

Analýza tribologických vlastností nové generace maziv používaných v automobilovém průmyslu

Bakalářská práce

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

Autor práce:

Radek Tvrzník

Vedoucí práce:

Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce:

doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie





Zadání bakalářské práce

Analýza tribologických vlastností nové generace maziv používaných v automobilovém průmyslu

Jméno a příjmení: Radek Tvrzník
Osobní číslo: S19000134
Studijní program: B0715A270008 Strojírenství
Zadávací katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: 2021/2022

Zásady pro vypracování:

1. Význam tribologických procesů při tváření kovů (druhy tření, používaná maziva a způsob nanášení na povrch, atd.)
2. Metody tribologického hodnocení maziv a ochranných povlaků plechů
3. Experimentální zjištění tribologických vlastností nové generace maziv používaných v automobilovém průmyslu (tribologická zkouška protahováním pásku)
4. Statistické vyhodnocení naměřených dat
5. Závěr

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

obrázky, tabulky, grafy
cca 30 stran textu
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. Engineering tribology. Fourth edition. Oxford: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN 978-0-12-397047-3.
- [2] TOTTEEN, 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.
- [3] MANG, Theo, ed. Lubricants and lubrication. 2., completely rev. and extended ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2007. ISBN 978-3-527-31497-3.
- [4] TULKA, Jaromír. Povrchové úpravy materiálů. B.m.: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2005. ISBN 978-80-214-3062-4.
- [5] NEUBAUER, Jiří, Marek SEDLAČÍK a Oldřich KŘÍŽ. Základy statistiky: aplikace v technických a ekonomických oborech. Praha: Grada, 2016. ISBN 978-80-247-5786-5.

Vedoucí práce:

Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce:

doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce:

30. listopadu 2021

Předpokládaný termín odevzdání:

30. května 2023

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

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

V Liberci dne 30. listopadu 2021

Prohlášení

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

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou 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 bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou 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 bakalářská 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.

12. března 2022

Radek Tvrzník

Analýza tribologických vlastností nové generace maziv používaných v automobilovém průmyslu

Anotace

Bakalářská práce se zabývá analýzou tribologických vlastností maziva nové generace pomocí tribologické zkoušky protahováním pásku. Jedná se o porovnávání vlastností nově vyvinutého maziva s mazivem aktuálně používaným ve výrobě. Teoretická část se zaměřuje na tribologii, tření, druhy tření, maziva a druhy používaných maziv, tribologické zkoušky a povrchové úpravy plechů. V experimentální části byla provedena tribologická zkouška protahováním pásku na testovacím zařízení SOKOL 400. Zkouška byla prováděna pro každý olej dvěma různými rychlostmi posuvu a s diskrétně se zvyšujícím kontaktním tlakem. Naměřené hodnoty tribologických sil byly zpracovány do tabulek a grafů. Z maximální síly v ustálené oblasti byly vypočítány koeficienty tření sloužící k porovnání obou olejů. Pro ověření statisticky významného či nevýznamného vlivu použitého oleje a velikosti kontaktního tlaku byla provedena dvoufaktorová statistická analýza rozptylu. Výsledky a poznatky z experimentální části jsou shrnuty v závěru.

Klíčová slova: tribologie, tření, maziva, kontaktní tlak, ANOVA

Analysis of tribological properties of a new generation of lubricants used in the automotive industry

Annotation

This bachelor thesis deals with the analysis of tribological properties of a new generation lubricant through the tribological strip drawing test. This involves comparing the properties of the newly developed lubricant with the lubricant currently used in production. The theoretical part focuses on tribology, friction, types of friction, lubricants and types of used lubricants, tribological tests and surface treatments of sheet metal. In the experimental part, tribological testing was carried out by strip drawing test on a testing device SOKOL 400. The test was performed for each oil using two different feed rates and with a discreetly increasing contact pressure. The measured values of the tribological forces were summarised with the help of graphs and tables. From the maximum force in the steady-state region, friction coefficients were calculated to compare the two lubricants. In order to verify the statistically significant or insignificant influence of the lubricant used and the magnitude of the contact pressure, a two-factor statistical analysis of variance was carried out. The results and findings of the experimental part are summarized in the conclusion.

Key Words: Tribology, Friction, Lubricants, Contact Pressure, ANOVA

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. et Bc. Jiřímu Sobotkovi, Ph.D. nejen za odborné vedení a poskytnutí cenných rad pro zpracování bakalářské práce, ale též za trpělivost při konzultacích a veškerý mně věnovaný čas. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za umožnění studia na vysoké škole, jejich neustálou podporu a ohleduplnost. Zároveň bych chtěl poděkovat svému kolegovi Jakubovi Bittnerovi za veškerou pomoc a oporu při mém bakalářském studiu.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk.....	8
1 Úvod.....	9
2 Teoretická část.....	10
2.1 Tribologie.....	10
2.2 Tření.....	11
2.2.1 Druhy tření.....	15
2.3 Maziva.....	20
2.3.1 Druhy maziv.....	20
2.4 Tribologické zkoušky.....	24
2.5 Povrchové úpravy.....	28
3 Experimentální část.....	29
3.1 Příprava vzorků pro měření.....	29
3.2 Parametry tribologické zkoušky.....	31
3.3 Postup měření oleje 1.....	33
3.4 Postup měření oleje 2.....	41
3.5 Porovnání naměřených dat.....	42
3.6 Statistické vyhodnocení naměřených dat.....	46
4 Závěr.....	48
5 Seznam použité literatury.....	49

Seznam použitých symbolů a zkratek

Označení	Jednotky	Význam
F	[N]	Síla
F_a	[N]	Výsledná zrychlující síla
F_C	[N]	Třecí síla za pohybu (Coulombovo tření)
F_h	[N]	Maximální síla v „ustálené“ oblasti
F_{max}	[N]	Maximální síla
F_N	[N]	Normálová síla
F_p	[N]	Brzdící síla
F_s	[N]	Průměrná síla v „ustálené“ oblasti
F_T	[N]	Tažná síla
F_{Ts}	[N]	Třecí síla za klidu
F_v	[N]	Viskózní třecí síla
F_{v0}	[N]	Posouvající síla
m	[kg]	Hmotnost
p	[MPa]	Kontaktní tlak
S	[mm ²]	Kontaktní plocha
v	[m/s]	Rychlost posuvu
\dot{x}	[m/s]	Rychlost
ΔF	[N]	Rozdíl max. a min. síly v „ustálené oblasti“
μ	[1]	Koeficient tření
μ_k	[1]	Dynamický koeficient tření
μ_s	[1]	Statický koeficient tření
μ_v	[1]	Koeficient viskózního tření

1 Úvod

Automobilový průmysl je jedním z nejproduktivnějších průmyslových odvětví nejen v České republice, ale i na celém světě. Výrobci aut se snaží zachovat si konkurenceschopnost a tak požadavky na zefektivnění výroby stále rostou. Je potřeba snižovat výrobní náklady, proto jsou často využívány netřískové metody výroby, jako je např. tažení a lisování. Tyto metody poskytují automatizovanou výrobu s maximálním využitím materiálu.

U těchto technologií hraje podstatnou roli tření, proto je nutné zvolit správné mazivo, které ztráty třením minimalizuje, sníží opotřebení nástrojů a výrobků a ušetří celkové množství energie (síly) potřebné k tváření. Zajištěním správných třecích podmínek se zmenšuje počet zmetků ve výrobě a také poruchovost strojů, čímž lze zefektivnit výrobu v řádu desítek procent. V současné době je vyvíjeno velké množství nových maziv, jež je nutné před nasazením do výroby analyzovat vhodným experimentem simulující reálné podmínky při tváření. Takováto analýza byla předmětem předložené bakalářské práce, kdy bylo testováno mazivo nové generace před nasazením do výroby, a zároveň bylo porovnáváno s aktuálně používaným mazivem.

