribologie byl odvozen už ve starověku z řeckého slova *tribos* neboli tření. Už od pravěku se lidé setkávali se třením, když se naučili rozdělávat oheň pomocí křesání kamenů. V pozdější době při manipulaci s těžkými a velkými předměty si člověk snažil ulehčit práci a minimalizovat tření tak, že vynalezl řadu pomůcek a jednoduchých nástrojů. Mezi začátky lze považovat úpravy terénu pro posouvání kamenných kvádrů v Egyptě – viz obr. 3.



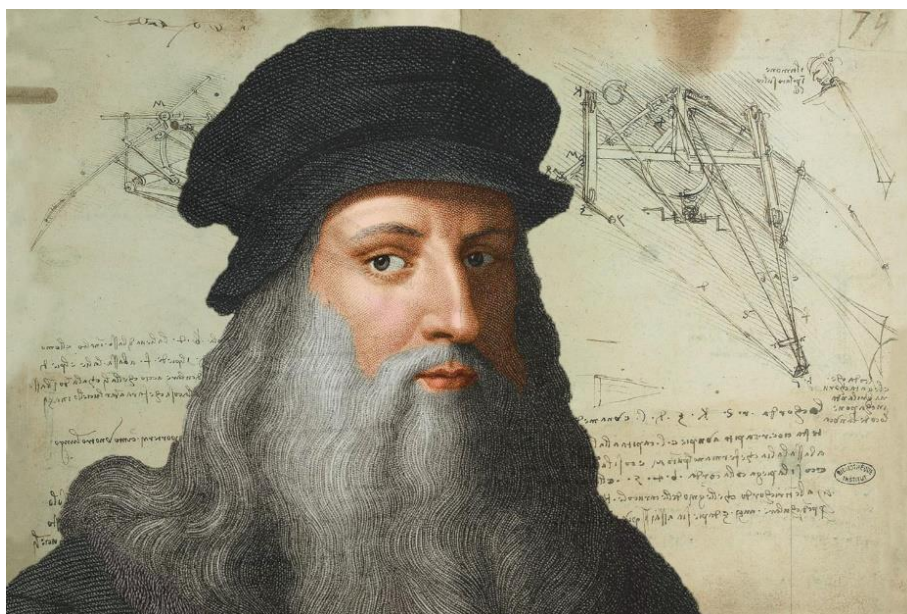
Obr. 3 Ukázka přesunu sochy v Egyptě [11]

Velkým přínosem bylo vynalezení kola v Mezopotámii a do té doby známé vlečení bylo nahrazeno valením – viz obr. 4. Tření vznikající v náboji kola se eliminovalo použitím živočišných tuků. Řecký vynálezce a vědec Archimédés (287 BC–212 BC) použil asi 250 let před n.l. kovová mazaná ložiska.

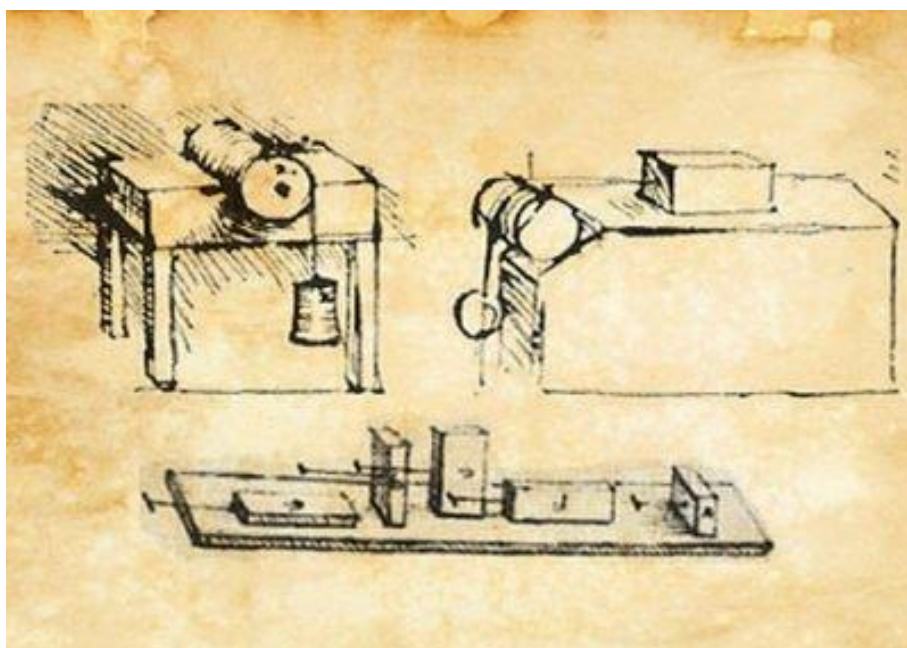


Obr. 4 Názorná ukázka kola z Mezopotámie [12]

Tření byl jev, který přitahoval největší myslitele své doby. Proto není překvapením, že třením se začal v 16. století zabývat také Leonardo da Vinci (1452–1519) a byl to právě on, který zjistil, že velikost třecí síly je úměrná kolmému zatížení a není závislá na velikosti třecích ploch. Druhý jeho objev se týká skutečnosti, že součinitel tření je pro všechny kovy stejný a dosahuje hodnoty 0,25. Po právu byl proto Leonardo Da Vinci označen za otce moderní tribologie – viz obr. 5.

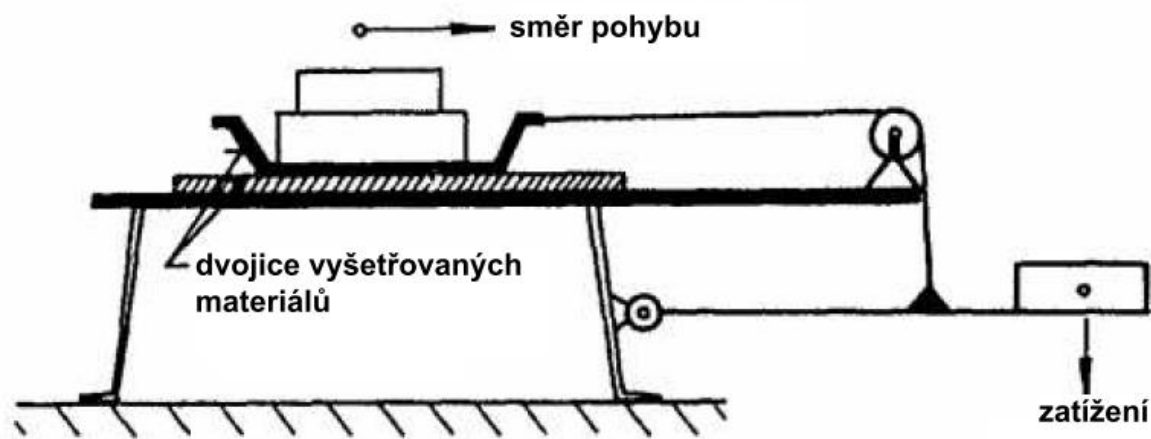


Obr. 5 Leonardo Da Vinci [6]



Obr. 6 Náčrt Coulombova tribometru [7]

Nástupcem Leonarda Da Vinci v oblasti tribologie byl Francouz Guillaume Amontons, který na konci 17. století užíval poměr třecí a normálové síly. V dnešní době je tento poměr využíván pro výpočet koeficientu smykového tření. Tento vztah byl potvrzen a doložen řadou experimentů, které provedl Charles-Augustin de Coulomb a je tak znám pod názvem Coulombův zákon – viz obr. 7.



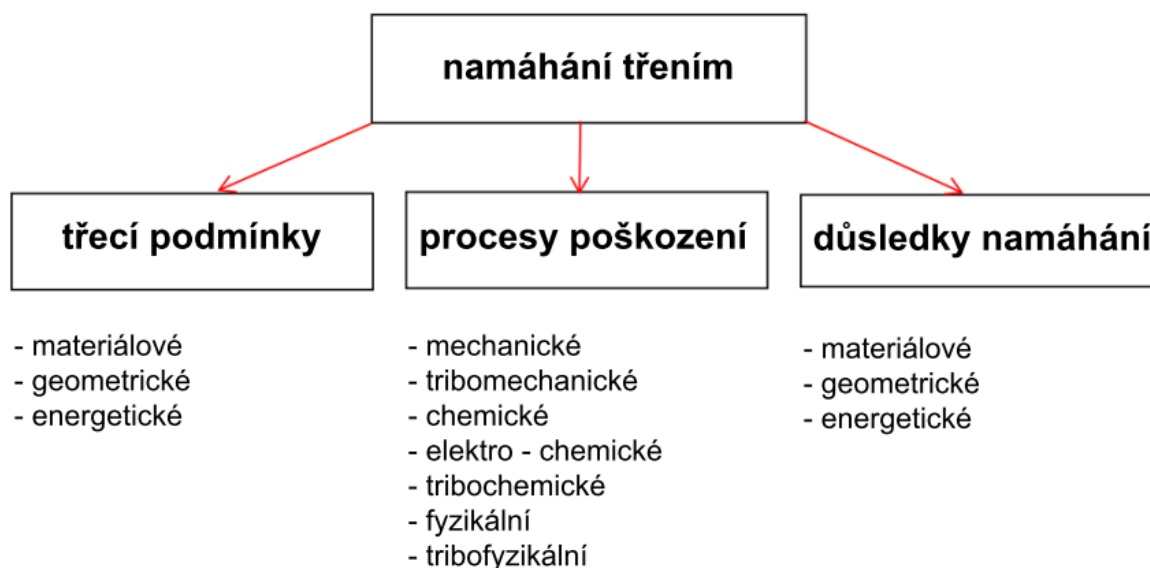
Obr. 7 Schéma Coulombova tribometru [8]

Období 19. století pokračovalo v nastoleném trendu objevů a docházelo k prohlubování tribologických vědomostí. Určitě je vhodné zmínit pokusy s radiálními ložisky železničního inženýra Beauchampa Towera v roce 1833, či odvození tloušťky mazacího filmu inženýrem Mykolou Pavlovych Petrovem v roce 1883. V roce 1884 položil základy hydrodynamické teorie mazání Osborn Reynolds.

Období 20. století bylo z hlediska tribologie velice důležité. Zvyšující se zájem řešit problematiku tření, opotřebení a mazání eskaluje k prohlášení tribologie jako vědního oboru zabývající se vzájemným působením dotýkajících se povrchů při jejich vzájemném pohybu. V tomto období dominují objevy Johana Augusta Brinella, který v roce 1921 vypracoval první klasifikaci druhů opotřebení podle kinematických kritérií. V jeho práci pokračoval J.T. Burwell, který v roce 1957 vypracoval klasifikaci druhů opotřebení podle mechanismu působení [8, 15].

2.2 Tření

Tření je obecně definováno jako odpor proti relativnímu pohybu vznikající mezi dvěma k sobě přitlačovanými tělesy v oblasti dotyku jejich povrchů v tangenciálním směru. Ke tření je potřeba přistupovat dle požadavků, zda je požadované či nikoliv. Například u brzdného systému, pneumatik a spojky je tření vyžadováno a je snaha dosáhnout jeho maximálních hodnot. Účinky tření se minimalizují např. s ohledem na opotřebení, či snížení výkonu a účinnosti – viz obr. 8.



Obr. 8 Základní rozdělení účinků namáhání [8]

Vznik tření je způsoben mikronerovnostmi dotýkajících se ploch materiálů a mezimolekulárními adhezními silami. Při pohybu těles dochází k narážení, deformaci a obroušování daných nerovností povrchů. Kontakt povrchů způsobuje tvorbu můstků, což má za následek vznik chemických vazeb a mikrosvarů. K uskutečnění vzájemného pohybu těles je tedy nutné tyto můstky překonat.

Tření je definováno vzorcem dle Coulombova zákona (1), který popisuje výpočet koeficientu smykového tření jako poměr třecí síly působící proti směru pohybu a kolmé tečné síly – viz obr. 9 [2, 8].

Coulombův zákon

$$\mu = \frac{F_T}{F_N} \quad (1)$$

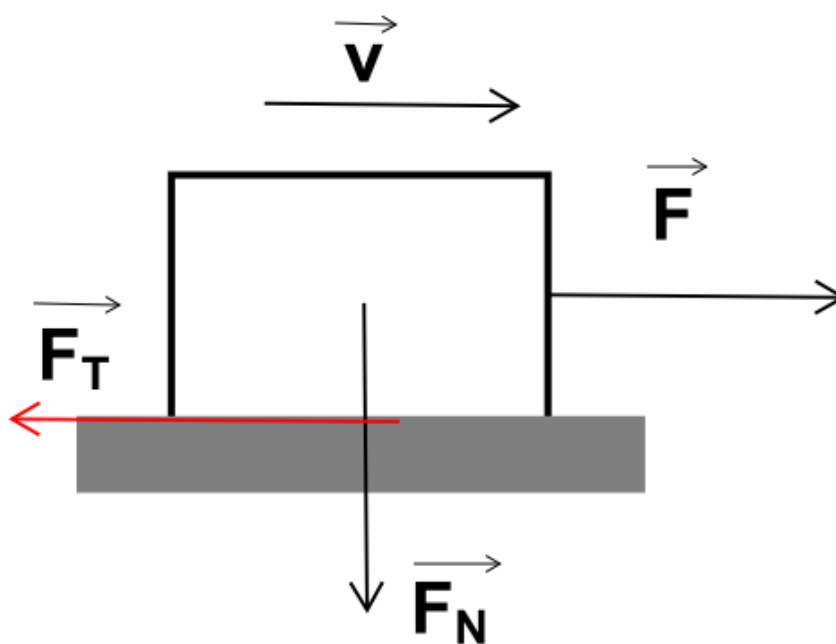
Kde:

μ - koeficient smykového tření [1]

F_T - třecí síla působící proti směru pohybu [N]

F_N - normálová síla [N]

Je potřeba zmínit, že hodnota koeficientu smykového tření se odvíjí podle zvolených parametrů. Mezi parametry ovlivňující hodnotu koeficientu smykového tření patří druh zvolených materiálů, jakost povrchů, teplota, prostředí a rychlost tření [8].



Obr. 9 Schéma třecích sil [16]

2.2.1 Druhy tření

V praxi existuje spousta možných kritérií, podle kterých lze rozlišovat druhy tření. Na následujících stránkách je uveden přehled rozdělení tření podle základních kritérií.

Dle místa působení kontaktních ploch

Tření posuzováno dle místa působení kontaktních ploch se rozděluje na:

- vnitřní tření,
- vnější tření.

Vnitřní tření vzniká při vzájemném posouvání v materiálových vrstvách stejného tělesa, zatímco vnější tření je definováno vzájemným stykem třecích ploch [8].

Dle skupenství třecích ploch

Tření posuzováno dle skupenství třecích ploch se rozděluje na:

- tření pevných těles,
- tření kapalinové,
- tření za klidu,
- tření plynové,
- tření plazmatické.

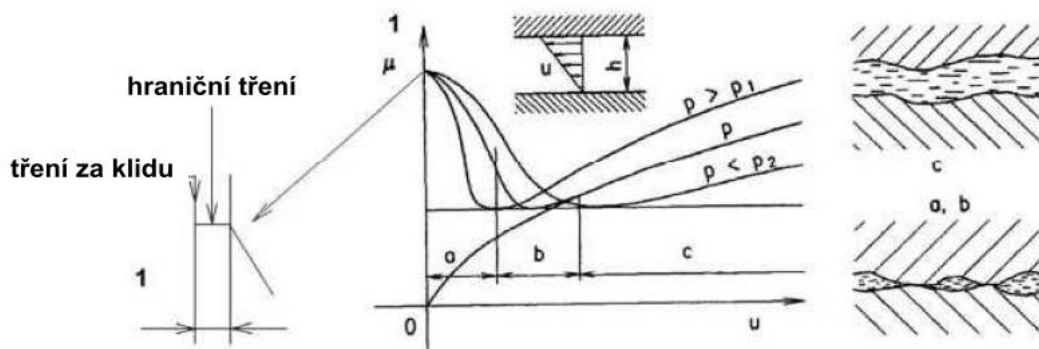
Tření pevných těles

V případě tření pevných těles jsou třecí plochy v tuhém skupenství. Příčinou tohoto druhu tření je interakce povrchů, to znamená vzájemné zachytávání mikronerovností, pružné a plastické mikronerovnosti, či adheze mezi mikronerovnostmi povrchů [8].

Tření kapalinové

U tření kapalinového probíhá proces tření ve vrstvách s vlastnostmi kapaliny. Smykové napětí, které vzniká při relativním pohybu se odvíjí od viskozity mezilátky a má za následek odpor proti pohybu. Pro kapalinové tření je charakteristické vznik hydrodynamické nebo hydrostatické vrstvy, ve které dochází k procesu tření. Jeho velikost je vyjádřena součinitelem tření. Tento průběh je

zachycen pomocí tzv. Stribeckovy křivky, která porovnává průběhy pro různé látky a viskozity – viz obr. 10 [8].



p – Stribeckova křivka, p_1 – změna tlaku, p_2 – změna tlaku pro $p_1 < p < p_2$, a – oblast tření pevných látek, b – oblast smíšeného tření, c – oblast kapalinového tření

Obr. 10 Stribeckova křivka [8]

Ze Stribeckovy křivky je patrné, že daný průběh je rozdělen do několika oblastí označených jako a, b, c. V každé této oblasti probíhá jiný typ tření a pro ně specifické vlastnosti.

Oblast a se nazývá oblastí tření pevných látek neboli suché tření. V této oblasti proces probíhá v adhezních vrstvách pevného skupenství.