V experimentální části této bakalářské práce tedy byla provedena analýza dvou maziv označovaných jako olej 1 (referenční) a olej 2 (nová generace) pomocí tribologické zkoušky protahováním pásku. Testovaným materiálem byl plech z hlubokotažné oceli s povrchovou úpravou žárového pozinkování HDG, který je běžně používaný v automobilovém průmyslu. Během zkoušky byla měřena síla potřebná k protažení pásku namazaného daným olejem. Následně byl vypočítán koeficient tření, který byl podroben statistické analýze rozptylu k určení statisticky významného nebo statisticky nevýznamného vlivu druhu použitého oleje. Cílem bylo zjistit, zdali je z tribologického hlediska mazivo nové generace vhodnější než mazivo v současnosti používané.



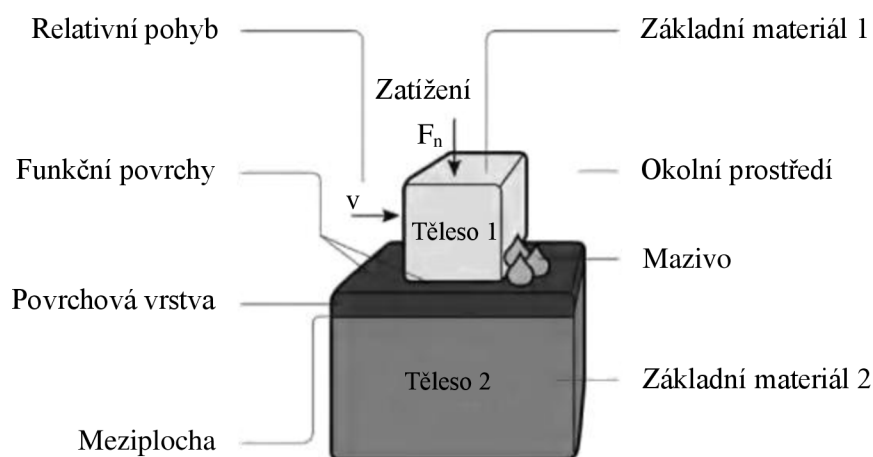
Obr. 1 Testovací pásek před a po zkoušce

2 Teoretická část

Teoretická část této bakalářské práce se zaměřuje na vědní obor tribologie, jež se zabývá problematikou tření, mazání a testování těchto jevů. V poslední kapitole teoretické části jsou popsány povrchové úpravy, které se často využívají v automobilovém průmyslu.

2.1 Tribologie

Tribologie je mezioborová věda, jež se zabývá procesy tření, opotřebení a mazání. Zkoumá problematiku styku při vzájemném pohybu nebo při pokusu o vzájemný pohyb. Tento pohyb může mít charakteristiku pohybu valivého, kluzného, nárazového nebo kmitavého. V praxi se často vyskytuje kombinace dvou i více druhů pohybů najednou.



Obr. 2 Schéma základního tribologického systému [1]

Tribologie není nový vědní obor, neboť s problematikou tření se lidstvo setkává už od pravěku – např. rozdělování ohně třením dřívěk o sebe. Dalším příkladem může být přesouvání těžkých kamenných kvádrů potřebných pro stavbu pyramid v Egyptě nebo také vynalezení kola v Mezopotámii a s ním spojené valivé tření.

Tření způsobuje mnoho negativních vlivů na stroje, strojní součásti a technické procesy. Tribologie má tedy velký vliv na zvyšování jejich účinnosti [2–7].

Problematikou tření, mazání a opotřebení se v dnešní době zabývá hlavně automobilový a letecký průmysl. „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 zvolený způsob mazání a zanedbání vlivu

okolí, či nevhodná volba třecích dvojic“ [4]. Je tedy důležité problematice tření porozumět a správně aplikovat tribologické zásady pro zvýšení spolehlivosti a životnosti [4].

2.2 Tření

Tření je přírodní jev, který vzniká vzájemným relativním pohybem dvou dotýkajících se ploch tribologického systému – viz obr. 2. Podle nové obecné definice je tření definováno jako ztráta mechanické energie v průběhu, na začátku nebo při ukončení relativního pohybu navzájem dotýkajících se materiálových oblastí.

Při procesu tváření nikdy nelze dosáhnout rovinnosti stykových ploch nástroje a tvářeného materiálu. Styk se ve skutečnosti realizuje pomocí mikronerovností, které jsou během tváření deformovány, ustříhávány a vylamovány.

Tření při tváření je většinou nežádoucí efekt, který má za následek zvýšení spotřeby energie nezbytné na deformační procesy, zabránění rozvoje deformace a způsobuje opotřebení nástroje. Nicméně, v některých tvářecích procesech lze tření také využít pro přidržování či jako zdroj tepla [2, 5, 7].

Základní a klasický model tření

Leonardo da Vinci (1519) nastínil jako první zákony tření. Pozoroval, že třecí síla nezávisí na velikosti stykové plochy a je přímo úměrná zatěžující normálové síle. Domníval se, že koeficient tření závisí na charakteristikách kontaktní plochy a je konstantní. Ve skutečnosti je koeficient tření závislý na druhu materiálů, jakosti povrchu, čase, teplotě, třecím prostředí, rychlosti tření a dalších parametrech. Třecí síla působí proti směru pohybu tělesa (viz obr. 3) a výsledná zrychlující síla je rovna vzorci 2.1 [4, 8].

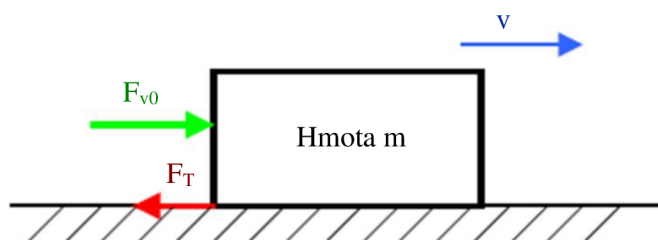
$$F_a = F_{v0} - F_T \quad (2.1)$$

Kde značí:

F_a výsledná zrychlující síla [N]

F_{v0} ... posouvající síla [N]

F_T třecí síla [N]



Obr. 3 Model tření Da Vinci [8]

Charles-Augustin de Coulomb v roce 1785 formuloval koncept suchého, resp. Coulombova tření, kdy třecí síla je konstantní a nezávislá na rychlosti [4, 8].

$$F_C = \mu_k * F_N \quad (2.2)$$

Kde značí:

F_C třecí síla za pohybu (Coulombovo tření) [N]

F_N normálová síla (kolmá k povrchu) [N]

μ_k dynamický koeficient tření [1]

Arthur Jules Morin (1833) uvedl, že kromě suchého tření existuje ještě prahová třecí síla. Tato síla se vyskytuje, pokud je těleso v klidu a musí být překonána před uvedením tělesa do pohybu. Tření je přenášeno mikronerovnostmi, ve kterých vznikají velké lokální tlaky způsobující plastické deformace. Vlivem velkých tlaků se tvoří adhezní spoje, tzv. mikrosvary. Pro uvedení nenamazaného tělesa do pohybu je tak potřeba přesmýknout tyto mikrosvary právě prahovou třecí silou F_{Ts} [4, 8].

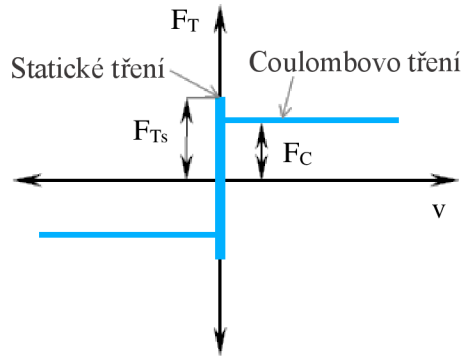
$$F_{Ts} = \mu_s * F_N \quad (2.3)$$

Kde značí:

F_{Ts} ... třecí síla za klidu [N]

μ_s statický koeficient tření ($\mu_s > \mu_k$) [1]

Tato síla v kombinaci s Coulombovým třením tvoří tzv. základní model tření – viz obr. 4.



Obr. 4 Základní model tření [8]

Osborne Reynolds (1866) základnímu modelu tření přispěl svojí prací na viskozitě tekutin. Viskozita je schopnost kapaliny klást vnitřní odpor. Viskózní tření roste úměrně s rychlostí [4, 8].

$$F_v = \mu_v * \dot{x} \quad (2.4)$$

Kde značí:

F_v viskózní třecí síla [N]

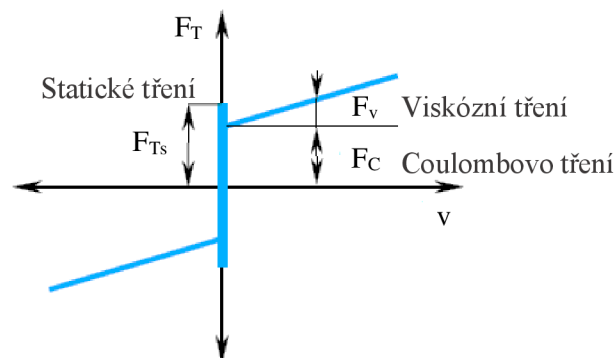
μ_v koeficient viskózního tření [1]

\dot{x} rychlost [m/s]

Klasický model tření pak vzniká rozšířením základního modelu tření o Reynoldsovu viskózní třecí sílu – viz obr. 5. Velikost třecí síly podle klasického modelu odpovídá následujícím podmínkám [4, 8]:

$$F_{T_s} = F_{v0} \quad |\dot{x}| = 0 \quad (2.5)$$

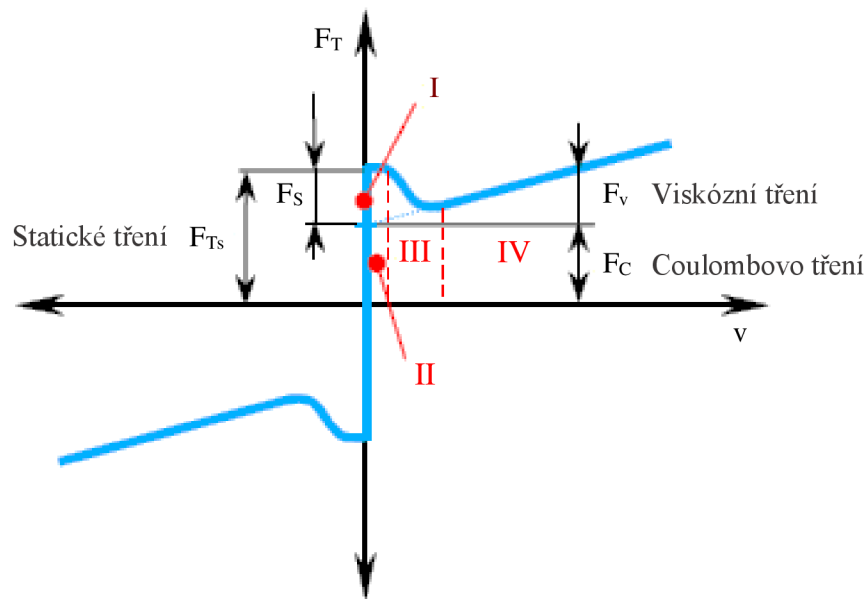
$$F_{T_k} = F_C + F_v \quad |\dot{x}| > 0$$



Obr. 5 Klasický model tření [8]

Stribeckův efekt

Hlavním problémem základního a klasického modelu je nespojitost velikosti třecí síly v oblasti přechodu mezi statickým a dynamickým třením. Pokud je totiž použito mazání, přechod je spojitý a projevuje se tzv. Stribeckův efekt. Tento jev byl rozpoznán v roce 1902 a jeho charakteristika je uvedena na obr. 6. Stribeckova křivka platí pouze pro mazané povrchy. Při absenci maziva je přechod ze statického tření na dynamické nespojitý jako u klasického modelu [6, 8].

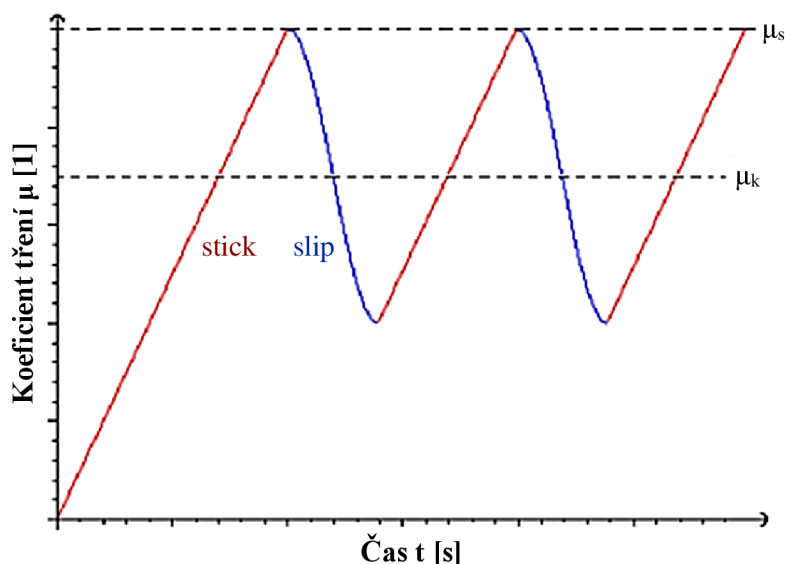


Obr. 6 Stribeckova křivka [8]

I – statické tření („stick“), II – suché tření, III – mezní tření, IV – kapalinové tření

„Stick – Slip“ efekt

Tento efekt se může vyskytovat během tažení při nízkých rychlostech. Při tomto jevu se kmitavě střídají stavy statického tření a dynamického tření. U tělesa za klidu vznikají tzv. mikrosvary, které se po vyvinutí dostatečně velké třecí síly usmýknou a těleso je uvedeno do pohybu. Mikrosvary vznikající po uvedení tělesa do pohybu jsou mnohonásobně slabší, což způsobuje pokles třecí síly. Následně se pohyb tělesa zpomalí pro udržení konstantní rychlosti, což má za následek tvorbu nových, silnějších mikrosvarů a celý proces se opakuje – viz obr. 7.



Obr. 7 Časová změna koeficientu tření u efektu „Stick – Slip“ [9]

V praxi se tento jev často vyskytuje při tažení plechů se zinkovým povlakem a může mít za následek poškození povrchu výrobku a také nástroje. Tento efekt lze minimalizovat snížením adheze (tření), zvýšením rychlosti posuvu a větší tuhostí tribologického systému [2, 4, 9].

Poznámka: V experimentálním měření této práce se vyskytl právě efekt „Stick – Slip“, jako kmitání protahovací síly – viz kap. 3.1.

2.2.1 Druhy tření

V technické praxi existuje mnoho způsobů, jak lze rozlišit různé druhy tření. V této kapitole je uvedena většina rozdělení tření podle jeho charakteru.

Podle místa vzniku

Tření rozlišované podle místa vzniku se dělí na:

- vnější tření,
- vnitřní tření.

Vnější tření je charakterizováno stykem a vzájemným posouváním dvou různých třecích ploch, zatímco vnitřní tření probíhá posuvem materiálových vrstev téhož třecího tělesa [10].