Oblast b je místem smíšeného tření. Zde se nerovnosti povrchu místy navzájem dotýkají a místy jsou oddělena mazací vrstvou látky. V místech, kde se nerovnosti vzájemně dotýkají probíhá tření pevných látek, zatímco v místech, kde jsou nerovnosti odděleny mazací vrstvou látky, probíhá kapalinové tření.

Oblast c je označena za kapalinové tření, kde celý proces tření probíhá ve vrstvě kapaliny.

U tření kapalinového za určitých okolností nastává speciální případ. Jedná se o tření, které se nazývá mezní nebo polosuché tření. Jedná se o limitní případ, který probíhá v oblastech smíšeného nebo kapalinového tření – viz obr. 11. Hodnota součinitele tření μ nabývá hodnot v rozmezí 0,01-0,1 [8].



Obr. 11 Mezní tření [17]

Tření za klidu

Tření za klidu je v odborné literatuře nazýváno hraničním třením. Jak je patrné ze Stribeckovy křivky (viz obr. 10), jedná se o typ tření s největší hodnotou součinitele tření [8].

Tření plynové

Tření plynové je analogií kapalinového tření s tím rozdílem, že tření probíhá ve vrstvách s vlastnostmi plynu. Zákonitosti tohoto procesu se odvíjí od již zmíněného kapalinového tření. Tření plynové se rozděluje podle typu dané tlakové oblasti na aerodynamickou nebo aerostatickou [8].

Tření plazmatické

Třením plazmatickým se popisuje takový druh tření, při kterém probíhá tření ve vrstvách s vlastnostmi plazmy. Plazma je definována jako druh vysoce ionizovaného plynu, která se rozděluje podle typu stavu probíhajícího vnitřního tření na tribofluidní a triboplazmatickou [8].

Smykové tření

Smykové tření je definováno jako poměr tangenciální síly k zatěžující normálové síle. Jedná se o bezrozměrnou veličinu, která je určena pomocí koeficientu tření. Experimentálním zkoumáním smykového tření bylo zjištěno, že za různých rychlostí dosahuje konstantních hodnot. Těleso uvedené do pohybu za konstantních podmínek

dosahuje menších hodnot tření, než je tomu u tělesa, které se nepohybuje. Proto se smykové tření rozděluje na:

- statické smykové tření,
- dynamické smykové tření.

Pro každý typ smykového tření se určuje jiný koeficient tření. Pro statické smykové tření se určuje statický koeficient tření μ_0 , jehož hodnota odpovídá maximální síle, která je nutná k vyvolání pohybu mezi danými tělesy. Dynamické smykové tření je určeno pomocí dynamického koeficientu tření μ .

Podle základního přístupu z hlediska statiky, kinematiky a dynamiky je patrné, že síla potřebná k vyvolání pohybu daného tělesa bude větší než síla potřebná k udržení tělesa v rovnoměrném přímočarém pohybu. Vzhledem k této skutečnosti lze vyjádřit závislost mezi koeficienty tření vztahem (2):

$$\mu_0 > \mu \quad (2)$$

Kde:

μ_0 - statický koeficient tření [1]

μ - dynamický koeficient tření [1]

Velikost koeficientu tření závisí na zvolených parametrech – např. typu materiálu stykových ploch, či mazacích podmínkách. Hodnoty smykového tření jsou uvedeny v příslušné tabulce tab. 1. [2, 8].

Tab. 1 Součinitelé smykového tření pro dané kombinace třecích dvojic [8]

Materiály stykových ploch	Statický koeficient tření μ_0 [1]	Dynamický koeficient tření μ [1]
Ocel/ocel – sucho	0,15	0,1
Ocel/bronz – sucho	0,18	0,16
Ocel/bronz – mazáno	0,1	0,01
Ocel/led	0,027	0,014
Guma/asfalt – sucho	0,85	0,3
Guma/asfalt – mokro	0,2-0,5	0,15

Stribeck effect – statické tření

Proces nazývaný jako Stribeck effect nastává v případě, kdy se těleso nepohybuje. Síly, které na dané těleso působí, se považují za statické tření a spojení mezi povrchy těles si lze představit jako pružinu. Toto spojení drží obě tělesa pohromadě a působením tangenciální síly F_t dochází k pružné deformaci a posunutí těles. Při odstranění tangenciální síly dochází k návratu do původního stavu. Tento proces je vyjádřen vztahem (3) [18]:

$$F_t(x) = -k_t \cdot x \quad (3)$$

Kde:

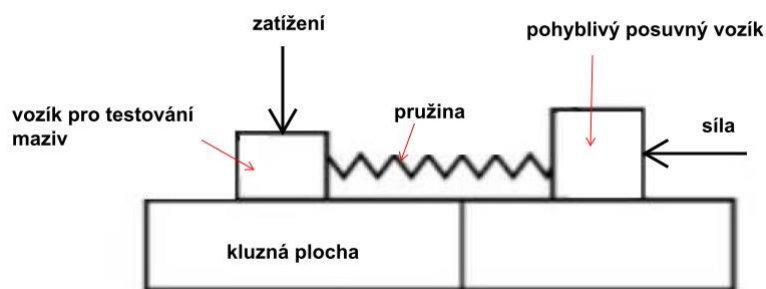
F_t - tangenciální síla [N]

k_t - tuhost dotyku [$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$]

x - posunutí [m]

Stick – Slip

Metoda Stick – Slip (viz obr. 12) je speciální forma tření, která vzniká při nízkých rychlostech pohybu. Tato speciální forma tření se vyskytuje v tribologických systémech, kde probíhají vibrace. Metodu Stick – Slip ovlivňuje závislost koeficientu kluzného tření na rychlosti pohybu. V praxi se tato problematika řeší nejvíce u obráběcích strojů s pomalým posuvem, kde může docházet k zanechání stop nástroje po obrábění vlivem vibrací. Předjít tomuto problému lze s pomocí maziv obohacené o speciální aditiva, či vhodnou volbou povrchové úpravy [10, 18].



Obr. 12 Tribologický systém Stick – Slip [10]

Stlačováním pohyblivého kluzného bloku o konstantní rychlosti v [m/s] dochází k překonání smykového napětí τ [MPa] mezi povrchem bloku a kluznou plochou. Mezi těmito povrchy vzniká třecí síla, která je určena statickým a dynamickým koeficientem tření. Na začátku procesu je blok v klidu a pružina je lineárně stlačována rychlostí v . Pro velikosti působících sil platí vztah (4):

$$F_s = F_t \quad (4)$$

Kde:

F_s - statická třecí síla [N]

F_t - tangenciální třecí síla [N]

V konečné fázi procesu síla pružiny překoná statickou sílu bloku F_s , což má za následek uvedení bloku do pohybu. Dochází tedy ke změně charakteru a statická třecí síla se změní na dynamickou třecí sílu F_D . Dynamická třecí síla je pak určena vztahem (5):

$$F_D = \mu \cdot N \quad (5)$$

$$N = m \cdot g \quad (6)$$

Kde:

F_D - dynamická třecí síla [N]

μ - dynamický součinitel tření [N]

N - normálové zatížení bloku [N]

m - hmotnost testované bloku [kg]

g - gravitační tíhové zrychlení [$m \cdot s^{-2}$]

Při tomto stavu blok překročí rovnovážnou polohu pružiny, dochází k natažení dané pružiny. Tento proces pokračuje do doby, dokud nedojde k vyrovnání síly pružiny a dynamické třecí síly. Při vyrovnání těchto sil dojde k zastavení bloku a navrácení do oblasti, která je charakterizována statickou třecí silou F_s [10, 18].

2.3 Drsnost povrchu a její parametry

Drsnost povrchu se definuje jako nerovnoměrnost, která je určena výškovými rozdíly povrchu. Tyto výškové odchylky jsou nejčastěji způsobeny řeznou hranou nástroje při zpracování a rozdělují se na makrostruktury a mikrostruktury. Makrostruktura se zabývá odchylkami tvaru a polohy, zatímco z hlediska mikrostruktury se zkoumá zvlnění a drsnost [3, 19].

Drsnost

Jedná se o nerovnoměrnosti s kratšími intervaly, které jsou způsobeny např. řezným nástrojem či zrnitostí brusného kotouče. Drsnost vytváří na povrchu dílu reliéf o různé velikosti výškových i šířkových odchylek [19].

Zvlnění

Nerovnoměrnosti struktury povrchu s dlouhodobějšími intervaly způsobené například vibrací obráběcího stroje či uchycením obrobku [19].

Tvar

Nerovnoměrnosti s dlouhodobými nebo nepravidelnými odchylkami struktury povrchu způsobené např. nepřesností nebo tuhostí stroje [19].

2.3.1 Charakteristické veličiny drsnosti povrchu

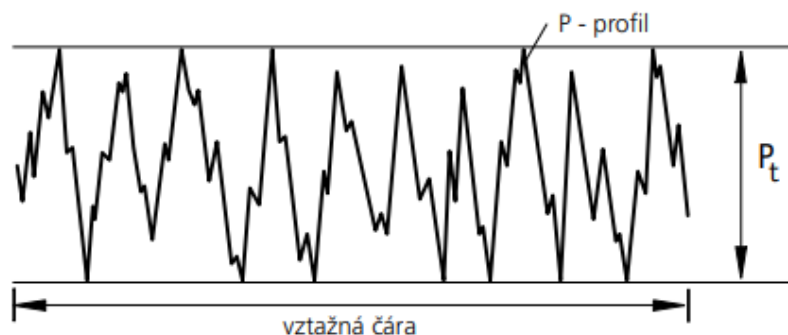
Pro posuzování kvality povrchu se rozeznávají různé hodnoty měření drsnosti. V konstrukčních výkresech jsou označeny příslušnými zkratkami. Drsnost pro dotykové měření je řízena dle normy DIN EN ISO 4287. Nejčastěji používané pojmy v rámci charakteristiky drsnosti povrchu jsou vysvětleny na následujících stránkách [5, 19].

Hloubka profilu P_t [μm]

Hloubka profilu P_t je dána součtem výšky nejvyšší špičky profilu a hloubky nejhlubší prohlubně P profilu uvnitř měřené dráhy. Délku vztažné čáry je potřeba vždy uvést – viz obr. 13.

P profil neboli primární profil vzniká z profilu získaného dotykovou metodou např.:

- odstraněním jmenovitého tvaru metodou nejmenšího součtu čtverců odchylek na čáře udaného tvaru, například regresní přímky,
- odfiltrováním velmi krátkých vlnových délek, které nejsou vzaty do vyhodnocení pomocí profilového filtru λ_s . Za pomoci krátkovlnné mezní vlnové délky λ_s bude výrazně zlepšena srovnatelnost [20].

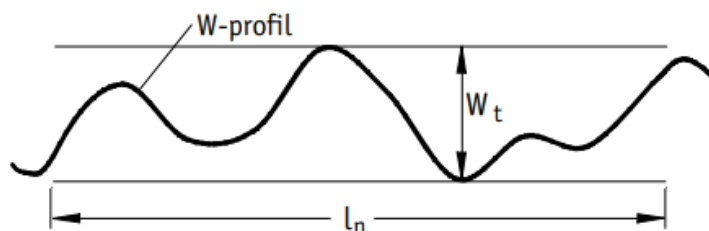


Obr. 13 Ukázka měření hloubky profilu P_t [20]

Hloubka vlny W_t [μm]

Hloubka vlny W_t je dána součtem nejvyšší špičky profilu a hloubky nejhlubší prohlubně W profilu uvnitř měřené dráhy l_n . Délku měřicí dráhy l_n je vždy třeba uvést.

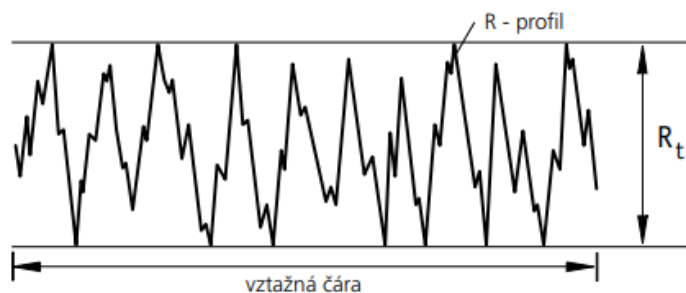
W profil je střední čára, která je vytvořena profilovým filtrem λ_c . V tomto profilu nejsou obsaženy dlouhovlnné podíly, které jsou přiřazeny tvaru – viz obr. 14 [20].



Obr. 14 Ukázka měření hloubky vlny W_t [20]

Hloubka drsnosti R_t [μm]

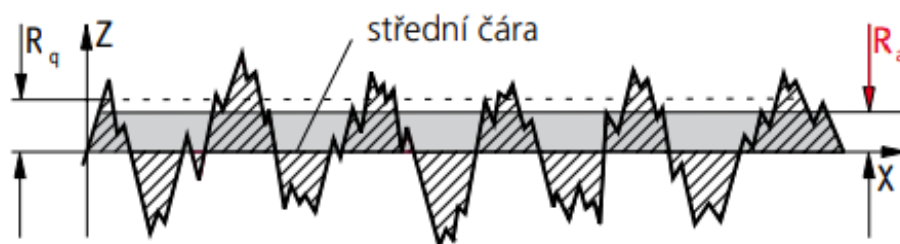
Hloubka drsnosti R_t je dána součtem nejvyšší špičky profilu a hloubky nejhlubší prohlubně R profilu uvnitř měřené dráhy. Délku zvolené vztažné dráhy je potřeba vždy uvést – viz obr. 15 [20].



Obr. 15 Ukázka měření hloubky drsnosti R_t [20]

Průměrná aritmetická hodnota drsnosti R_a [μm]

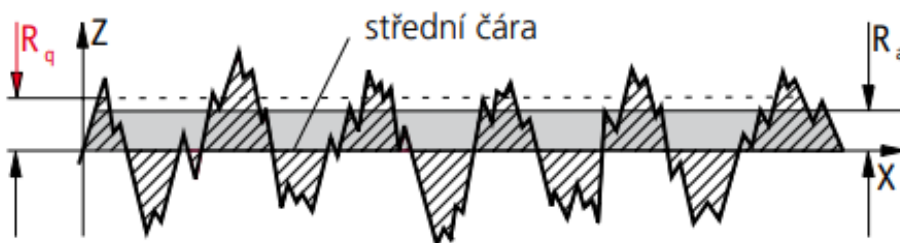
Průměrná aritmetická hodnota drsnosti R_a je aritmetickou střední hodnotou všech částí hodnot profilu drsnosti – viz obr. 16 [20].



Obr. 16 Ukázka měření průměrné aritmetické hodnoty drsnosti R_a [20]

Průměrná kvadratická hodnota drsnosti R_q [μm]

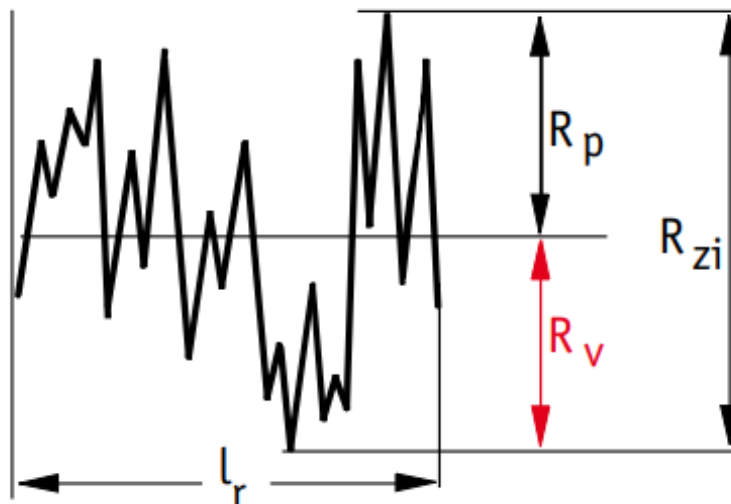
Průměrná kvadratická hodnota drsnosti R_q je kvadratickou střední hodnotou všech hodnot profilu drsnosti – viz obr. 17 [20].



Obr. 17 Ukázka měření průměrné kvadratické hodnoty drsnosti R_q [20]

Hloubka největší prohlubně R_v [μm]

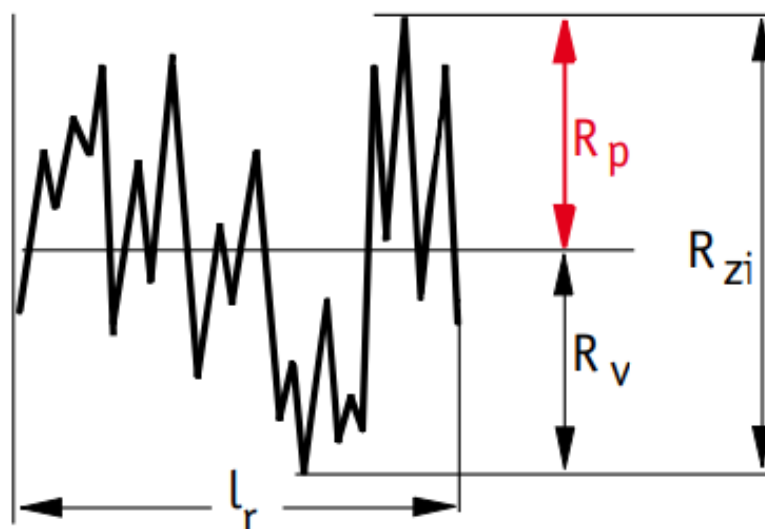
Hloubka největší prohlubně R_v je hloubka největší prohlubně R profilu uvnitř jednotlivé měřicí dráhy. Pro R_v se také používá označení R_m – viz obr. 18 [20].