Podle skupenství (stavu)

Tření rozlišované podle skupenství třecích ploch se dělí na [10]:

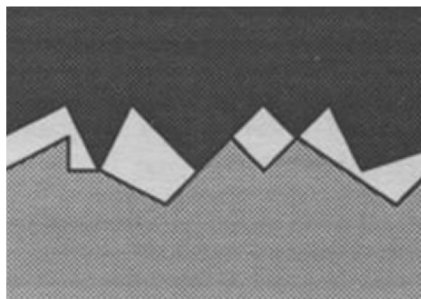
- tření tuhých těles (suché tření),
- tření kapalinové,
- tření plynové,
- tření plazmatické.

Podle míry oddělení třecích povrchů

Ve skutečnosti se výše zmíněné způsoby tření vyskytují odděleně výjimečně a skutečné tření zpravidla probíhá jejich kombinací. Průběh tření se také liší mírou oddělení třecích ploch. Stavy popisující míru oddělení jsou následující:

Suché tření (tření tuhých těles)

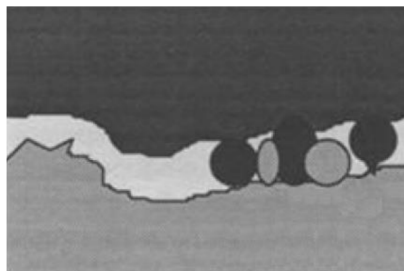
Případ tření tuhých těles nastává, pokud se materiálová oblast nachází v tuhém skupenství. Povrchy se navzájem stýkají pouze vrcholky mikronerovností, což má za následek jejich plastickou deformaci a ustříhávání nebo vylamování zrn. U hlubokého tažení je tento jev často nežádoucí a může nastat při nesprávném nanesení maziva nebo úplné absenci maziva. Suché tření je využíváno jako mechanismus přidržovače [2, 5, 11].



Obr. 8 Suché tření [10]

Mezné tření

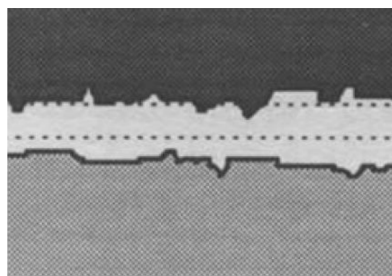
Mezné tření vzniká, pokud mezi třecími povrchy je pouze velmi tenká vrstva kapaliny, plynu nebo látek vytvořených chemickou reakcí povrchů. K meznému tření může docházet, pokud přívod maziva není dostatečný anebo i pokud vrstva maziva není dostatečně únosná. V těchto případech se třecí plochy přiblíží natolik, že styku ploch brání pouze mezná vrstva maziva. V technické praxi se tyto případy vyskytují při malých stykových plochách, vysokých tlacích, malých smykových rychlostech a mezi drsnými povrchy [2, 5, 11].



Obr. 9 Mezné tření [10]

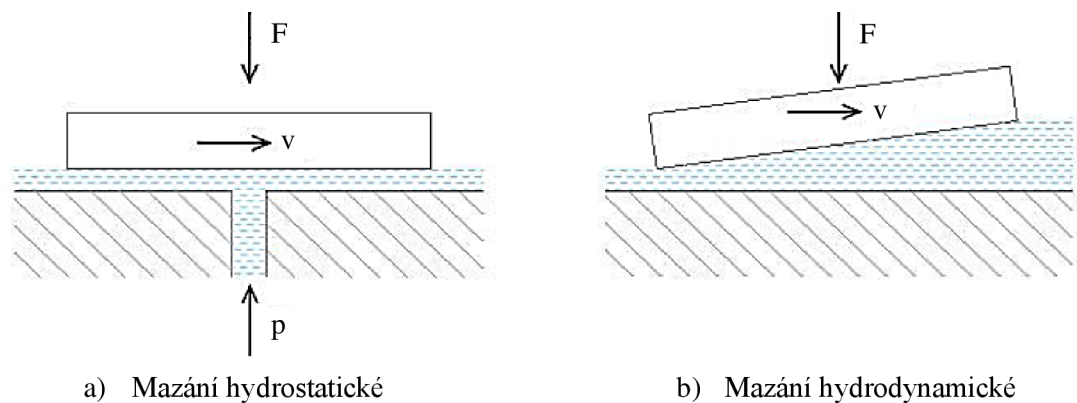
Kapalinové tření

Při kapalinovém tření dochází k dokonalému oddělení třecích povrchů, kdy je mezi povrchy vytvořena souvislá vrstva maziva. Tato vrstva zcela vyrovnává nerovnosti povrchů a svým vnitřním tlakem ruší účinek normálové zatěžovací síly na třecí povrchy [2, 5, 11].



Obr. 10 Kapalinové tření [10]

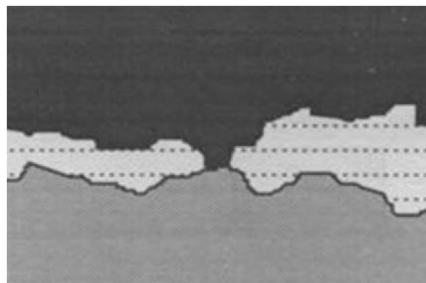
Třecí síla je tedy závislá pouze na velikosti vnitřního tření ve vrstvě maziva. Aby třecí síla byla schopna přenášet zatížení, musí v ní být vytvořen dostatečný protitlak. Tohoto protitlaku lze dosáhnout buď hydrostaticky nebo hydrodynamicky – viz obr. 11.



Obr. 11 Schématické znázornění vytvoření tlaku v kapalině [2]

Smíšené tření

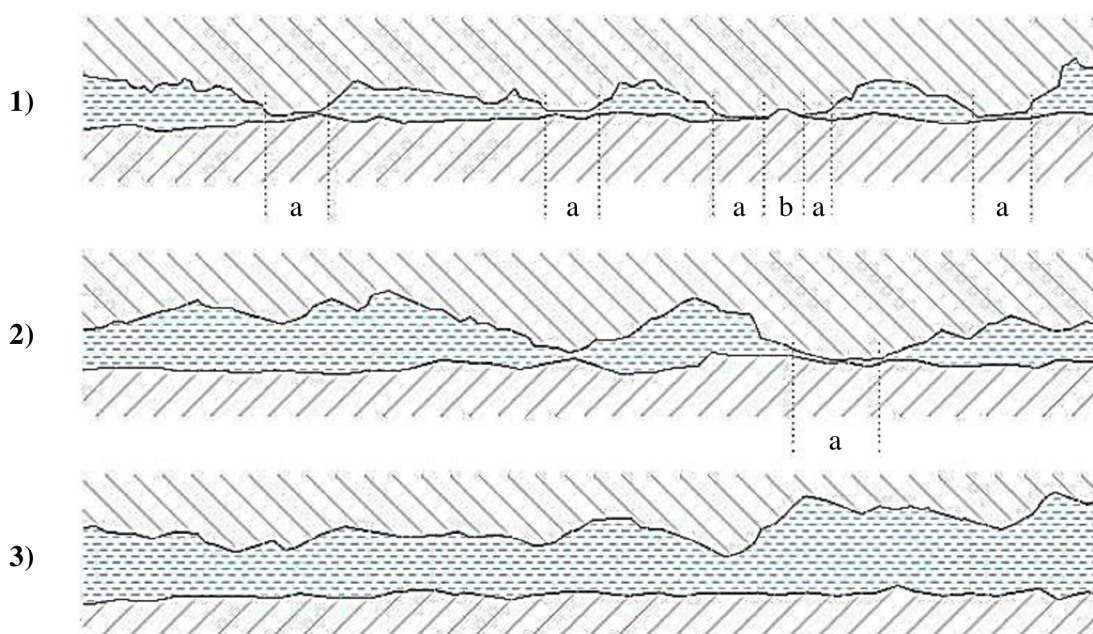
Pokud třecí plochy nejsou dokonale odděleny vrstvou maziva, dochází k tření smíšenému. Jedná se o kombinaci tření mezného a tření kapalinového, kdy tloušťka vrstvy maziva je menší než tloušťka potřebná pro kapalinové tření, ale je větší než tloušťka vrstvy potřebná pro tření mezné [2, 5, 11].



Obr. 12 Smíšené tření [10]

Důvodem může být určitá kombinace parametrů (velké zatížení, malá smyková rychlost, malá viskozita maziva, vysoká teplota maziva), přičemž významnou roli hraje mikrogeometrie stykových ploch.

Nejčastějším typem tření při tváření karosářských dílů je právě smíšené tření, které má značný vliv na konečnou kvalitu zhotoveného výrobku. Na obr. 13 jsou znázorněny nejčastější typy tření při tváření.



Obr. 13 Schématické znázornění nejčastějších způsobů tření při tváření [2]

1 – mezné tření, 2 – smíšené tření, 3 – kapalinové tření

Při mezném tření dochází k deformaci vrcholků nerovností (a), suchému tření brání pouze mezní vrstva maziva. Jsou zde ale i místa, kde dochází k narušení mezní vrstvy (b), tvrdší materiál tak porušuje povrch měkčího materiálu. V oblasti smíšeného tření většinu zatížení přenáší vrstva maziva a k meznímu tření tak dochází jenom místy. Možnosti výskytu suchého tření tak klesají na minimum. Při kapalinovém tření je vrstva maziva natolik únosná, že ke kontaktu materiálů již nedochází ani v místech s největší nerovností [2, 5, 11].

Kromě uvedených způsobů tření existují ještě další způsoby tření (jako je např. elastohydrodynamické tření, valivé tření atd.), ale vzhledem k tomu, že pro tváření nemají tyto druhy tření zásadnější význam, nejsou zde uváděny.

2.3 Maziva

Maziva jsou dílčí složkou tribologického systému a mají nenahraditelnou roli zejména v tažení, obzvláště pak složitých dílů pro automobilový průmysl. Hlavní funkce maziva je oddělení třecích povrchů a jejich ochrana vytvořením takové vrstvy, která má charakteristicky nízké vnitřní tření a adhezně přiléhá k povrchu. Tato vrstva často musí splňovat podmínky jako je chemická stálost, schopnost odvádět částice vznikající opotřebením, nekorozivní účinek na materiál, schopnost odvádět teplo a jiné [2, 5, 12].

Maziva při tažení

Zabráněním suchého tření (tření tuhých těles) mezi třecími plochami je zvyšována životnost tažných nástrojů a také je omezován otěr výtažků. Použitím maziva se snižuje koeficient tření, což má za následek snížení tažných sil. Dále také maziva dovolují použití vyššího stupně tažení a umožňují větší deformace výtažků, a to při stejných technologických podmínkách.

Dobré mazivo musí být schopné oddělit třecí povrchy dostatečně únosnou vrstvou filmu s optimálním koeficientem tření. Tato vrstva by neměla být během tažení vytlačována, proto jsou do maziv často přidávány vysokotlaké přísady (grafit, síra, mastek atd.). Dalšími přísadami zlepšující vlastnosti mohou být např. inhibitory koroze a antioxidanty (potlačení oxidace), detergenty a disperzanty (očistění ploch), modifikátory viskozity, modifikátory viskozitně teplotní křivky a depresanty (snížení teploty tuhnutí), modifikátory tření a další [2, 4, 10, 13].

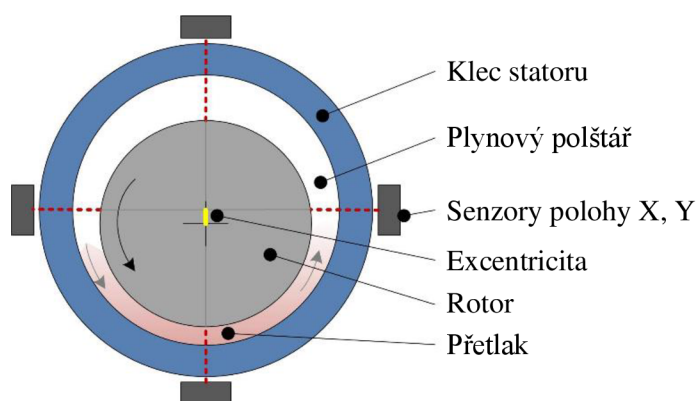
2.3.1 Druhy maziv

Pro tažení je používáno velké množství maziv a mají-li plnit svou funkci, je potřeba, aby byla vybírána stejně pečlivě, jako například materiál nástroje. Maziva jsou rozdělována dle charakteru na [2]:

- plynná maziva,
- tuhá maziva,
- plastická maziva,
- kapalná maziva.

Plynná maziva

Plynná maziva se používají primárně v plynových ložiscích. Jsou charakteristická stálostí při vysokých teplotách (300 °C a více), které vznikají při velkých obvodových rychlostech (10 000 ÷ 600 000 rpm). Hlavní výhodou plyných maziv je jejich nízká viskozita a s ní spojený nízký koeficient tření. Dalšími výhodami je nepatrná velikost tepla vznikající při tření a absence kavitací. Nevýhodou plyných maziv je horší schopnost snášet zatížení, sklony k nestabilitě, chvění a možnému vzniku suchého tření. Volba vhodného maziva se řídí pracovní teplotou. Vzduch a CO₂ se používají do teploty 650 °C. Pro vyšší teploty se pak využívá hélium, dusík a jiné plyny [4, 5, 10, 13].



Obr. 14 Schéma plynového ložiska [14]

Tuhá maziva

Tuhá maziva jsou vhodná pro mazání za extrémních tlaků, teplot, záření a dalších vlivů. Jedná se o látky s nízkou tvrdostí, malou smykovou pevností a velkou afinitou ke kovům. Mají stálé chemické a fyzikální vlastnosti až do určité mezní teploty, kdy dochází k chemické přeměně dané látky. Tuhá maziva postrádají základní schopnosti jako je odvod tepla, mají zvýšený koeficient tření a nižší trvanlivost. Jsou proto používána v případech, kdy nelze použít jiná maziva. Tuhá maziva jsou rozdělována dle původu a chemického složení na [4, 5, 10, 13]:

- anorganická (selenidy, fluorid, ...),
- organická (polymerní, tuky, vosky),
- měkké kovy (Pb, Sn, Ag, Au a jejich slitiny),
- kluzné látky (grafit, sulfidy, MoS₂ apod.).

Plastická maziva

Plastická maziva jsou tvořena disperzní a dispergovanou složkou. Disperzní fáze je olejová složka tvořená z ropných nebo syntetických olejů. Dispergovaná fáze funguje jako zpevňovač a má zásadní vliv na vlastnosti maziva. Rozlišují se mýdlová a nemýdlová zpevňovač. Plastická maziva mají malý odstřík (nižší spotřebu) a umožňují těsnící účinek. Zabraňují tedy vnikání nečistot a prachu mezi kontaktní plochy. Nevýhodou plastických maziv je jejich vyšší koeficient tření, horší odvod tepla a nemožnost oběhového mazání. Používají se např. pro kluzná ložiska, kluzná vedení a ozubená soukolí [4, 5, 10, 13].



Obr. 15 Vzhled plastického maziva [15]

Kapalná maziva

Kapalná maziva mají největší zastoupení, proto jejich hlavní výhodou je dostupnost a velká škála využití díky spoustě druhů aditiv. Jsou rozeznávány biologické, minerální a syntetické oleje.

Biologické oleje jsou používány především v potravinářském a farmaceutickém průmyslu pro jejich zdravotní nezávadnost. Mohou být rostlinného nebo živočišného původu.