Obr. 18 Ukázka měření hloubky největší prohlubně R_v [20]

Výška největší špičky R_p [μm]

Výška největší špičky R_p je výška největší špičky profilu drsnosti uvnitř jednotlivé měřicí dráhy – viz obr. 19 [20].

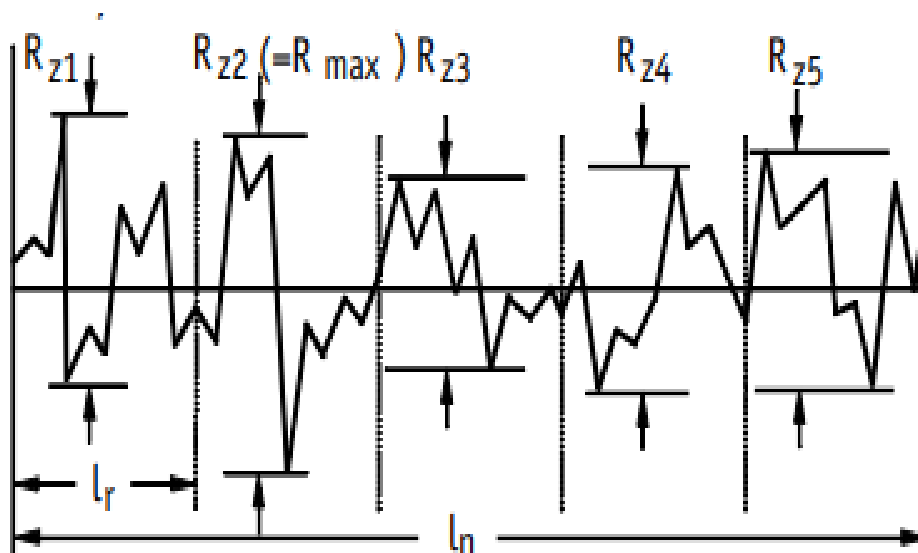


Obr. 19 Ukázka měření výšky největší špičky R_p [20]

Hloubka drsnosti R_z , R_{max} [μm]

Hloubka drsnosti R_z je aritmetická střední hodnota z jednotlivých hloubek drsnosti R_{zi} za sebou následujících jednotlivých měřicích drah.

Maximální hloubka drsnosti R_{max} je největší jednotlivá hloubka drsnosti uvnitř celkové měřicí dráhy – viz obr. 20 [20].



Obr. 20 Ukázka měření hloubky drsnosti R_z , R_{max} [20]

2.4 Maziva a mazání

Mazání je proces, při kterém dochází ke snížení tření a opotřebení třecích povrchů za pomoci maziv. Hlavní funkce maziv je separace a ochrana třecích povrchů. Látka užívající se jako mazivo může být plynného, kapalného nebo pevného skupenství. Mezi vedlejší funkce maziv patří např. odvod tepla, odstraňování částic při vznikajícím se opotřebením nebo dosažení některých požadovaných vlastností, jako je např. korozivzdornost. V praxi je užívání maziv velice časté, proto je potřeba posuzovat funkci maziv i z hlediska vlivu na životní prostředí a zdraví člověka [6, 8, 21].

Přísady do maziv

K zajištění požadovaných vlastností maziv se většinou nedosahuje výrobou čistých maziv, ale je nutné přidávat aditiva neboli přísady. Mezi nepoužívanější typy přísad do maziv se používají antioxidanty, depresanty, modifikátory viskozity a tření [4, 8].

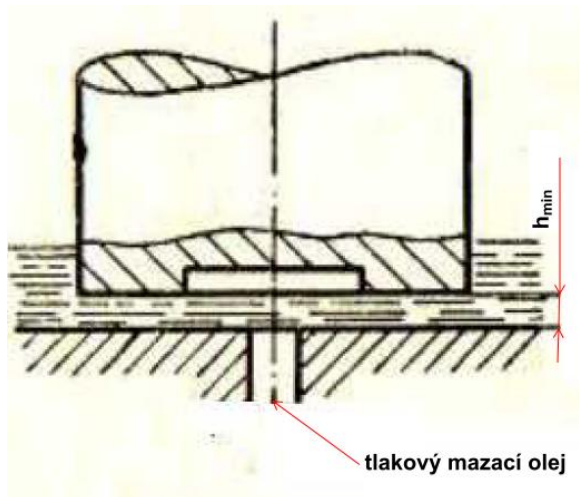
2.4.1 Režimy mazání

Režimy mazání se rozdělují podle průběhu procesu. Dochází-li k oddělení třecích povrchů souvislým kapalinovým mazacím filmem, jedná se o kapalinové mazání, které se dále rozděluje na hydrostatické, hydrodynamické a elastohydrodynamické.

Probíhá-li průběh procesu mazání tak, že dochází k bezprostřední interakci mezi třecími povrchy, hovoří se o tzv. mezním mazání nebo mazáním tuhými mazivy [2, 8, 21].

Hydrostatické mazání

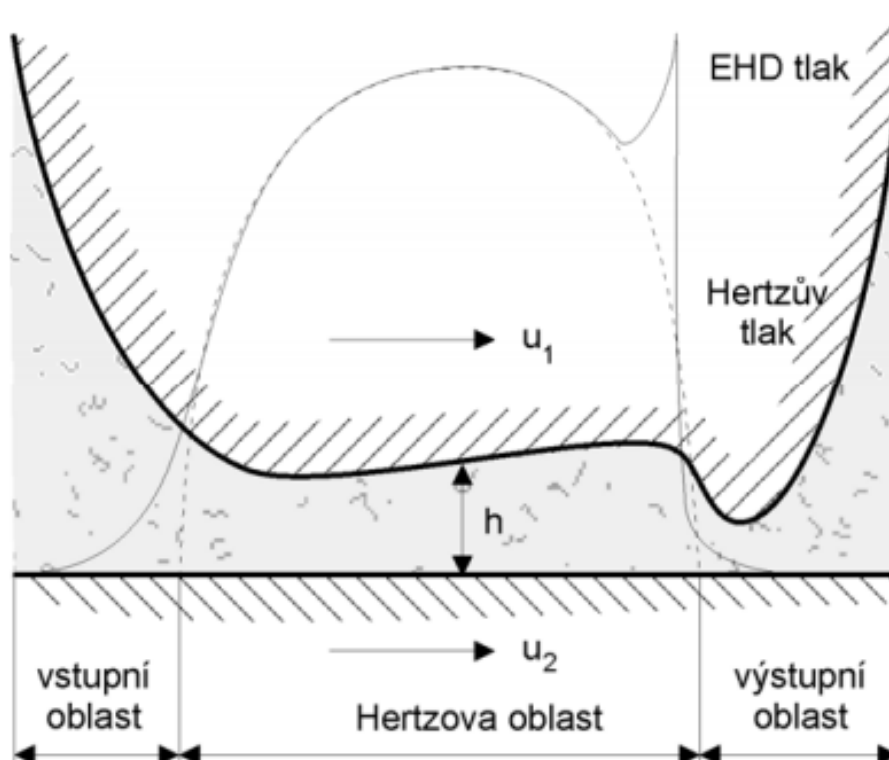
Při hydrostatickém mazání je tlak v mazací vrstvě vytvářen mimo kluzné plochy s pomocí hydrogenerátoru. K vytvoření hydrostatické vrstvy musí být zajištěno, že tlak dodávaného maziva je dvakrát až čtyřikrát větší, než je hodnota středního tlaku vycházejícího z geometrie uložení a zatížení [8].



Obr. 21 Průběh hydrostatického mazání [17]

Elastohydrodynamické mazání

Elastohydrodynamické mazání je kapalinové mazání, při kterém elastické deformace povrchů dosahují řádově stejně velkých hodnot, jako u tloušťky hydrodynamického mazacího filmu. K tomuto režimu mazání dochází obvykle mezi zatíženými, nekonformně zakřivenými povrchy, které se nachází v relativním pohybu.



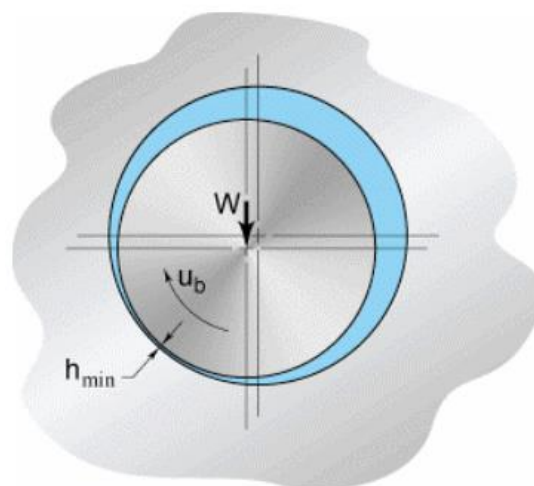
Obr. 22 Průběh elastohydrodynamického mazání [21]

Elastohydrodynamické mazání se vyznačuje určitými charakteristickými základními znaky jako např.:

- v Hertzově oblasti kontaktu je tenký, přibližně paralelní mazací film, pro jehož tloušťku platí $h \approx u^{0,68}$,
- rozložení tlaku v mazacím filmu odpovídá přibližně Hertzovu rozložení,
- v oblasti náhlého snížení tloušťky mazacího filmu se nachází lokální, druhé tlakové maximum [21].

Hydrodynamické mazání

Hydrodynamické mazání je kapalinové mazání, při kterém se vytváří mezi povrchy souvislá vrstva maziva. Tato vrstva zcela zabraňuje styku povrchových nerovností a svým tlakem zabraňuje účinku kolmému zatížení na povrchy těles. K hydrodynamickému mazání dochází mezi shodně, či podobně zakřivenými povrchy, které se nacházejí v relativním pohybu – viz obr. 23.



Obr. 23 Hydrodynamického mazání [21]

Mezi základní charakteristické znaky hydrodynamického mazání patří:

- tloušťka mazacího filmu je funkcí normálového zatížení W , rychlosti u , viskozity η a geometrie ložiska,
- pro minimální tloušťku mazacího filmu platí $h_{min} \approx \left(\frac{u}{W}\right)^{0,5}$,
- povrchy nevykazují téměř žádné opotřebení,
- velikost součinitele tření závisí především na viskozitě maziva [21].

Mezné mazání

Mezné mazání je typ mazání, při kterém se povrchy nachází v bezprostřední blízkosti, tudíž dochází ke vzájemné interakci mezi povrchovými nerovnostmi. Zatížení je přenášeno prostřednictvím velmi tenkého mezného filmu, jehož struktura a vlastnosti jsou odlišné od struktury a vlastností maziva a povrchů. Film vzniká fyzikální absorpcí, nebo chemickými reakcemi maziva s třecími povrchy.

Podstata mezného mazání spočívá ve vytváření ochranného povrchového filmu, který se skládá z dlouhých řetězců polárních molekul. Tyto molekuly jsou orientovány kolmo k povrchu.

Většina rafinovaných ropných olejů jsou sice nepolární nebo málo polární látky, nicméně obsahují složky polárního charakteru [21].

Mazání tuhými mazivy

Mezi tuhá maziva se řadí např. grafit, sirník, molybden nebo teflon. Mazací látky jsou nejčastěji používány ve formě prášku, který přilne k daným třecím plochám a chemicky s nimi reaguje. Hlavní funkcí těchto maziv je oddělit od sebe obě třecí plochy prostřednictvím prostředí s malým koeficientem tření. Tento typ mazání se využívá při procesech, kde se počítá s vysokými pracovními teplotami a tlaky. Dále se tento typ mazání využívá pro díly, které pracují v agresivním prostředí [15].

2.4.2 Druhy maziv

Maziva jsou v dnešní době nedílnou součástí pracovního provozu strojů a součástí. Při správném používání maziv dochází ke snížení koeficientu tření a prodloužení životnosti stroje či nástroje. Maziva se rozdělují dle charakteru na:

- plynná maziva,
- kapalná maziva,
- plastická maziva,
- tuhá maziva [8].

Plynná maziva

Plynná maziva se využívají např. v plynových ložiscích při aerodynamickém nebo aerostatickém režimu. V těchto ložiscích se dosahuje vysokých obvodových rychlostí a teplot. Teplota dosahuje hodnot větších než 300°C. Hlavní výhodou plyných maziv je malá viskozita, která roste se zvyšující teplotou. Mezi další výhody patří nízký součinitel tření, nepatrné třecí teplo nebo neexistující kavitace. Nevýhodou plyných maziv je menší schopnost snášet zatížení, nestabilita a sklon k vysokému frekvenčnímu chvění.

Volba vhodného typu plyného maziva závisí na teplotě. Vzduch nebo oxid uhličitý se využívají do teplot 650°C. Dalšími plyny, používané jako plyná maziva, jsou hélium a dusík. Tyto plyny se používají pro teploty vyšší než 800°C [6, 8].

Kapalná maziva

Kapalná maziva se nejčastěji uplatňují v hydrodynamickém, hydrostatickém, elastohydrodynamickém nebo hraničním a smíšeném tření. Jedná se o typ maziv, který má největší zastoupení a díky aditivům mají širokou škálu využití. Do této skupiny maziv patří

ropné oleje, syntetické oleje, anorganická kapalná maziva a taveniny. Ropné oleje jsou na bázi uhlovodíků, které se vyrábí destilací, rafinací nebo odparafinováním z ropy. Syntetické oleje se používají k vyřešení tribologických problémů s nízkými nebo vysokými teplotami.

Anorganická kapalná maziva a taveniny se rozdělují na motorové a průmyslové. Jejich využití je v praxi velké, což je dáno díky rostoucímu automobilovému průmyslu. Automobilový průmysl využívá tento typ maziv nejčastěji, jelikož do této kategorie patří zejména oleje spalovacích motorů, kompresorové oleje, turbínové oleje, hydraulické oleje, maziva pro obrábění a tváření kovů [8].

Plastická maziva

Plastická maziva mohou být ve formě mazacích tuků nebo gelů. Jsou tvořeny disperzní a dispergovanou fází. Disperzní fáze je olejová složka, kterou zastupuje ropný nebo syntetický olej. Dispergovaná fáze je tvořena zpevňovadlem, které se rozděluje dle charakteru na mýdlové a nemýdlové.

Plastická maziva se využívají pro kluzná ložiska, ozubená soukolí nebo kluzná vedení [8].

Tuhá maziva

Tuhá maziva vynikají svojí stálostí, proto se využívají v procesech s extrémní zátěží. Tuhá maziva lze rozdělit do několika skupin dle původu a chemického složení na:

- anorganické,
- organické,
- měkké kovy,
- kluzné látky.

Jak již bylo zmíněno výše, mezi tuhá maziva patří např. grafit, sirník, molybden nebo teflon [8].

2.4.3 Využití maziv pro tažení plechu

Tažení plechu je proces, při kterém je mazivo velmi často využíváno jako mazací prostředek. Typ maziva je volen dle jeho složení a vlastností. Právě tyto parametry ovlivňují např. velikost energetických ztrát, životnost nebo kvalitu povrchu.

Proces tažení plechu nejčastěji využívá jako mazivo olej, který je syntetického, rostlinného nebo živočišného původu. Pro zlepšení mazací schopnosti jsou do oleje přidávána různá aditiva [23, 25].

Maziva v automobilovém průmyslu

S rozvíjejícím se automobilovým průmyslem dochází ke zvyšování požadavků na kvalitu vyrobených dílů, které jsou poté montovány na vozidla. Používání maziv při výrobním procesu dochází k výraznému zlepšení kvality vyráběných dílů. Mezi nejčastěji používaná maziva v automobilovém průmyslu patří zejména:

- prací oleje,
- konzervační maziva,
- tažné oleje.

Prací oleje

Pracím olejem se rozumí takový druh oleje, který je určen především k čištění plechu před lisováním. Vzhledem ke skutečnosti, že tento olej dosahuje vhodných vlastností i pro tažení, je možné prací olej uplatnit i při tomto procesu. Prací olej je na povrch plechu nanášen pomocí pracího válce [23].

Konzervační mazivo

V praxi se využívá konzervační mazivo pro ochranu plechu a jeho zakonzervování před vnějšími vlivy. Tato ochrana je ve většině případů zhotovena přímo výrobcem daného plechu [24].

Tažný olej

Tento typ oleje je určen čistě pro proces tažení. Olej je aplikován na povrch plechu pomocí trysky na kritických místech výlisku, kde je vyžadováno lokálního mazání [23].

2.5 Povrchové úpravy ocelových plechů

Povrchové úpravy ocelových plechů jsou nejvíce využívány v automobilovém průmyslu pro svoje antikorozi vlastnosti. Nanášením povlaků dochází ke zlepšení vlastností ocelových plechů i z hlediska morfologie. Dochází tak k ulpívání maziva na povrchu plechu, které je potřebné pro další tvářecí operace.

S rozvíjejícím automobilovým průmyslem dochází ke zvyšování nároků a požadavků také na zlepšování vlastností povlaků s důrazem na kvalitu, tvářitelnost a užité parametry zpracovávaných plechů.

Povlaky musí splňovat řadu funkcí, mezi které patří udržení maziva a zamezení jeho odtékání. Nesmí také docházet k nárůstu třecích ploch v přímém styku nebo k odtrhování mazivového filmu z povrchu oceli.

Povlaky plechů jsou často vystavovány vysokým kontaktním tlakům při dosednutí lisovacích nástrojů, a proto je nutné zajistit na povrchu optimální mikrogeometrické parametry – viz obr. 24 [7, 26].