Minerální oleje se díky svému širokému využití řadí mezi nejpoužívanější maziva ve strojírenství. Jedná se o směsi uhlovodíků získávaných frakční destilací ropy. Rafinací se odstraňují nežádoucí složky, jejichž odstraněním minerální oleje získávají odolnost proti korozi, sníženou viskozitu a snížení bodu tuhnutí. Nevýhodou je náchylnost některých minerálních olejů k oxidaci, která se musí kompenzovat antioxidanty jako je např. síra (ta však naopak způsobuje korozi materiálu).

Syntetické oleje jsou od začátku 20. století využívány stále více. Jsou vyráběny krakováním ropy, kdy dochází k rozpadu uhlovodíků za pomoci katalyzátorů, vysokých teplot a tlaků. Následně polymerizací vznikají syntetické oleje s vysokou viskozitou a nízkou těkavostí. Jsou používány v těžkých provozních podmínkách a všude, kde již nestačí minerální oleje. Mezi velké nevýhody syntetických olejů patří vysoká cena, agresivita k některým materiálům (plasty, lehké kovy) a jejich ekologická a zdravotní závadnost. V automobilovém průmyslu se používají především esterové oleje [4, 5, 10, 13].

Kapalná maziva jsou také rozdělována dle použití. V automobilovém průmyslu to jsou pak hlavně: oleje spalovacích motorů, převodové, kompresorové, turbínové, hydraulické, válcové, ložiskové, tlumičové oleje a jiné [10, 13].

Maziva v automobilovém průmyslu

S rostoucími požadavky automobilového průmyslu se zvedají i nároky na používaná maziva. Volbou vhodných maziv se výrazně zlepšuje kvalita vyráběných dílů a klesají výrobní náklady. Mezi nejčastěji používaná maziva pro tažení v automobilovém průmyslu patří [4, 12, 16]:

Technologická maziva (tažná)

Jsou nanášena až před samotným tažením. Jsou nanášena pomocí trysky podle tzv. mazacích plánů pouze na kritická místa kde je vyžadováno omezení tření (přimazávání).

Konzervační maziva

Jsou nanášena na plech již u výrobce v hutích. Hlavní důraz je kladen na jejich konzervační schopnosti (protikorozi ochrana a ochrana před vnějšími vlivy), než na schopnosti mazací.

Prací oleje

Jsou určeny především k čištění plechu od nečistot před tvářením. Zároveň lze tyto oleje uplatnit během tažení díky jejich dobrým třecím vlastnostem. Prací oleje jsou na povrch plechu nanášeny pracím válcem. Mají velký význam u výlisků karosářského typu kde je požadována vysoká kvalita povrchu z důvodu dalšího zpracování lakováním.

Nanášení maziv je v praxi prováděno třemi způsoby:

- Nástříkem – pomocí mazacích trysek, jež rozprašují mazivo na požadovaná místa v potřebném množství.
- Válečkem – pro viskózní maziva, která nelze nanášet tryskou ani po zředění. Mazivo je vtlačováno do dutého čepu s dírami, který je obalen látkou či plstí. Nasáknutý potah pak aplikuje mazivo na povrch plechu.
- Praním – plech prochází tzv. „pracím strojem“, který aplikuje prací olej za účelem zbavení povrchu všech nečistot a konzervačních olejů z hutí.

2.4 Tribologické zkoušky

Vzhledem k obtížnosti získání úplných informací o průběhu procesu tváření, je tribologické testování prováděno pomocí různých tvarů nástrojů a tažných hran. Při sledování procesu tváření plechů (jakožto tribologického systému), je zjišťováno velké množství parametrů mající vliv na velikost třecí síly:

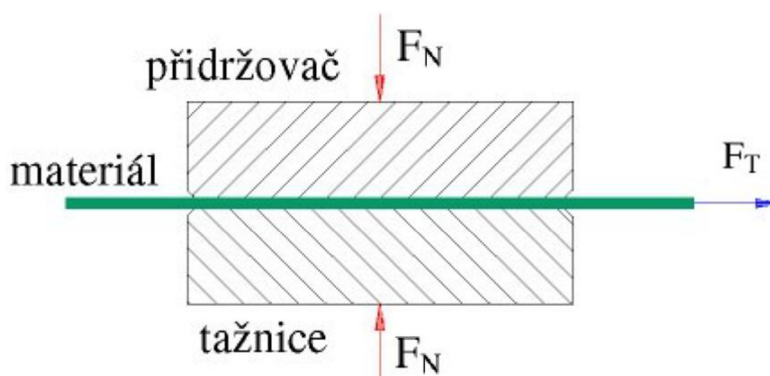
- rychlost posuvu plechu po nástroji,
- druh a drsnost povrchu testovaného materiálu,
- mechanické vlastnosti materiálu,
- povrchová úprava materiálu,
- druh a stav materiálu nástroje,
- druh a množství použitého maziva,
- velikost kontaktního tlaku mezi nástrojem a materiálem,
- atd.

Je důležité si uvědomit, že tyto parametry se neuplatňují samostatně, ale vzájemně se ovlivňují. Je proto velmi obtížné uvedené vlivy hodnotit samostatně a často se při vyhodnocování tribologických podmínek posuzují komplexně výsledky zkoušek pro celou sestavu nástroj – mazivo – materiál – technologické podmínky. Nejdůležitějším a nejzkoumanějším parametrem je měření třecí síly při pohybu testovaného vzorku. Přehled v současnosti používaných tribologických testů pro hodnocení tribologických vlastností materiálů, maziv a povrchových úprav používaných v automobilovém průmyslu při tváření je uveden v další části této kapitoly [2, 11, 17, 18].

Modelování tření mezi přidržovačem a tažnicí

Tento způsob zkoušení je jeden z nejrozšířenějších testů pro simulaci tření mezi tažnicí a přidržovačem. Test vyvinul Wojtowicz a principem testování je protahování pásky testovaného materiálu mezi zkušebními čelistmi – viz obr. 16. Zřejmou výhodou tohoto testu je snadné nastavení podmínek testu (rychlost protahování a velikost normálového zatížení čelistmi F_N), snadné měření sledované veličiny F_T (tažné síly) a jednoduchý výpočet koeficientu tření z hodnot F_T a F_N . Nevýhodou je, že oproti reálnému tažení neodpovídá napjatost materiálu praxi a není zde žádná objemová plastická deformace. Na velikost tažné síly má také vliv geometrie čelistí v místě vstupu materiálu [2, 18].

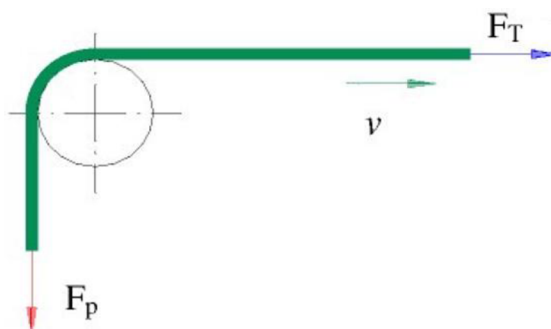
Princip tohoto testu je také používán na katedře strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci a jeho průběh a způsob vyhodnocení je podrobněji popsán v experimentální části této práce.