Obr. 24 Ukázka vhodného (vlevo) a nevhodného (vpravo) plechu pro tváření [26]

2.5.1 Povrchové úpravy ocelových plechů tvářených za studena

V automobilovém průmyslu se tento typ plechů využívá k výrobě karosérií. Plechy z hlubokotažné oceli válcované za studena jsou nejčastěji ošetřeny povlakem na bázi zinku. Zinek patří do skupiny neušlechtilých kovů a má tendenci pasivovat daný povrch. Zinek disponuje relativně nízkou cenou a výbornou korozní ochranou. Mezi hlavní výhody zinku patří jeho elektrochemické vlastnosti, kdy ocelovému podkladu poskytuje katodickou ochranu. Zinek je méně ušlechtilý než železo, tudíž tvoří obětovanou anodu. Hlavním úkolem obětované anody je přednostní rozpouštění v korozním prostředí. To má za

následek ochranu ocelových součástí před účinkem oxidačního prostředí a zvýšení odolnosti karoserie proti korozi.

Povrchy ošetřené povlaky zinku jsou náchylné k zadírání při tváření nebo k porušení adheze se základním materiálem. K minimalizaci těchto problémů se provádí ošetřením daných povrchů pomocí fosfátových vrstev.

Mezi nejpoužívanější technologie používané pro zhotovení zinkového povlaku na povrch plechu patří:

- žárové zinkování – HDG,
- elektrolytické zinkování – EG,
- nanášení organických povlaků s obsahem zinku.

V automobilovém průmyslu se k ošetření karosérií automobilů upřednostňují žárově pozinkované plechy zpracované válcováním za studena oproti elektrolytický pozinkovaným plechům válcovaným za studena z důvodu levné výrobní režie. Žárově pozinkované plechy se využívají pro díly, kde není vysoký požadavek na kvalitu vzhledu. Elektrolytický zinkované plechy se používají pro díly, kde je kladen důraz i na vzhled.

Jedním z faktorů, proč využívá automobilový průmysl právě pozinkované plechy, je i vhodnost plechů k odporovému svařování. Ochranný povlak zinku se odpařuje pouze v místě dotyku svařovacích elektrod, tudíž nedochází k velkému teplotnímu ovlivnění svařovaného plechu [26].

Žárové povlaky zinku – HDG (Hot Dip Galvanized)

Žárový povlak zinku je vytvořen ponořením dílu do roztaveného zinku nebo jeho slitin s hliníkem, železem, niklem, či hořčíkem. K dosažení kovově čistého vzhledu je nutné před samotným procesem provést předúpravu daného plechu. Předúpravou se daný plech odmastí, zbaví okují a rzi. V některých případech je nutné i moření daného plechu. Předúprava je nutný proces, jelikož pouze kovově čistý povrch plechu po vložení do lázně se zinkem reaguje.

Při samotném procesu železo difunduje do zinkové vrstvy a dochází k vytvoření spojení povlaku se základním materiálem. Zhotovený zinkový povlak disponuje dobrou jakostí povrchu. Elastičnost čisté zinkové vrstvy zaručuje, že nedochází k popraskání zhotoveného povlaku. Zinkový povlak také vykazuje hladký povrch bez nerovností.

K udržení maziva na povrchu je nutné vytvořit potřebnou morfologii, které lze dosáhnout jemným tryskáním nebo drezírováním po válci [26].

Elektrolytické povlaky zinku – EG (Electro Galvanized)

Jedná se o povlaky na bázi zinku nebo jeho slitin s hliníkem, železem nebo niklem. Proces elektrolytického zinkování disponuje vysokou chemickou čistotou vrstvy a kontrolovatelnou tloušťkou povrchu s přesností $\pm 0,1 \mu\text{m}$. Zlepšení vlastností elektrolytického zinkové povlaku se dosahuje fosfátováním. Výhodou elektrolytických zinkových povlaků je možnost nanášet velmi tenký povlak pouze z jedné strany dílu. Tloušťka zinkového povlaku je konstantní po celé ploše plechu. Z hlediska morfologie je zhotovený povlak vhodný pro použití maziv bez další mechanické úpravy. Vytvoření elektrolytického zinkového povlaku je z hlediska výrobních nákladů dražší, než je tomu u žárově zinkového povlaku. Tento fakt je hlavním důvodem, proč automobilový průmysl upřednostňuje plechy s žárově zinkovanými povrchy.

Elektrolytický proces probíhá při nízkých teplotách. Nedochozí ke vzniku difúzní vrstvy mezi povlakem a základním materiálem. Jakost zhotoveného povlaku odpovídá nejvyšším nárokům, proto je tento proces využíván v průmyslové výrobě pro lakované díly. Touto technologií se dosahuje velmi čisté a tvárné zinkové vrstvy, která bez problémů odolává dalším přetvořením. Elektrolytický zinkový povlak disponuje vynikající korozní ochranou a dobrou tvářitelností [26].

3 Experimentální část

Tribologická zkouška protahování pásku probíhala na tribologickém testovacím zařízení Sokol 400 podle metody označované jako 1B (tzv. metoda „na přímo“). Zkušební pozinkovaný HDG plech (žárové zinkování) byl upevněn mezi čelisti a pohyb příčnicku zajišťoval protažení zkušebního pásku. Tribologická zkouška probíhala při konstantní teplotě 40°C a konstantní rychlosti posuvu 1 mm/s. Za proměnné parametry byly dle zadání považovány hodnoty kontaktního tlaku 4 a 8 MPa a zejména různé množství maziva 0,5 - 1 - 1,5 - 2 - 2,5 - 3 g/m².

Cílem této diplomové práce bylo stanovení vlivu množství maziva na velikost koeficientu tření, proto bylo nutné koeficient tření μ [1] určit výpočtem. K výpočtu koeficientu tření se používala jedna z naměřených tribologických sil, která byla označována jako F_h [N]. Jedná se o maximální sílu v tzv. ustálené oblasti měření. Dráha pro jeden tlak byla od 0 do 100 mm, přičemž ustálená oblast byla považována od 30 do 100 mm. Testováním zkušebního pásku na testovacím zařízení Sokol 400 byly také zjištěny další důležité hodnoty různých tribologických sil – maximální síla F_{max} [N], maximální síla v ustálené oblasti F_h [N], průměrná hodnota síly v ustálené oblasti F_s [N] a rozptyl síly ΔF [N]. Detailněji jsou tyto různé typy tribologických sil popsány v kap.3.2.1.

3.1 Příprava zkušebních vzorků pro měření

Zkušební vzorky byly vystřiženy z tabule plechu ve směru 90° vůči směru válcování na stejné rozměry 450 x 44,7 mm. V prvním kroku došlo k očištění a odmaštění testovaných vzorků. Tento krok je poměrně důležitý, jelikož při nesprávném odmaštění nebude dosaženo správné adheze maziva k testovanému povrchu. Dané povrchy zkušebních vzorků byly odmaštěny pomocí přípravku D-sol – viz obr. 25. Jedná se o kapalinu, která je určena k bezoplachovému odmašťování a čištění dílů. Takto odmaštěné zkušební vzorky byly připraveny k následnému nanášení maziva – viz obr. 26.

**Obr. 25** Odmaštění zkušebních vzorků v lázni**Obr. 26** Nastříhané a odmaštěné zkušební vzorky

Základním sledovaným parametrem bylo množství maziva. Proto bylo nutné rozdělit zkušební vzorky do šesti skupin dle množství maziva. Hodnoty množství maziva, které bylo nanášeno na povrch zkušebních vzorků podle těchto skupin jsou přehledně znázorněny v příslušné tab. 2.

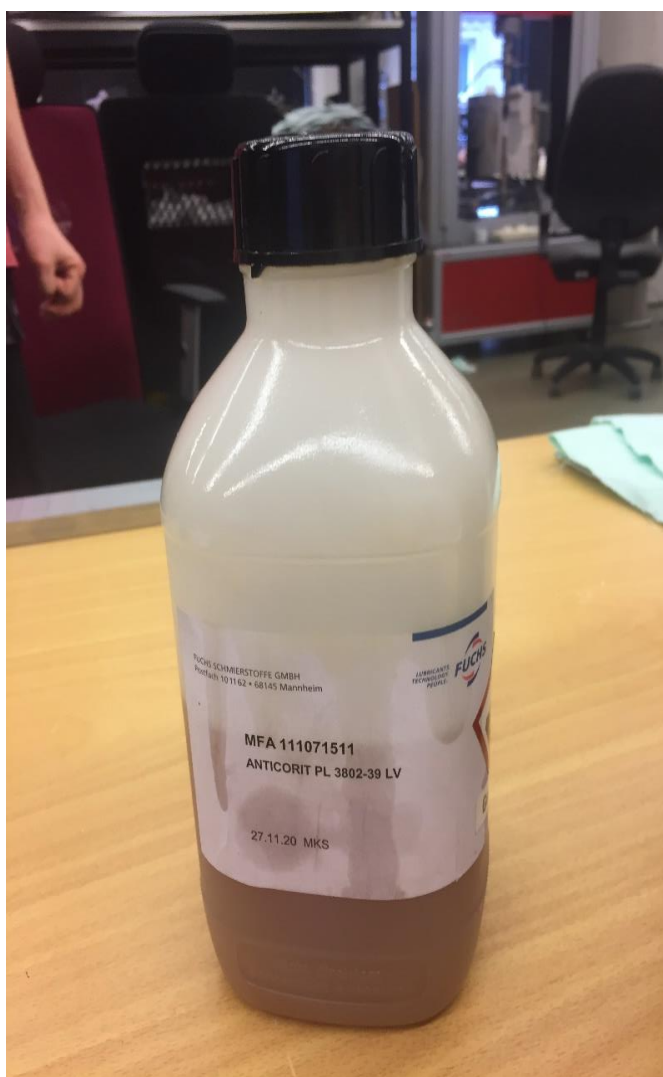
Tab. 2 Nanášené hodnoty množství maziva pro dané zkušební vzorky

Skupina	Množství maziva [g/m ²]
1	0,5
2	1
3	1,5
4	2
5	2,5
6	3

K danému tribologickému testování bylo použito mazivo Anticorit PL 3802-39 LV od firmy Fuchs – viz obr. 27. Jedná se o ochranný antikorozi olejí bez obsahu barya. Tento typ oleje se používá například ke konzervaci pásové oceli válcované za studena.

Po nanesení daného množství maziva proběhla kontrola jeho množství na povrchu pomocí přístroje od firmy Infralytic GmbH. – viz obr. 28. Přístroj pracuje na principu fyzikálních rozdílů mezi vlastnostmi základního materiálu a vrstvy naneseného povlaku. Kontrolní měření naneseného množství maziva na zkušebních vzorcích bylo provedeno na třech místech z obou stran, a to pro každý testovaný pásek pozinkového plechu za pomoci zmíněného přístroje– viz obr. 29. Přípustná hodnota naneseného množství se pohybovala v toleranci $\pm 0,1 \text{ g/m}^2$.

Po následné kontrole množství maziva naneseného na povrch zkušebních vzorků byly zkušební vzorky připravené pro samotné tribologické testování na přístroji Sokol 400.



Obr. 27 Použité mazivo Anticorit PL 3802-39 LV



Obr. 28 Kontrola množství maziva na povrchu zkušební vzorku



Obr. 29 Znárodnění kontrolních bodů pro měření množství maziva

3.2 Tribologické testování zkušebních vzorků

Tribologická zkouška probíhala na testovacím zařízení Sokol 400 dle metody 1B (tzv. „na přímo“) a dle předepsaných parametrů. Zkušební pozinkové pásky měly stejný rozměr, který byl 450 x 44,7 mm. Parametry teploty a rychlosti posuvu byly neměnné, zatímco hodnoty parametrů kontaktních tlaků a množství maziva se měnily. Hodnoty nanášeného množství maziva na zkušební vzorky byly již uvedeny v tab. 2. Zbylé parametry tribologického testování jsou přehledně znázorněny v tab. 3.

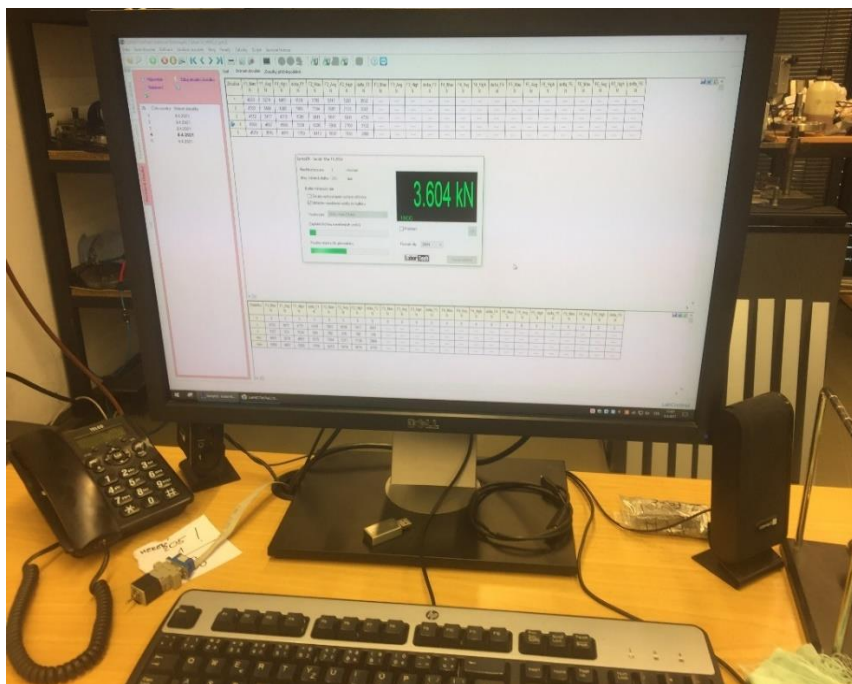
Tab. 3 Hodnoty nastavených parametrů měření

Parametry tribologického testování	Rychlost [mm/s]	Teplota [°C]	Kontaktní tlak [MPa]		Kontaktní plocha testovacích čelistí [mm]
	1	40	4	8	40x78

Tribologické pracoviště bylo složeno z testovacího zařízení Sokol 400, počítače pro zaznamenání výsledků, hydraulického a teplotního agregátu – viz obr. 30.

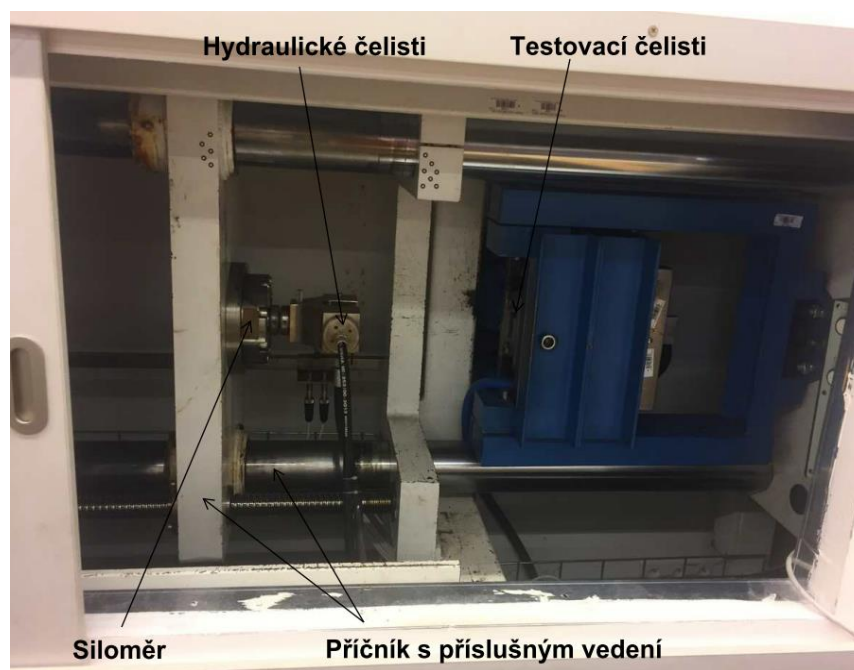
**Obr. 30** Tribologické pracoviště

K dosažení předepsaných hodnot kontaktních tlaků dle předem určených parametrů je zařízení vybaveno hydraulickým agregátem. Tlaky působily na testovací čelisti, které byly umístěny v testovacím zařízení Sokol 400. K udržení konstantní teploty během tribologické zkoušky se používal teplotní agregát. Tribologická zkouška protahování pásky metodou 1B probíhala za teploty 40°C. Frekvence snímání měřených dat byla o velikosti 2 kHz, kdy k samotnému snímání naměřených dat byl použit PC – viz obr. 31.



Obr. 31 Zaznamenávání získaných dat pomocí PC (měření aktuální zkoušky)

Podrobný detail testovacího zařízení Sokol 400 je uveden na obrázku – viz obr. 32. Testovací zařízení bylo složeno z hydraulických upínacích čelistí, siloměru, pohyblivého příčnicku s příslušným vedením a testovacích čelistí. Panel ovládání rychlosti posuvu testovacího zařízení byl umístěn samostatně na stole.



Obr. 32 Testovací zařízení Sokol 400

Samotné měření zkušebních vzorků, které byly rozděleny do příslušných skupin dle množství naneseného maziva – viz tab.2, probíhalo dle následujících kroků. Prvním krokem byla kontrola nastavených parametrů na testovacím zařízení. Tato kontrola byla zaměřena hlavně na hodnotu kontaktního tlaku a rychlosti posuvu testovaného pásku. Následovalo upnutí zkušební vzorku pomocí hydraulických čelistí. Poté proběhla opětovná kontrola správného upnutí zkušební vzorku a překontrolování nastavených parametrů. Po všech těchto úkonech bylo zahájeno testování.

Pro každé množství maziva bylo provedeno osm měření a následné hodnoty byly pomocí počítače zaznamenány a připraveny k následnému vyhodnocení.