Obr. 16 Modelování tření mezi přidržovačem a tažnicí [2]

Modelování tření na tažné hraně

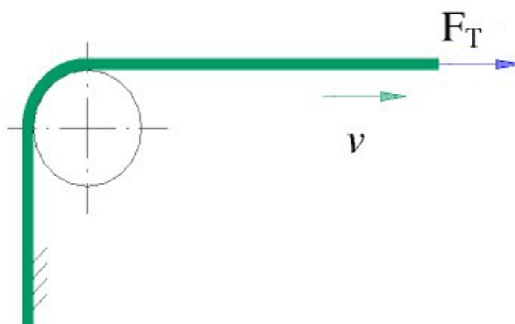
Principem tohoto testu je tažení přes tažnou hranu tažnice. Zkušební vzorek je tažen konstantní rychlostí v přes váleček o poloměru R , reprezentující tažnou hranu. Hlavním sledovaným parametrem je zde velikost tažné síly F_T , která závisí na protitahu brzdící síly F_p – viz obr. 17. Kromě parametrů zmiňovaných na začátku kapitoly má vliv na tažnou sílu také délka styku materiálu s tažnou hranou (úhel opásání). Výhodou tohoto testu je snadné nastavení rychlosti protahování a jednostranný kontakt. Nevýhodou je špatná kontrola kontaktního tlaku mezi hranou a vzorkem [2, 18].



Obr. 17 Modelování tření na tažné hraně [2]

Modelování vypínání přes tažnou hranu

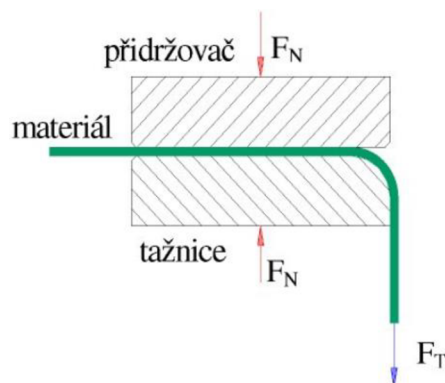
Princip tohoto testu spočívá v tažení vzorku přes válcovou tažnou hranu. Na rozdíl od předchozí metody je zkušební vzorek na jedné straně pevně uchycen a druhá strana se pohybuje rychlostí v vlivem síly F_T – viz obr. 17. Kritériem pro vyhodnocení zkoušky je síla F_T potřebná pro vytvoření předem zvolené deformace. Výhodou této zkoušky je vznik deformací v kontaktní zóně, které jsou podobné deformacím vznikající u hlubokého tažení na čele tažníku. Nevýhodou je obtížná nastavitelnost kontaktního tlaku na tažné hraně a kluzná rychlost, která není konstantní a obtížně se měří [2, 18].



Obr. 18 Modelování vypínání přes tažnou hranu [2]

Modelování tření mezi přidržovačem, tažnicí a tažnou hranou

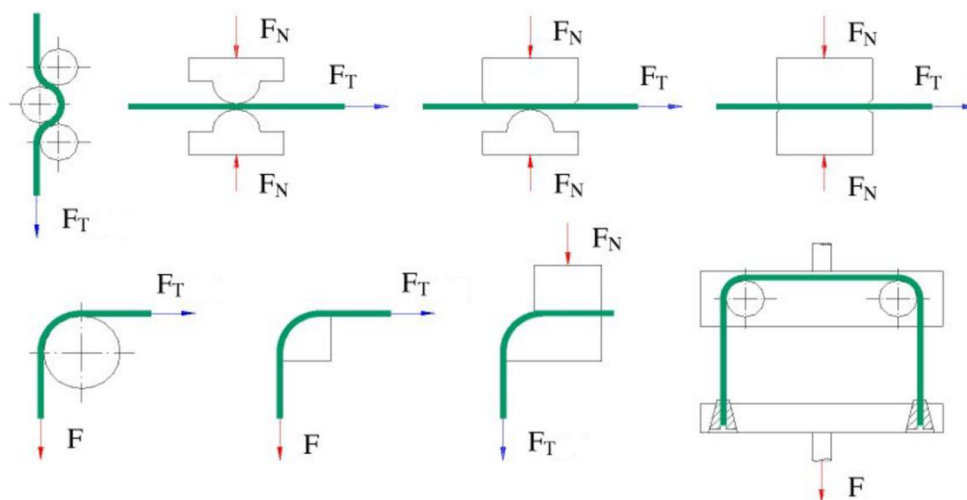
Tento test a stejně tak i jeho výhody a nevýhody jsou kombinací již popsaných předchozích testů. Hodnotícím kritériem pro tribologické vlastnosti je opět velikost síly potřebné k protažení zkušební pásky F_T . Navíc má tento test výhodu, že při něm vzniká stejný ohybový efekt jako u skutečného tažení a je dosahováno plastické deformace. Na obr. 19 je uvedeno schématické znázornění tohoto testu [2, 18].



Obr. 19 Modelování tření mezi přidržovačem, tažnicí a tažnou hranou [2]

Další způsoby tribologických zkoušek plechů

Laboratorních zkoušek pro hodnocení tribologických vlastností testovaných maziv, materiálů, povrchových úprav a jejich kombinací byla vyvinuta celá řada. Ve většině případů se však jedná o zkoušky technologické a výsledky z jednotlivých pracovišť nejsou porovnatelné. Příklady některých dalších tribologických zkoušek jsou uvedeny na obr. 20 [2, 18].



Obr. 20 Příklady další tribologických zkoušek plechů [2]

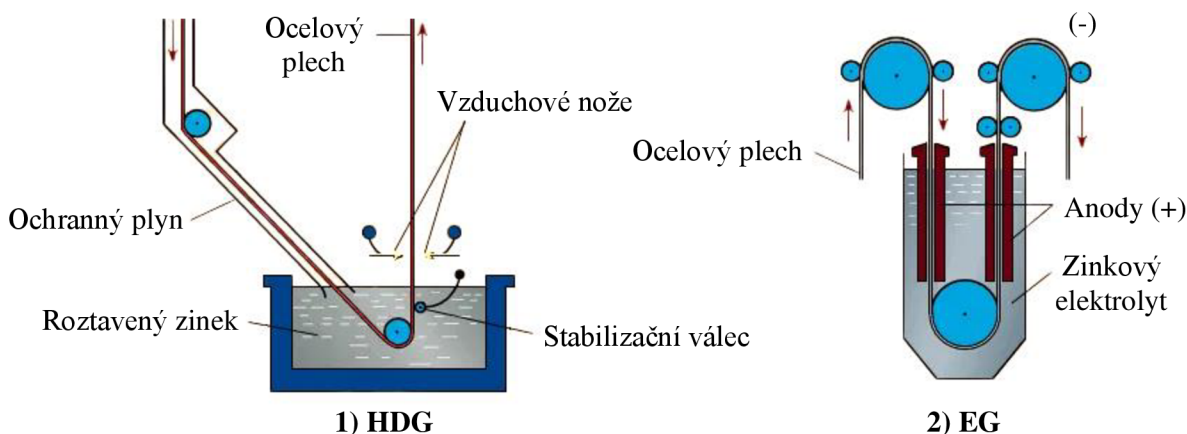
2.5 Povrchové úpravy

V aktuální době jsou v automobilovém průmyslu na výrobu karoserií používány hlavně plechy s povlaky na bázi zinku. Zinek je využíván hlavně kvůli své poměrně nízké ceně a dobré korozní odolnosti. Tyto povlaky jsou nejčastěji nanášeny žárově (HDG – hot-dip galvanization) nebo elektrolyticky (EG – electrogalvanization) [18, 19].

V případě EG nanášení zinku dochází k postupnému usazování zinkového povlaku z elektrolytu na plech. Touto metodou lze dosáhnout velmi tenkých vrstev ($7 \div 10 \mu\text{m}$). Galvanický proces tepelně neovlivňuje původní mechanické vlastnosti materiálu a lze jednoduše vyrábět i jednostranně pozinkované plechy. Velkou nevýhodou EG pozinkování je vyšší energetická náročnost oproti HDG pozinkování [18, 19].