3.2.1 Postup měření na vzorku s množstvím maziva 1,5 g/m²

Jak již bylo ve stručnosti popsáno v kap. 3.1 a 3.2, tak v rámci každého měření se jednalo o sérii postupných kroků, které na sebe navazovaly. Soubor těchto úkonů byl uplatněn pro testování všech zkušebních vzorků. V této kapitole je celý postup měření ukázán na vzorku s množstvím maziva 1,5 g/m².

Prvním krokem bylo nastříhání pozinkového plechu na osm zkušebních vzorků o rozměrech 450 x 44,7 mm. Následovalo očištění a odmaštění povrchů zkušebních vzorků.

Na připravené zkušební vzorky bylo nanášeno mazivo Anticorit PL 3802-39 LV od firmy Fuchs v požadovaném množství 1,5 g/m². Kontrola naneseného množství byla provedena prostřednictvím přístroje od firmy Infracytic GmbH – viz obr. 33. Každý zkušební pásek byl měřen třikrát z jedné a třikrát z druhé strany.



Obr. 33 Kontrola množství maziva zkušebního pásku

Po úspěšné kontrole naneseného množství maziva na zkušebních vzorcích se přistoupilo k následnému testování. Tribologické testování probíhalo dle následujících parametrů uvedených v tab. 4.

Tab. 4 Hodnoty nastavených parametrů měření pro množství maziva 1,5 g/m²

Množství maziva [g/m ²]	Rychlost posuvu [mm/s]	Teplota [°C]	Kontaktní tlak [MPa]	
1,5	1	40	4	8

Pro zahájení tribologické zkoušky bylo nutné upnout zkušební vzorek pomocí hydraulických čelistí. Tlak potřebný k uzavření čelistí byl vyvinut pomocí hydraulického agregátu. K udržení konstantní teploty během testování byl používán teplotní agregát.

Během tribologické zkoušky bylo testováno osm vzorků o stejném množství maziva. Naměřené hodnoty byly zaznamenány pomocí počítače, na kterém bylo možné sledovat průběh daného procesu. Tribologickým testováním zkušebního vzorku byly získány závislosti síly F [N] na dráze s [mm]. Z této závislosti lze vyhodnocovat různé typy sil, z nichž ty nejdůležitější jsou uvedeny v tab. 5. Celková dráha měření byla od 0 do 100 mm, přičemž se za ustálenou oblast považuje dráha od 30 do 100 mm.

Tab. 5 Měřené typy tribologických sil

Typ síly	Označení	Jednotky
Maximální síla	F_{\max}	[N]
Maximální síla v tzv. ustálené oblasti	F_h	[N]
Průměrná hodnota síly v tzv. ustálené oblasti	F_s	[N]
Rozpyl sil	ΔF	[N]

Hodnoty naměřené tribologickou zkouškou zkušebního vzorku s množstvím maziva 1,5 g/mm² jsou uvedeny v tab. 6 a v tab. 7 dle velikosti kontaktního tlaku během testování. V tabulce jsou rovněž uvedeny hodnoty aritmetického průměru \bar{x} a výběrové směrodatné odchylky s .

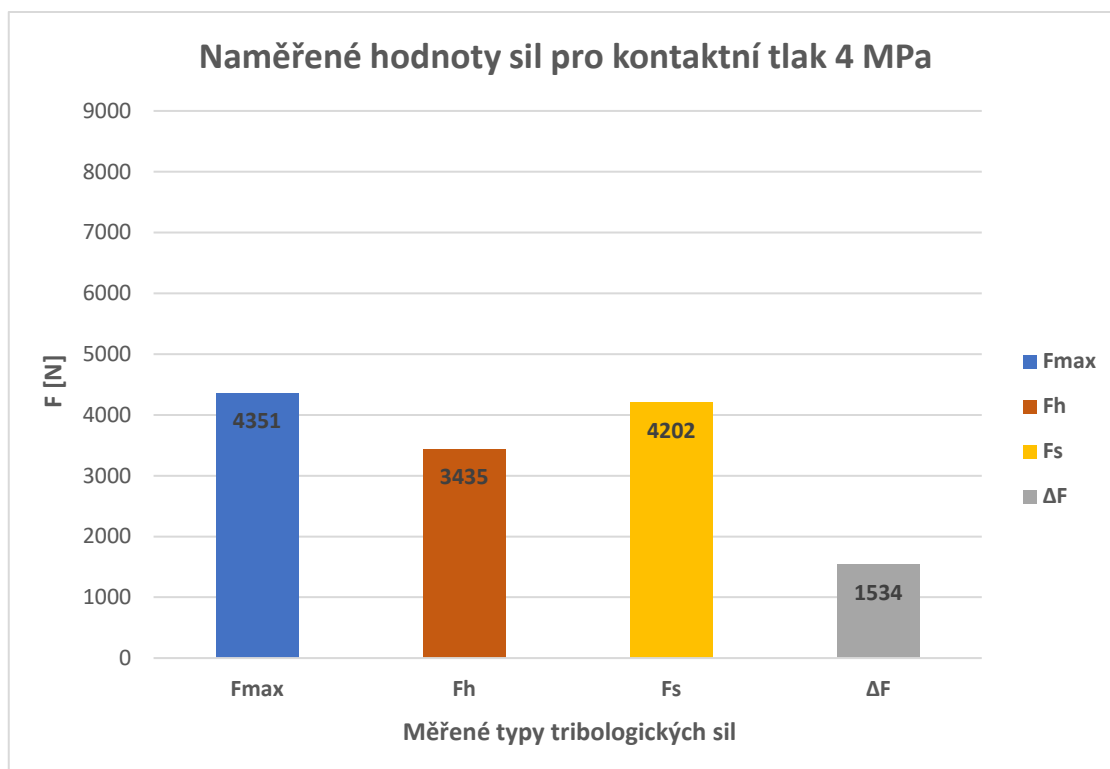
Tab. 6 Zaznamenané hodnoty zkušebních vzorků pro kontaktní tlak **4 Mpa**

Zkušební vzorek	F_{\max} [N]	F_s [N]	F_h [N]	ΔF [N]
1	4250	3222	3836	1228
2	4186	3324	4020	1391
3	4781	3737	4781	2088
4	4299	3351	4076	1449
5	4290	3366	4110	1488
6	4270	3360	4064	1408
7	4407	3571	4407	1673
8	4322	3547	4322	1549
\bar{x}	4351	3435	4202	1534
s	173	157	274	241

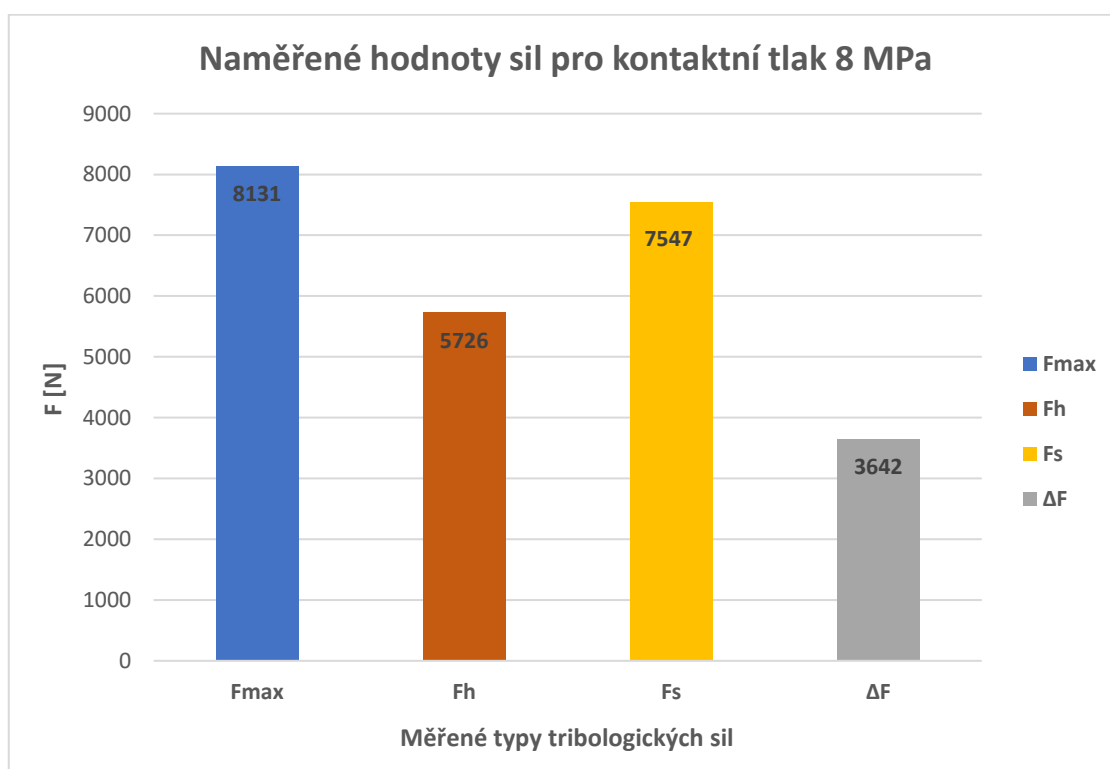
Tab. 7 Zaznamenané hodnoty zkušebních vzorků pro kontaktní tlak **8 Mpa**

Zkušební vzorek	F_{\max} [N]	F_s [N]	F_h [N]	ΔF [N]
1	7572	5570	7123	3106
2	7944	5833	7680	3692
3	7862	5651	7284	3265
4	8174	5789	8149	4720
5	8075	5795	8075	4559
6	8046	5823	7605	3565
7	8749	5755	7308	3107
8	8627	5592	7152	3121
\bar{x}	8131	5726	7547	3642
s	364	99	375	612

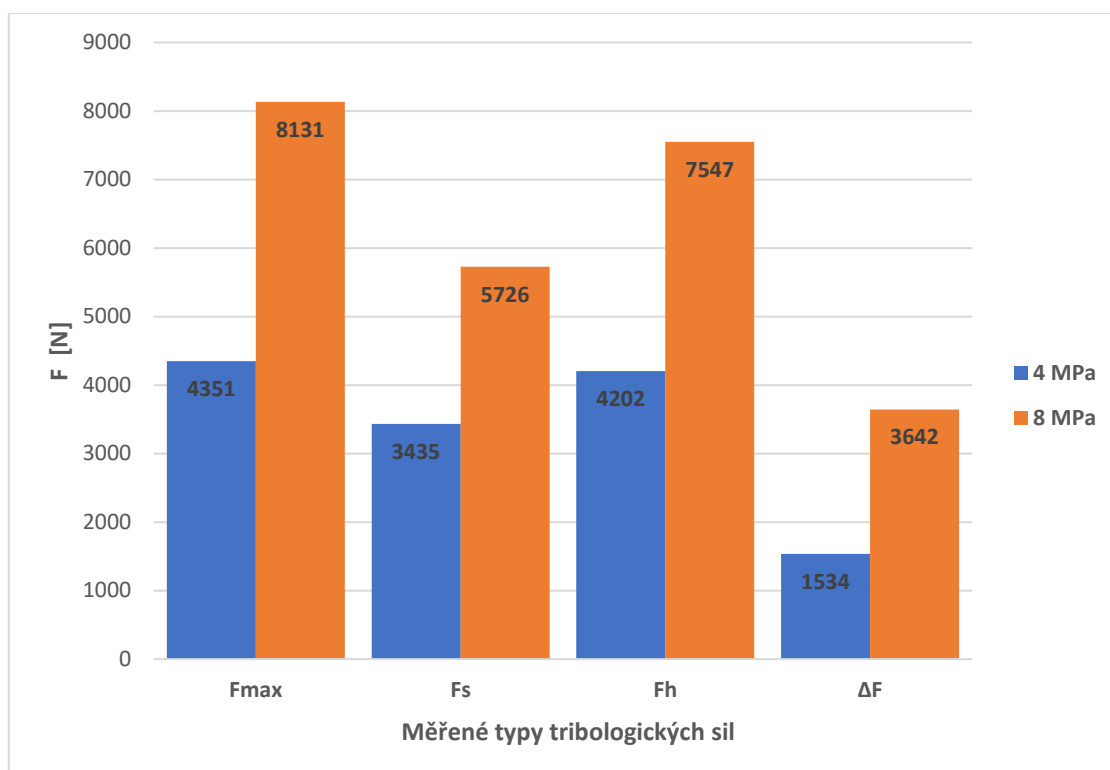
Grafická podoba těchto výsledků je zobrazena na obr. 34 a obr. 35, kde jsou uvedeny typy naměřených sil s velikostí silových hodnot v newtonech.



Obr. 34 Průměrné hodnoty naměřených sil pro kontaktní tlak 4 MPa



Obr. 35 Průměrné hodnoty naměřených sil pro kontaktní tlak 8 MPa



Obr. 36 Porovnání naměřených hodnot sil pro kontaktní tlaky 4 a 8 MPa

Vyhodnocení hodnot různých typů tribologických sil je první možností, jak vyhodnocovat naměřená data. Nicméně, cílem této diplomové práce bylo zhodnotit vliv množství maziva na velikost koeficientu tření. Bylo tedy nutné také vypočítat hodnotu koeficientu tření podle vzorce (7), přičemž byla využita naměřená hodnota síly F_h .

$$\mu = \frac{F_h}{2 \cdot p \cdot S} \quad (7)$$

Kde:

μ	- koeficient tření	[1]
F_h	- maximální síla v tzv. ustálené oblasti	[N]
p	- kontaktní tlak	[MPa]
S	- kontaktní plocha testovacích čelistí	[mm ²]

Použitím příslušné rovnice (7) byly vypočítány hodnoty koeficientů tření pro dané zkušební vzorky o rozdílných kontaktních tlacích. Hodnoty jsou přehledně zaznamenány v tab. 8 opět pomocí aritmetického průměru a výběrové směrodatné odchylky.

Tab. 8 Vypočítané hodnoty koeficientů tření pro vzorky s množstvím maziva 1,5 g/m²

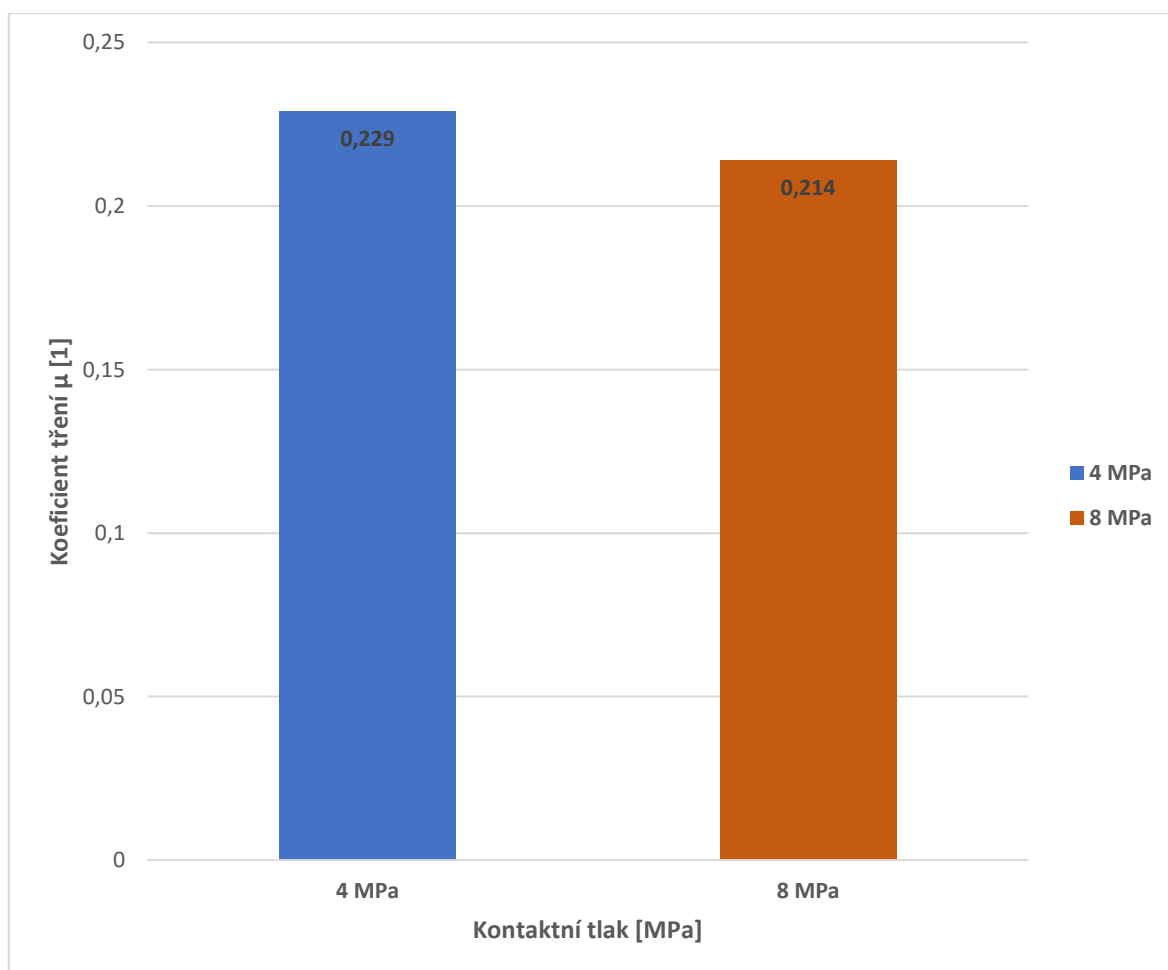
Zkušební vzorek	Kontaktní tlak [MPa]			
	4	8	4	8
	F_h [N]	F_h [N]	μ [1]	μ [1]
1	3836	7123	0,154	0,143
2	4020	7680	0,161	0,154
3	4781	7284	0,192	0,146
4	4076	8149	0,163	0,163
5	4110	8075	0,165	0,162
6	4064	7605	0,163	0,152
7	4407	7308	0,177	0,146
8	4322	7152	0,173	0,143
\bar{x}	4202	7547	0,169	0,151
s	274	375	0,011	0,008

3.2.2 Naměřené hodnoty pro vzorek s množstvím maziva 0,5 g/m²

Naměřené hodnoty pro zkušební vzorky s naneseným množstvím maziva 0,5 g/m² jsou zaznamenány v tab. 9. Tribologické vzorky byly opět testovány také pro dva kontaktní tlaky 4 a 8 MPa. Následně jsou na obr. 37 porovnány koeficienty tření.

Tab. 9 Naměřené hodnoty tribologických sil a koeficientu tření: 0,5 g/m²

	Kontaktní tlak [MPa]									
	4					8				
	F_{max} [N]	F_s [N]	F_h [N]	ΔF [N]	μ [1]	F_{max} [N]	F_s [N]	F_h [N]	ΔF [N]	μ [1]
\bar{x}	5802	4400	5706	2613	0,229	10825	7382	10658	6552	0,214
s	296	186	340	355	0,013	1032	585	1165	1199	0,023



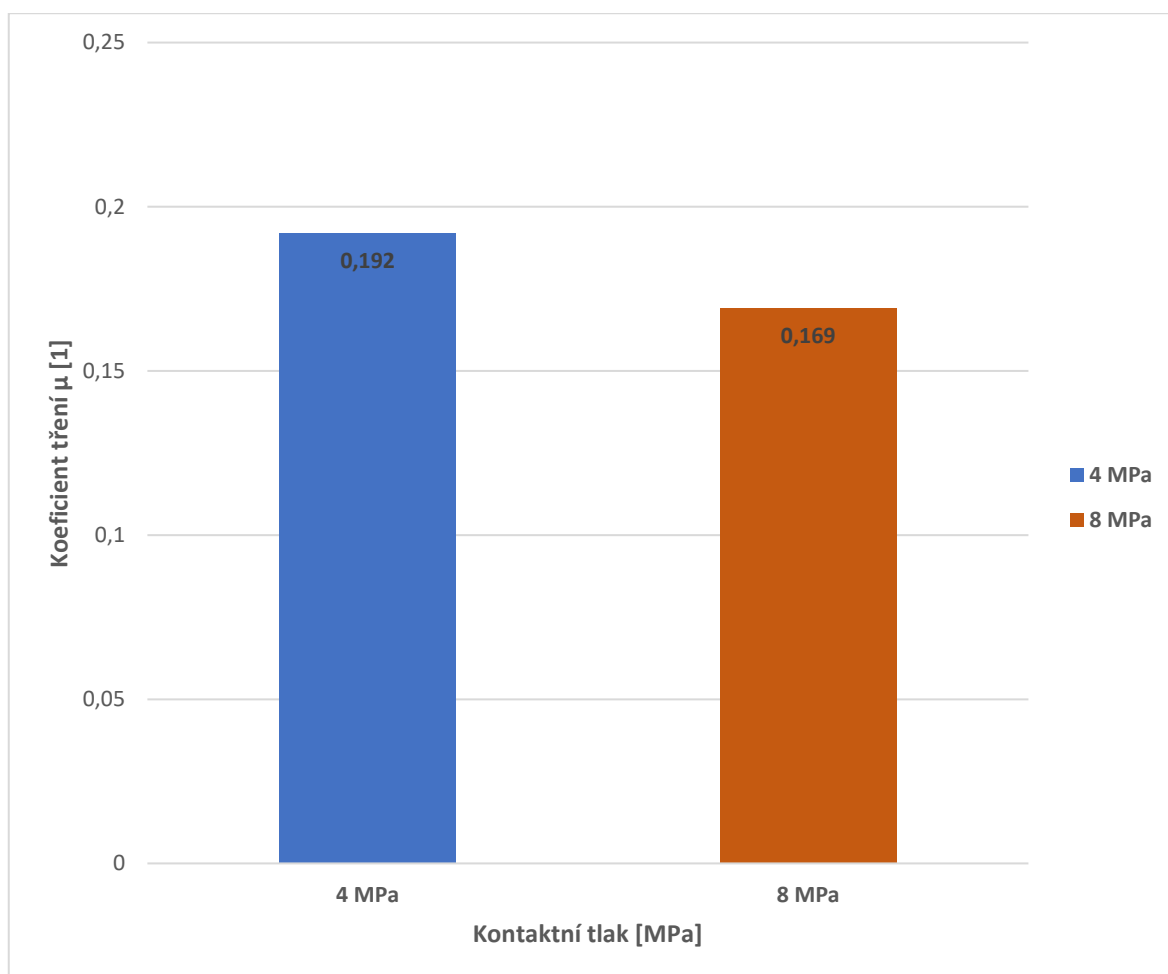
Obr. 37 Porovnání hodnot koeficientů tření pro množstvím maziva 0,5 g/m²

3.2.3 Naměřené hodnoty pro vzorek s množstvím maziva 1 g/m²

Naměřené hodnoty pro zkušební vzorky s naneseným množstvím maziva 1 g/m² jsou zaznamenány v tab. 10. Tribologické vzorky byly opět testovány také pro dva kontaktní tlaky 4 a 8 MPa. Následně jsou na obr. 38 porovnány koeficienty tření.

Tab. 10 Naměřené hodnoty tribologických sil a koeficientu tření: 1 g/m²

	Kontaktní tlak [MPa]									
	4					8				
	F _{max} [N]	F _s [N]	F _h [N]	ΔF [N]	μ [1]	F _{max} [N]	F _s [N]	F _h [N]	ΔF [N]	μ [1]
\bar{x}	4882	3826	4781	1910	0,192	9025	6248	8435	4374	0,169
s	178	133	244	254	0,009	506	347	825	975	0,015



Obr. 38 Porovnání hodnot koeficientů tření pro množstvím maziva 1 g/m²

Ukázka výstupního protokolu naměřených tribologických sil pro množství maziva 1 g/m^2 je zobrazena na obr. 39. Zde jsou přehledně znázorněny výsledky typů tribologických sil a jejich průměrné hodnoty ze všech osmi měření. Pro názornou ukázkou jsou také uvedeny dva typické grafy pro dané testování.



Technická univerzita v Liberci Katedra strojírenské technologie

Tribologie - test protahováním pásku

Vstupní hodnoty

Testované mazivo : Anticorit PL 3802-39LV

Množství maziva : $1 \pm 0,1 \text{ g/m}^2$

Testovaný substrát : HDG

Drsnost povrchu : $R_a=1,436/1,576 \mu\text{m}$ $R_{Pc}=94/83 \text{ 1/cm}$

Materiál nástroje : GGG 70L - kaleno

Kontaktní tlak : 4 - 8 MPa

Kontaktní plocha : 40 mm x 78 mm

Rychlost posuvu : 1 mm/s

Varianta : 1B

Teplota : 40°C

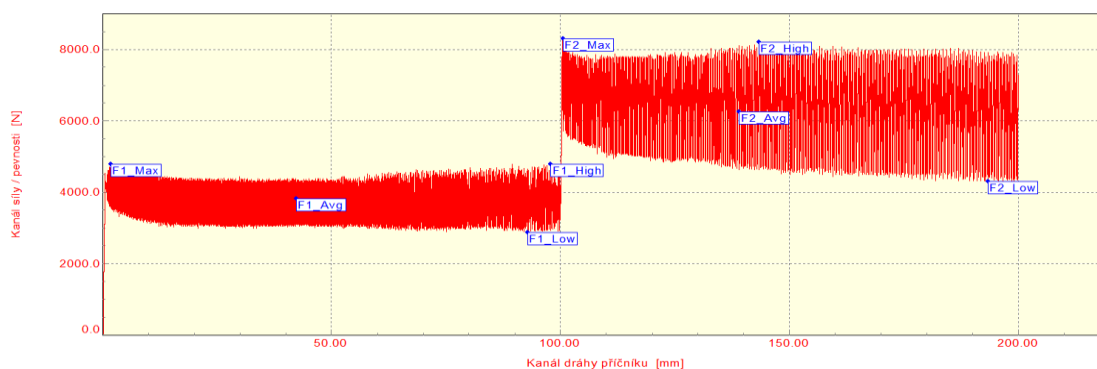
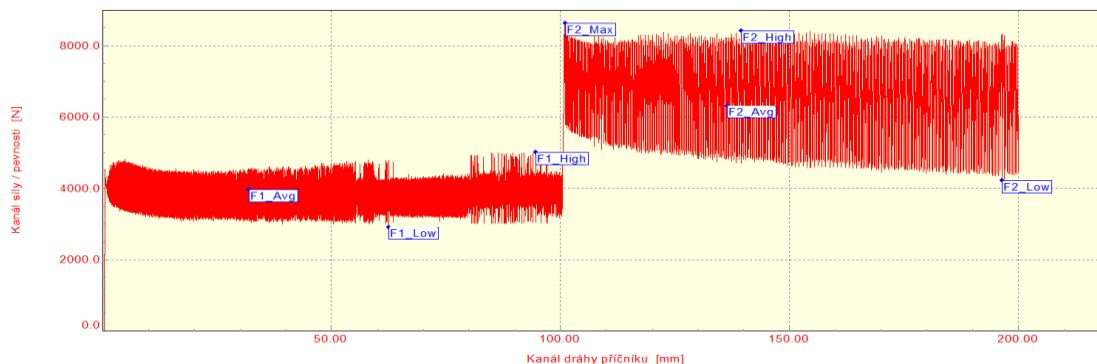
Rychlost snímání dat : 2 kHz

Měřená délka : 400 mm

Výstupní hodnoty

Zkouška	F1_Max N	F1_Avg N	F1_High N	delta_F1 N	F2_Max N	F2_Avg N	F2_High N	delta_F2 N
1	4747	3770	4747	1954	9103	5914	7686	3543
2	5008	3959	5008	2097	8617	6314	8413	4198
3	5046	3929	4957	2056	9747	6795	9747	5902
4	4778	3822	4775	1906	8299	6246	8191	3889
5	4938	3776	4715	1879	8983	5948	7768	3540
6	5127	4009	5127	2235	9628	6683	9628	5890
7	4822	3608	4485	1754	8614	5866	7692	3652
8	4594	3735	4434	1398	9209	6221	8360	4277

Statistika	F1_Max N	F1_Avg N	F1_High N	delta_F1 N	F2_Max N	F2_Avg N	F2_High N	delta_F2 N
Počet zkoušek	8	8	8	8	8	8	8	8
Průměrná hodnota	4882	3826	4781	1910	9025	6248	8435	4374
Směrodatná odchylka	178	133	244	254	506	347	825	975



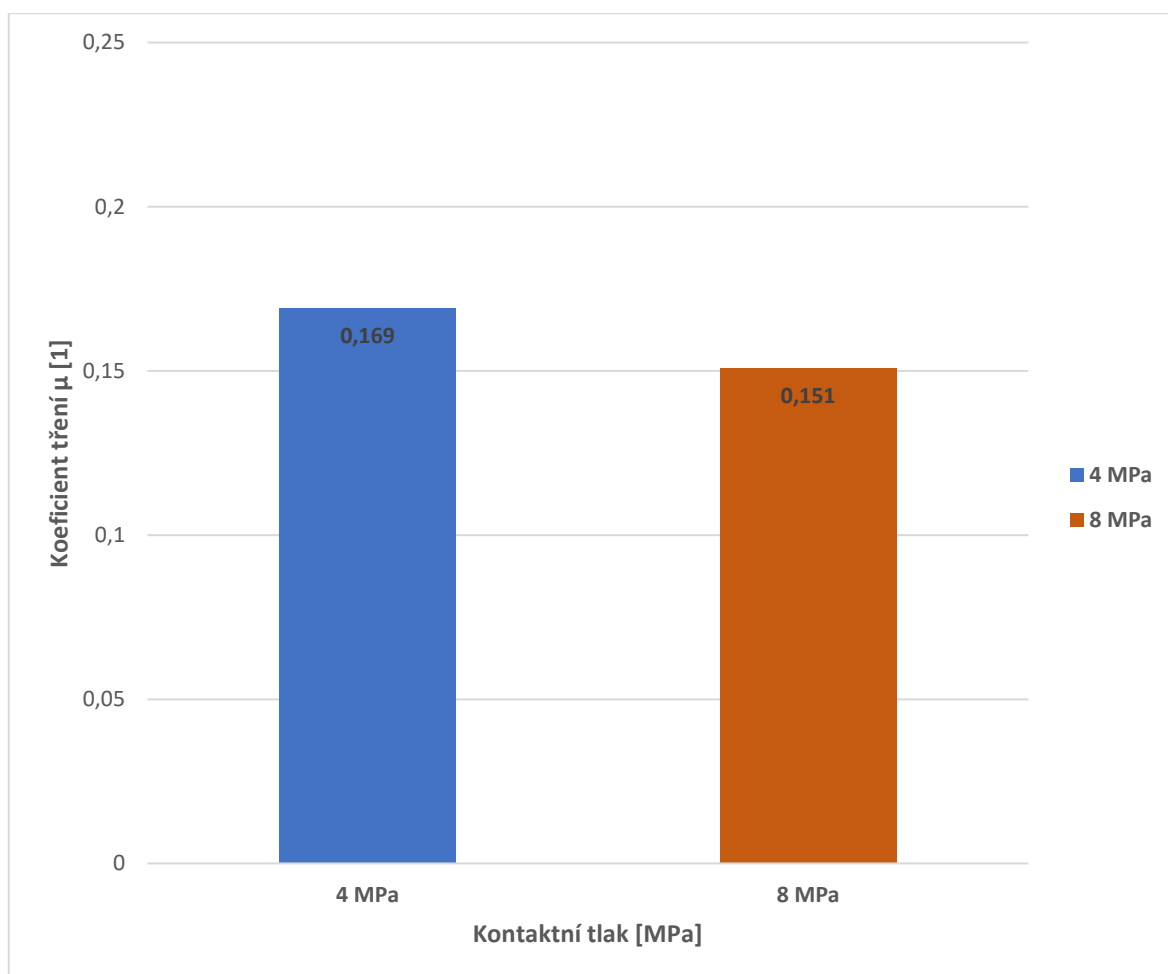
Obr. 39 Výstupní protokol změřených tribologických sil pro množstvím maziva 1 g/m^2

3.2.4 Naměřené hodnoty pro vzorek s množstvím maziva 1,5 g/m²

Naměřené hodnoty pro zkušební vzorky s naneseným množstvím maziva 1,5 g/m² jsou zaznamenány v tab. 11. Tribologické vzorky byly opět testovány také pro dva kontaktní tlaky 4 a 8 MPa. Následně jsou na obr. 40 porovnány koeficienty tření.

Tab. 11 Naměřené hodnoty tribologických sil a koeficientu tření: 1,5 g/m²

	Kontaktní tlak [MPa]									
	4					8				
	F_{max} [N]	F_s [N]	F_h [N]	ΔF [N]	μ [1]	F_{max} [N]	F_s [N]	F_h [N]	ΔF [N]	μ [1]
\bar{x}	4351	3435	4202	1534	0,169	8131	5726	7547	3642	0,151
s	173	157	274	241	0,011	364	99	375	612	0,008



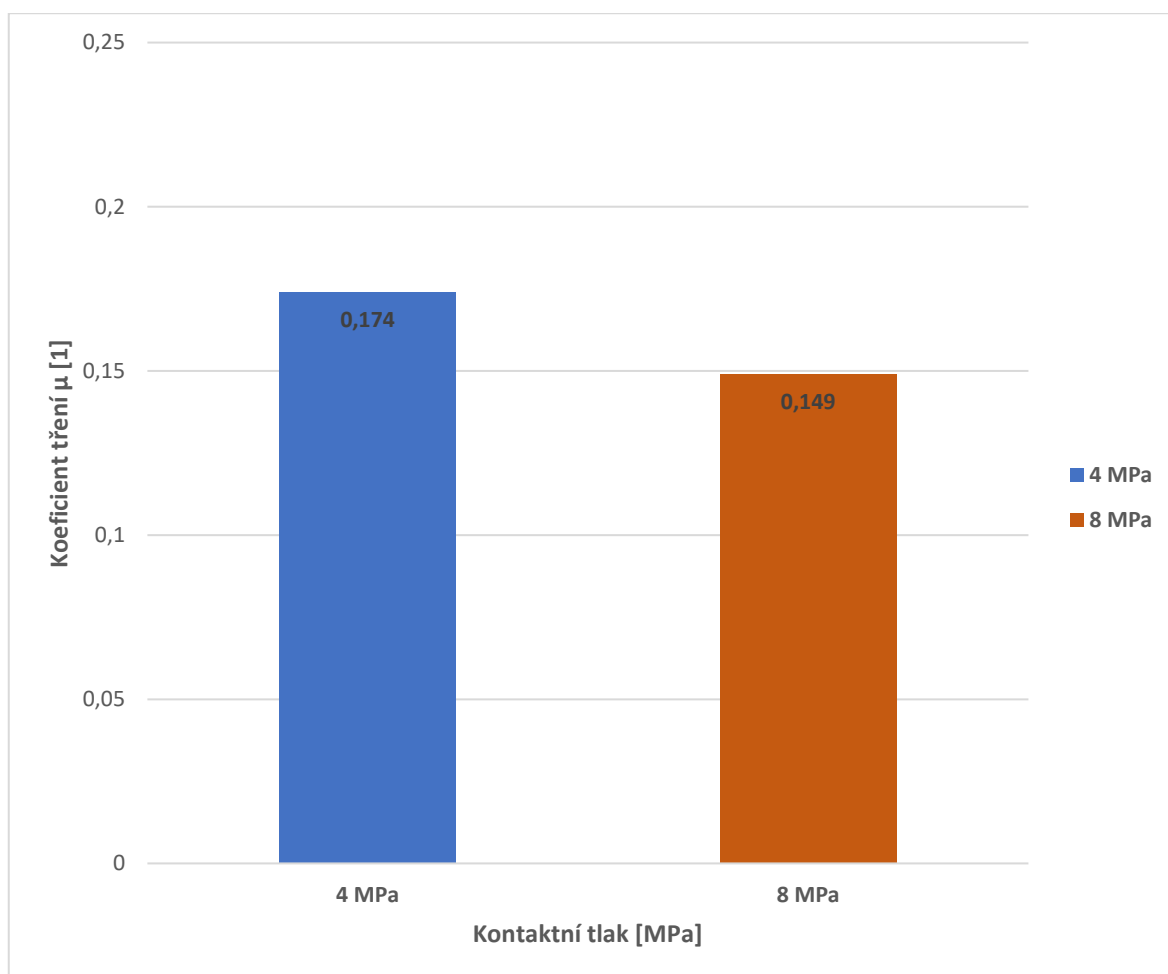
Obr. 40 Porovnání hodnot koeficientů tření pro množstvím maziva 1,5 g/m²

3.2.5 Naměřené hodnoty pro vzorek s množstvím maziva 2 g/m²

Naměřené hodnoty pro zkušební vzorky s naneseným množstvím maziva 2 g/m² jsou zaznamenány v tab. 12. Tribologické vzorky byly opět testovány také pro dva kontaktní tlaky 4 a 8 MPa. Následně jsou na obr. 41 porovnány koeficienty tření.

Tab. 12 Naměřené hodnoty tribologických sil a koeficientu tření: 2 g/m²

	Kontaktní tlak [MPa]									
	4					8				
	F _{max} [N]	F _s [N]	F _h [N]	ΔF [N]	μ [1]	F _{max} [N]	F _s [N]	F _h [N]	ΔF [N]	μ [1]
\bar{x}	4357	3462	4337	1749	0,174	7879	5622	7457	3670	0,149
s	184	133	177	101	0,007	332	165	315	555	0,006



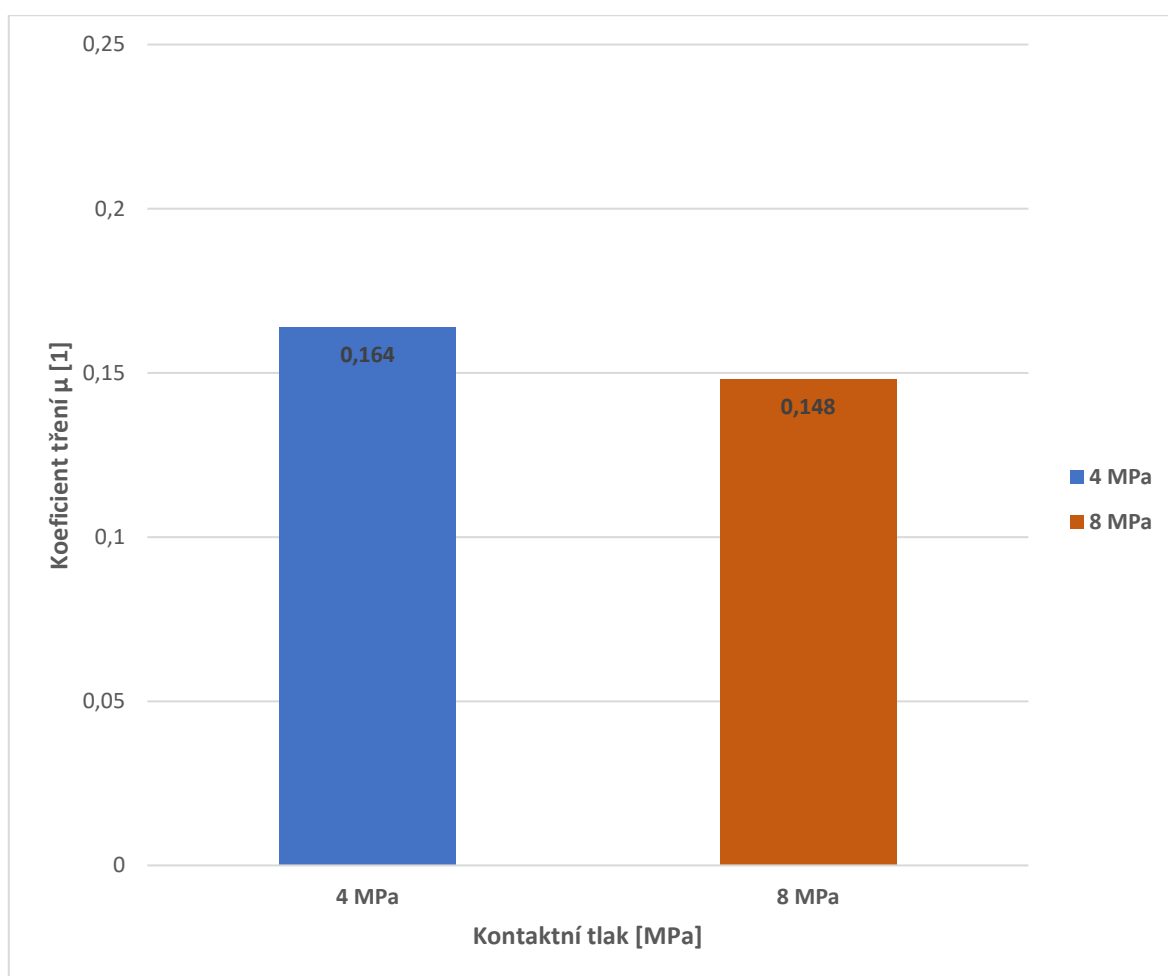
Obr. 41 Porovnání hodnot koeficientů tření pro množstvím maziva 2 g/m²

3.2.6 Naměřené hodnoty pro vzorek s množstvím maziva 2,5 g/m²

Naměřené hodnoty pro zkušební vzorky s naneseným množstvím maziva 2,5 g/m² jsou zaznamenány v tab. 13. Tribologické vzorky byly opět testovány také pro dva kontaktní tlaky 4 a 8 MPa. Následně jsou na obr. 42 porovnány koeficienty tření.

Tab. 13 Naměřené hodnoty tribologických sil a koeficientu tření: 2,5 g/m²

	Kontaktní tlak [MPa]									
	4					8				
	F_{max} [N]	F_s [N]	F_h [N]	ΔF [N]	μ [1]	F_{max} [N]	F_s [N]	F_h [N]	ΔF [N]	μ [1]
\bar{x}	4079	3310	4079	1537	0,164	7581	5609	7444	3671	0,148
s	175	109	175	146	0,007	353	234	451	484	0,009



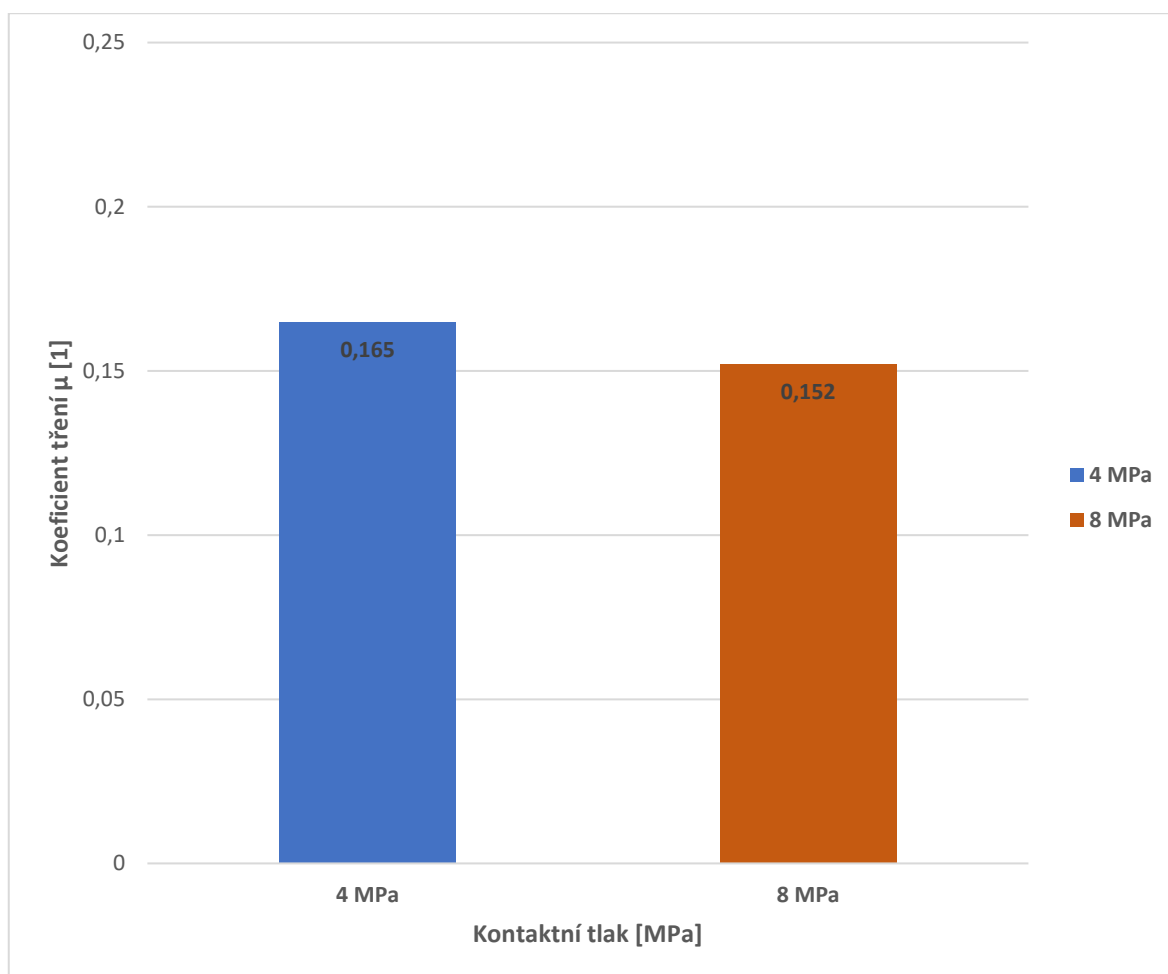
Obr. 42 Porovnání hodnot koeficientů tření pro množstvím maziva 2,5 g/m²

3.2.7 Naměřené hodnoty pro vzorek s množstvím maziva 3 g/m²

Naměřené hodnoty pro zkušební vzorky s naneseným množstvím maziva 3 g/m² jsou zaznamenány v tab. 14. Tribologické vzorky byly opět testovány také pro dva kontaktní tlaky 4 a 8 MPa. Následně jsou na obr. 43 porovnány koeficienty tření.

Tab. 14 Naměřené hodnoty tribologických sil a koeficientu tření: 3 g/m²

	Kontaktní tlak [MPa]									
	4					8				
	F _{max} [N]	F _s [N]	F _h [N]	ΔF [N]	μ [1]	F _{max} [N]	F _s [N]	F _h [N]	ΔF [N]	μ [1]
\bar{x}	4199	3323	4127	1609	0,165	7857	5577	7573	3993	0,152
s	352	154	278	256	0,011	335	258	372	286	0,008



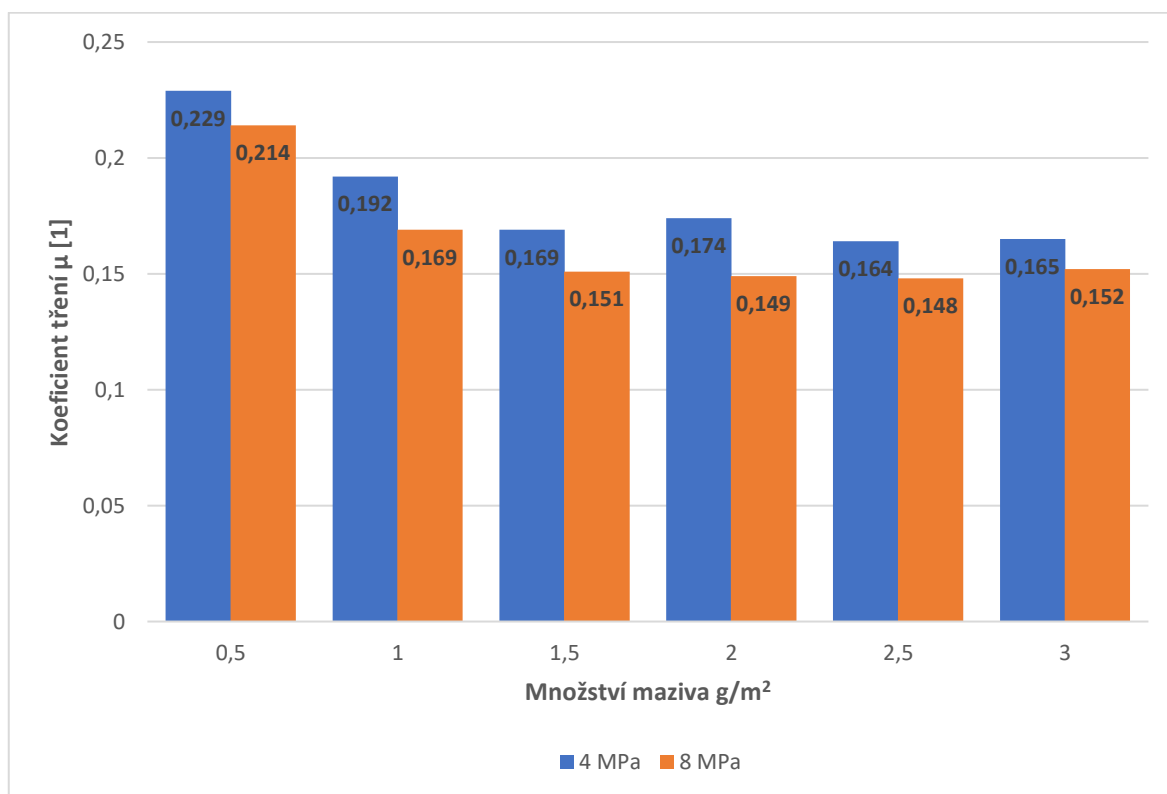
Obr. 43 Porovnání hodnot koeficientů tření pro množstvím maziva 3 g/m²

3.2.8 Porovnání výsledných naměřených hodnot

V této kapitole jsou porovnány všechny hlavní výsledky provedeného měření, zejména jsou porovnány výsledky koeficientů tření v závislosti na použitém množství maziva, které jsou uvedeny v tab. 15 a zobrazeno na obr. 44.

Tab.15 Vypočítané výsledné hodnoty koeficientů tření pro všechny zkušební vzorky

Množství maziva [g/m ²]	Kontaktní tlak [MPa]	
	4	8
	μ [1]	μ [1]
0,5	0,229	0,214
1	0,192	0,169
1,5	0,169	0,151
2	0,174	0,149
2,5	0,164	0,148
3	0,165	0,152

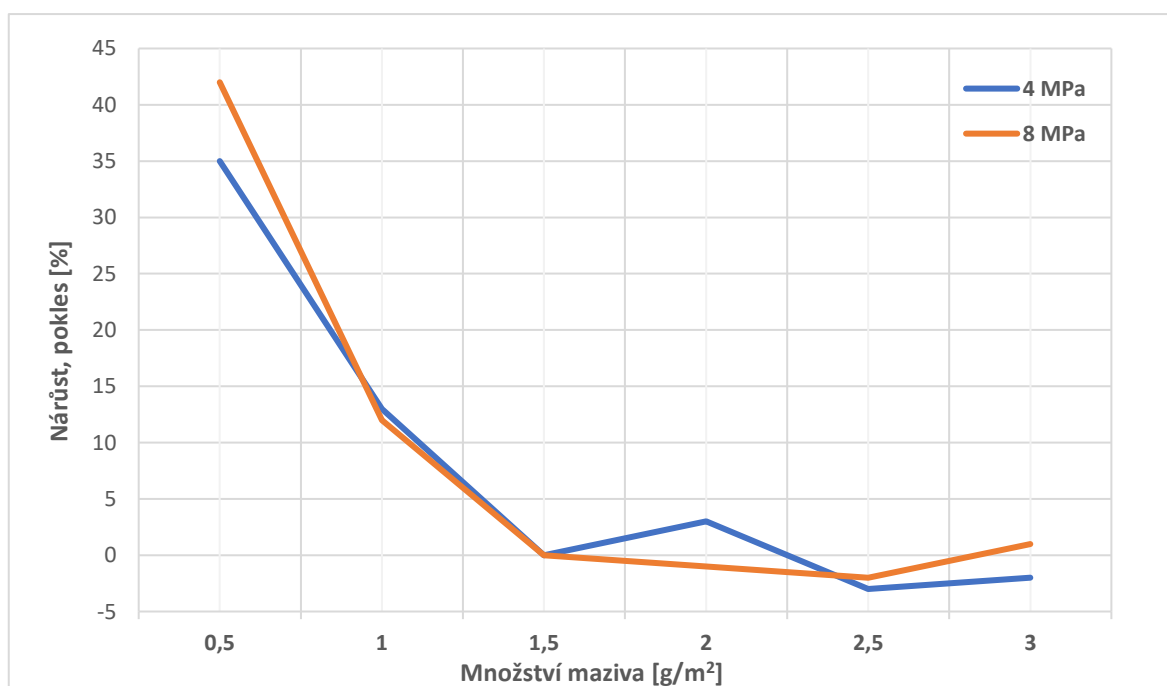


Obr. 44 Porovnání výsledných hodnot koeficientů tření

Z hlediska vzájemného porovnání byly použity hodnoty koeficientů tření pro $1,5 \text{ g/m}^2$ jako referenční (brány jako 100 %) a vůči nim byly počítány změny ostatních výsledných hodnot koeficientů tření. Hodnoty jsou přehledně uvedeny v tab. 16, kde je možné pozorovat jejich nárůst či pokles pomocí procent. Grafické vyjádření výsledných hodnot je uvedeno na obr. 45.

Tab.16 Procentuální vyjádření nárůstu a poklesu vůči referenčním hodnotám

Množství maziva [g/m ²]	Kontaktní tlak [MPa]	Koeficient tření μ [%]
0,5	4	35
	8	42
1	4	13
	8	12
1,5	4	100
	8	100
2	4	3
	8	-1
2,5	4	-3
	8	-2
3	4	-2
	8	1



Obr. 45 Grafické vyjádření nárůstů a poklesů vůči referenční hodnotě

ANOVA - vyhodnocení vlivu kontaktního tlaku a množství maziva na koeficient tření

Pro všechny hodnoty naměřených dat byla provedena analýza rozptylu (2F ANOVA) na hladině významnosti $\alpha=5\%$. Cílem analýzy rozptylu bylo zjistit, zda pro dané faktory existuje statisticky významný vliv kontaktního tlaku a zejména množství maziva na koeficient tření. Faktor 1 (F1) představoval vliv kontaktního tlaku a faktor 2 (F2) představoval vliv množství maziva. Výsledky analýzy rozptylu pro všechna použítá množství maziva od 0,5 do 3 g/m² jsou uvedeny v tab.17, ze které byly vyvozeny příslušné statistické závěry.

Z obr. 44 je patrné, že mezi mazivy o nanášeném množství od 0,5 do 1,5 g/m² je poměrně velký vliv na koeficient tření, což je graficky znázorněno v obr. 45 prudkým poklesem až k hodnotě 1,5 g/m². Od této hodnoty dochází k ustálení vlivu na koeficient tření. Z tohoto důvodu byla provedena analýza rozptylu (2F ANOVA) na hladině významnosti 5 % také pro skupiny rozdělené podle množství maziva.

První skupinu tvořily naměřená data pro množství maziva od 0,5 do 1,5 g/m². Zde byl očekáván statisticky významný vliv množství maziva na koeficient tření. Výsledky analýzy rozptylu pro použítá množství maziva od 0,5 do 1,5 g/m² jsou uvedeny v tab.18, ze které byly vyvozeny příslušné statistické závěry.

Druhou skupinu tvořila naměřená data pro množství maziva od 1,5 do 3 g/m². Zde byl důvod k předpokladu, že vliv množství maziva na změnu koeficientu tření není. Výsledky analýzy rozptylu pro použítá množství maziva od 1,5 do 3 g/m² jsou uvedeny v tab.19, ze které byly vyvozeny příslušné statistické závěry.

Tab. 17 Analýza rozptylu pro všechny použítá množství maziva od 0,5 do 3 g/m²

Faktor	p – hodnota	F	F _{krit}	Statisticky významný vliv
F1 - Kontaktní tlak	2,8·10 ⁻¹⁰	51,4	4	MÁ
F2 - Množství maziva	6,6·10 ⁻²⁸	67,3	2,3	MÁ
F1-F2 - Interakce	0,8	0,5	2,3	NEMÁ

Závěry vyplývající z analýzy rozptylu (2F ANOVA) podle tab.17:

1) Faktor F1 – vliv kontaktního tlaku

Z hlediska výsledku analýzy rozptylu na hladině významnosti 5 % **má kontaktní tlak statisticky významný vliv** na změnu koeficientu tření μ .

2) Faktor F2 – vliv množství maziva

Z hlediska výsledku analýzy rozptylu na hladině významnosti 5 % **má množství maziva statisticky významný vliv** na změnu koeficientu tření μ .

3) Faktor F1-F2 – vliv interakcí kontaktního tlaku a množství maziva

Z hlediska výsledku analýzy rozptylu na hladině významnosti 5 % **nemá interakce kontaktního tlaku a množství maziva statisticky významný vliv** na změnu koeficientu tření μ .

Tab. 18 Analýza rozptylu pro použité množství maziva od 0,5 do 1,5 g/m²

Faktor	p – hodnota	F	F _{krit}	Statisticky významný vliv
F1 - Kontaktní tlak	1,1·10 ⁻⁴	18,2	4,1	MÁ
F2 - Množství maziva	5,1·10 ⁻¹⁴	69	3,2	MÁ
F1-F2 - Interakce	0,8	0,2	3,2	NEMÁ

Závěry vyplývající z analýzy rozptylu (2F ANOVA) podle tab.18:

1) Faktor F1 – vliv kontaktního tlaku

Z hlediska výsledku analýzy rozptylu na hladině významnosti 5 % **má kontaktní tlak statisticky významný vliv** na změnu koeficientu tření μ .

2) Faktor F2 – vliv množství maziva

Z hlediska výsledku analýzy rozptylu na hladině významnosti 5 % **má množství maziva statisticky významný vliv** na změnu koeficientu tření μ .

3) Faktor F1-F2 – vliv interakcí kontaktního tlaku a množství maziva

Z hlediska výsledku analýzy rozptylu na hladině významnosti 5 % **nemá interakce kontaktního tlaku a množství maziva statisticky významný vliv** na změnu koeficientu tření μ .

Tab. 19 Analýza rozptylu pro použité množství maziva od 1,5 do 3 g/m²

Faktor	p – hodnota	F	F _{krit}	Statisticky významný vliv
F1 - Kontaktní tlak	2,6·10 ⁻¹⁰	59	4	MÁ
F2 - Množství maziva	0,4	1	2,8	NEMÁ
F1-F2 - Interakce	0,3	1,1	2,8	NEMÁ

Závěry vyplývající z analýzy rozptylu (2F ANOVA) podle tab.19:

1) Faktor F1 – vliv kontaktního tlaku

Z hlediska výsledku analýzy rozptylu na hladině významnosti 5 % **má kontaktní tlak statisticky významný vliv** na změnu koeficientu tření μ .

2) Faktor F2 – vliv množství maziva

Z hlediska výsledku analýzy rozptylu na hladině významnosti 5 % **nemá množství maziva statisticky významný vliv** na změnu koeficientu tření μ .

3) Faktor F1-F2 – vliv interakcí kontaktního tlaku a množství maziva

Z hlediska výsledku analýzy rozptylu na hladině významnosti 5 % **nemá interakce kontaktního tlaku a množství maziva statisticky významný vliv** na změnu koeficientu tření μ .

Při celkovém zhodnocení získaných dat z daného výzkumu s pomocí analýzy rozptylu (2F ANOVA) se zjistilo, že kontaktní tlak **má** statisticky významný vliv na hladině významnosti 5 % na koeficient tření. Tento předpoklad byl očekáván a prostřednictvím analýzy rozptylu na hladině významnosti 5 % byl i potvrzen. Nicméně hlavním zkoumaným faktorem v experimentální části této diplomové práce byl vliv množství maziva na změnu koeficientu tření. Z vyhodnocení tohoto faktoru (faktor 2) lze tvrdit, že z celkového hlediska hodnocení má statisticky významný vliv na dané hladině významnosti 5 %. Nicméně se zdá, že je výhodné rozdělit množství maziva na dvě skupiny.

V první skupině byla vyhodnocována získaná data pomocí analýzy rozptylu (2F ANOVA) na hladině významnosti 5 % pro množství maziva od 0,5 do 1,5 g/m². Na základě těchto získaných dat je závěr takový, že **množství maziva od 0,5 do 1,5 g/m² má statisticky významný vliv** na koeficient tření, což potvrzuje předešlý předpoklad.

V druhé skupině byla vyhodnocována získaná data pomocí analýzy rozptylu (2F ANOVA) na hladině významnosti 5 % pro množství maziva od 1,5 do 3 g/m². Na základě těchto získaných dat je závěr takový, že **množství maziva od 1,5 do 3 g/m² nemá statisticky významný vliv** na koeficient tření, což opět potvrzuje předešlý předpoklad.

Celkové vyhodnocení analýzy rozptylu (2F ANOVA) na hladině významnosti 5 % pro sledovaný parametr koeficientu tření je přehledně uvedeno v tab. 20.

Tab. 20 Vyhodnocení analýzy rozptylu pro sledovaný parametr koeficientu tření

	Množství maziva [g/m²]	Faktor	Statisticky významný vliv
Koeficient tření μ [1]	0,5 – 1,5	F1 – Kontaktní tlak	MÁ
		F2 – Množství maziva	MÁ
		F1-F2 – Interakce	NEMÁ
	1,5 – 3	F1 – Kontaktní tlak	MÁ
		F2 – Množství maziva	NEMÁ
		F1-F2 – Interakce	NEMÁ
	0,5 – 3	F1 – Kontaktní tlak	MÁ
		F2 – Množství maziva	MÁ
		F1-F2 – Interakce	NEMÁ

4 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo experimentálně stanovit vliv množství maziva na velikost koeficientu tření. Hlavním cílem tohoto výzkumu bylo ověření předpokladu, zdali při použití většího množství maziva dochází ke snížení koeficientu tření. K ověření této skutečnosti bylo tedy nutné zjistit, zda má množství maziva významný vliv na koeficient tření. Z praxe je všeobecně známo, že při daných procesech se používá spíše většího množství průmyslového maziva, než je pro daný proces potřeba, což vede ke zbytečnému plýtvání a ke zbytečnému zvyšování nákladů.

Daná tribologická zkouška protahováním pásku probíhala na testovacím zařízení Sokol 400 podle metody označované jako 1B a při konstantní teplotě 40°C a konstantní rychlosti posuvu 1 mm/s. Za proměnné parametry byly dle zadání považovány hodnoty kontaktního tlaku 4 a 8 MPa a zejména různé množství maziva od 0,5 do 3 g/m². Testováním zkušebního pásku na testovacím zařízení Sokol 400 byly zjištěny hodnoty pro dané typy tribologických sil a byl vypočítán příslušný koeficient tření. Výsledné hodnoty byly vyhodnoceny do příslušných grafů a tabulek. Testovaným mazivem byl Anticorit PL 3802-39 LV od firmy Fuchs. Pakliže byla vyhodnocena celá škála množství daného maziva, statisticky významný vliv na hladině významnosti 5 % vyšel statisticky významný. Nicméně při rozdělení množství maziva do dvou skupin, statisticky významný vliv na hladině významnosti 5 % vyšel pouze pro množství maziva od 0,5 do 1,5 g/m². Pro množství maziva od 1,5 do 3 g/m² vyšlo, že zde statisticky významný vliv na hladině významnosti 5 % není. Analýza rozptylu (2F ANOVA) tedy potvrdila, že při nanášení množství maziva od 1,5 g/m² výše už nemá množství maziva statisticky významný vliv na změnu koeficientu tření.

Vzhledem k přihlídnutí na výsledky tribologické zkoušky protahováním pásku lze předpokládat, že při normálním procesu není potřeba užívat příliš velké množství maziva (cca od 1,5 g/m²), jelikož dále nedochází ke snižování hodnoty koeficientu tření. Samozřejmě každý proces může vykazovat specifické sounáležitosti, kde bude potřeba aplikovat větší množství maziva např. na kritická místa. Nesmí však být opomenuto, že užitím většího množství maziva sebou nese řadu problémů, jako např. vytékání maziva mimo určenou pracovní plochu, zanešení nástrojů mazivem apod. S ohledem na možná doporučení pro další výzkum v této oblasti lze doporučit rozšíření tohoto typu testování i s jinými typy maziv, rychlostí posuvu a popř. s jinou teplotou čelistí.

5 Seznam použité literatury

- [1] BHUSHAN, Bharat. *Introduction to Tribology*. B.m.: John Wiley & Sons, 2013. ISBN 1-118-40322-3
- [2] LUDEMA, Kenneth C. *Friction, Wear, Lubrication: A textbook in Tribology*. Boca Raton: CRC Press, 1996. ISBN isbn978-0-8493-2685-1.
- [3] TOTTEN, George. *Handbook of lubrication and tribology*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2006. ISBN isbn978-0-8493-2095-8.
- [4] STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. *Engineering tribology*. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN isbn978-0-12-397047-3.
- [5] ASM INTERNATIONAL, Howard KUHN a ASM INTERNATIONAL, ed. *Mechanical testing and evaluation*. [11. ed.], 1. print. Materials Park, Ohio: ASM International, 2000. ASM handbook, prepared under the direction of the ASM International Handbook Committee; Vol. 8. ISBN 978-0-87170-389-7.
- [6] MANG, Theo, ed. *Lubricants and lubrication*. 2., completely rev. and extended ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2007. ISBN 978-3-527-31497-3.
- [7] TSCHÄTSCH, Heinz. *Metal forming practise: processes, machines, tools*. Berlin: Springer, c2006. ISBN 978-3-540-33216-9.
- [8] HELEBRANT, František, ZIEGLER, Jiří a MARASOVÁ, Daniela. *Technická diagnostika a spolehlivost*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2001. 155 s. ISBN 80-7078-883-6.
- [9] BLAŠKOVIČ, Pavel, BALLA, Jozef a DZIMKO, Marián. *Tribológia*. Bratislava: Alfa, 1990. Edícia strojárскеj literatúry. 360 s. ISBN 80-05-00633-0.
- [10] MANG, Theo, BOBZIN, Kirsten a BARTELS, Thorsten. *Industrial tribology: tribosystems, friction, wear and surface engineering, lubrication*. Weinheim: Wiley-VCH, c2011. 672 s. ISBN 978-3-527-32057-8.
- [11] [Ukázka přesunu sochy v Egyptě]. In: *Sci-news.com* [online]. © 2014. [cit. 2021-03-23]. Dostupné na:
<http://www.sci-news.com/physics/science-ancient-egyptians-wet-sand-01894.html>



- [12] [Názorná ukázka kola z Mezopotámie]. In: *sumeriancivilizationhonors.weebly.com* [online]. [cit. 2021-03-23]. Dostupné na: <https://sumeriancivilizationhonors.weebly.com/accomplishments-and-inventions.html>
- [13] Mistrova touha vzlétnout: Leonardo da Vinci a jeho létající stroje. In: *Stoplusjednicka.cz* [online]. © 2019. [cit. 2021-03-23]. Dostupné na: <https://www.stoplusjednicka.cz/mistrova-touha-vzletnout-leonardo-da-vinci-jeho-letajici-stroje>
- [14] Tribometer Leonarda Da Vinci. In: *Tribonet.org* [online]. [cit. 2021-03-23]. Dostupné na: <https://www.tribonet.org/tribometer/leonardo-da-vinci-4/>
- [15] BEČKA, Jan. *Tribologie*. Praha: České vysoké učení technické, 1997. 212 s. ISBN isbn80-01-01621-8.
- [16] REICHL, Jaroslav a VŠETEČKA, Martin. Smykové tření. In: *fyzika.jreichl.com* [online]. © 2006-2021. [cit. 2021-03-23]. Dostupné na: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/36-smykove-treni>
- [17] VINŠ, Jindřich. *Kluzná ložiska*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965. 220 s. ISBN 04-209-65.
- [18] CORTÉS GUTIÉRREZ, Jairo A. *Tribometer Set-up and Friction Coefficient in Elastomers of Sealing Systems* [online]. Torino: Politecnico di Torino, Collegio di Ingegneria Informatica, del Cinema e Meccatronica Department of Control and Computer Engineering, 2014, 150. Diplomová práce. Vedoucí práce prof. Luigi Mazza a prof. Guido Belforte. Dokument ve formátu pdf dostupný na: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/16508/CortesGutierrezJairoAlejandro2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [19] Měření struktury povrchu. In: *accretech.eu* [online]. © 2019. [cit. 2021-03-23]. Dostupné na: <https://www.accretech.eu/cs/mereni-struktury-povrchu/>

[20] Parametry drsnosti povrchu. In: *klz.inshop.cz* [online]. [cit. 2021-03-23]. Dokument ve formátu pdf dostupný na:

<https://www.klz.inshop.cz/inshop/files/6910431/Parametry%20drsnosti%20Mahr-NEW.pdf>

[21] *Tření, mazání, opotřebení* [online]. Brno: Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, Ústav konstruování [cit. 2021-03-23]. Dokument ve formátu pdf dostupný na:

<http://www.fsiforum.cz/upload/soubory/databaze-predmetu/5KS/prednasky/prednaska4.pdf>

[22] Slitiny. In: *ped.muni.cz* [online]. [cit. 2021-03-23]. Dostupné na:

<https://www.ped.muni.cz/wphy/fyzv1a/fmkomplet2.htm>

[23] JUPPA, J. *Vliv deformace na změnu tribologických vlastností plechu s povrchovou ochrannou vrstvou Zn-Mg*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2013. 58 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

[24] ŽIVNŮSTKOVÁ, I. *Vliv stékání maziv u karosářských plechů na vlastnosti lepeného spoje*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. 54 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce Ing. Pavel Hisem, Ph.D. Dokument ve formátu pdf dostupný na:

https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/2336/bc_13109.pdf?sequence=1

[25] ŠTĚPINA, Václav a VESELÝ, Václav. *Maziva v tribologii: celoštátní vysokoškolská příručka pro vysoké školy technické*. Bratislava: Veda, 1985. 408 s. ISBN 71-059-85.

[26] Rozdělení ocelí pro automobilový průmysl. In: *workswell.cz* [online].

[cit. 2021-03-26]. Dostupné na:

<https://workswell.cz/rozdeleni-oceli-pro-automobilovy-prumysl/>