V současnosti je více využíván princip HDG pozinkování, kde je zinkový povlak zhotovován kontinuálním ponorem plechu do taveniny zinku při teplotě $420 \text{ }^\circ\text{C}$ až $740 \text{ }^\circ\text{C}$. Během tohoto procesu dochází k reakci mezi zinkovou lázní a ocelí. Vznikají tak velmi tvrdé přechodové fáze odpovídající binárnímu diagramu Fe – Zn. Žárovým pozinkováním jsou vyráběny různé tloušťky povlaků od 40 do $200 \mu\text{m}$. Pro další zlepšení korozní odolnosti povlaku se do taveniny přidávají legující přísady jako je např. Al, Ni nebo Co [17–19].

Nevýhodou pozinkovaných plechů je jejich sklon k zadírání během tažení. Při vysokém zatížení třecích ploch jsou porušovány ochranné vrstvy, vznikají mikrosvary a dochází k suchému tření. Důsledkem zadírání je vznik rýh a stop po tažných rádiusech. HDG pozinkované plechy jsou sice levnější oproti více energeticky náročnému EG pozinkování, ale vrstva žárově naneseného zinku je měkkší a méně rovnoměrná než vrstva nanesená elektrolyticky, proto je zároveň náchylnější k zadírání [2, 17, 18].



Obr. 21 Schéma HDG a EG pozinkování plechů [20]

1 – linka žárového pozinkování, 2 – linka elektrolytického pozinkování

3 Experimentální část

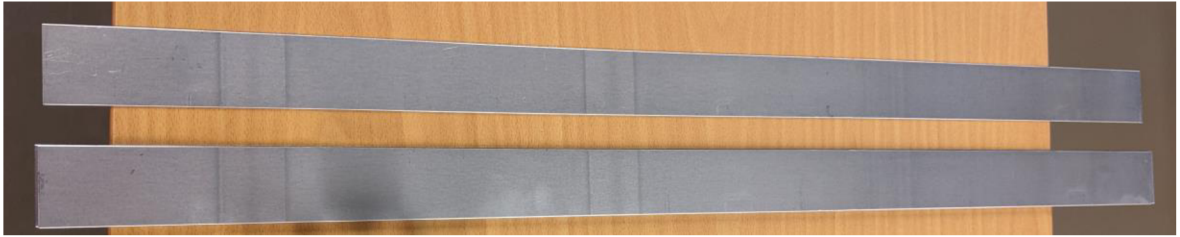
V experimentální části této bakalářské práce byly zjišťovány tribologické vlastnosti dvou vybraných olejů pomocí tribologické zkoušky protahováním pásku. Testován byl olej aktuálně používaný ve výrobě (olej 1) a olej nově vyvinuté generace (olej 2). Zkouška probíhala na tribologickém testovacím zařízení SOKOL 400. Během zkoušky jsou simulovány tribologické podmínky při lisování plechu. Testovací pásek je upevněn do hydraulických čelistí a je protahován konstantní rychlostí (v tomto případě 1 a 10 mm/s) mezi testovacími čelistmi, které na pásek působí tlakem. Během zkoušky je tlak postupně diskrétně zvyšován (tlaky v tomto případě byly: 4; 6; 8; 10 a 12 MPa), přičemž teplota čelistí je konstantní (40 °C). Výsledkem zkoušky je závislost síly potřebné k protažení pásku na měřené dráze. Celková dráha byla 500 mm, přičemž měřená dráha pro jeden tlak byla 100 mm. Po projetí dráhy 100 mm se tlak diskrétně zvýšil na další hodnotu. V každé této oblasti lze pro daný tlak určit velikosti tribologických sil – maximální síla F_{max} [N], maximální síla v tzv. „ustálené oblasti“ F_h [N], průměrná síla v „ustálené oblasti“ F_h [N] a rozdíl maximální a minimální síly v ustálené oblasti ΔF [N]. Jeden z hlavních parametrů pro porovnání obou olejů byl koeficient tření, jehož velikost lze vypočítat právě ze síly F_h . Postup vyhodnocení je detailněji popsán v kap. 3.3.

3.1 Příprava vzorků pro měření

Zkušební vzorky byly nastříhány z tabule plechu s povrchovou úpravou žárovým pozinkem HDG – viz obr. 22. Vzorky byly stříhány na pásových nůžkách kolmo (90°) na směr válcování. Rozměr jednoho zkušebního pásku byl 44 x 840 mm – viz obr. 23.



Obr. 22 Tabule plechu před nastříháním

**Obr. 23** Nastříhané pásky

Takto nastříhané vzorky byly následně odmaštěny ve speciální lázni pomocí přípravku D-sol. Tento krok je důležitý pro zajištění dobré adheze maziva k testovaným páskům a pro zajištění stejných testovacích podmínek všech vzorků. Veškeré nastříhané pásky byly ponořeny do chemické lázně na dobu přibližně 3 hodin. Zároveň byl do roztoku vháněn stlačený vzduch, který vytvářel bubliny pro ještě lepší odmaštění a očištění pásků. Na konci tohoto procesu byly pásky vyjmuty z lázně a byly umístěny na odkapávací zařízení. Na obr. 24 je vidět odmašťovací lázeň a odkapávací zařízení. Po odkapání veškerého odmašťovacího přípravku byly již pásky připravené na samotné tribologické testování.

**Obr. 24** Odmašťovací zařízení

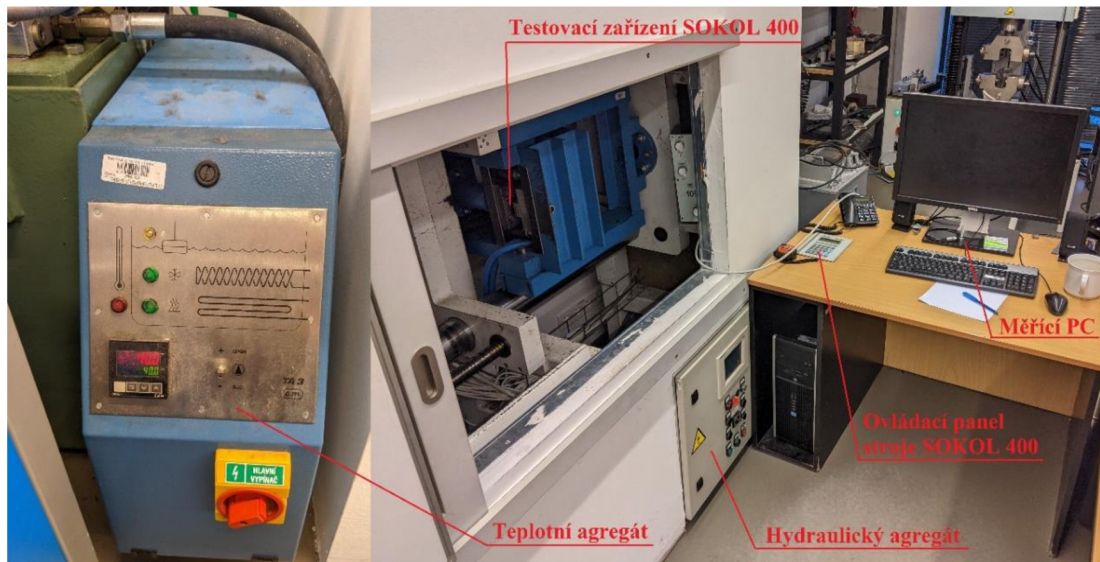
3.2 Parametry tribologické zkoušky

Tribologická zkouška byla prováděna na zařízení SOKOL 400 dle parametrů popsaných v tab. 1. Byla testována 2 různá maziva označená jako olej 1 (referenční) a olej 2 (nová generace). Všechny ostatní parametry (kromě rychlosti posuvu a kontaktního tlaku) byly konstantní. Kontaktní tlak se diskrétně zvyšoval v průběhu zkoušky vždy od nejmenšího po největší (4 ÷ 12 MPa). Všechny zkoušky byly prováděny nejdříve rychlostí 1 mm/s a poté rychlostí 10 mm/s.

Tab. 1 Parametry tribologické zkoušky

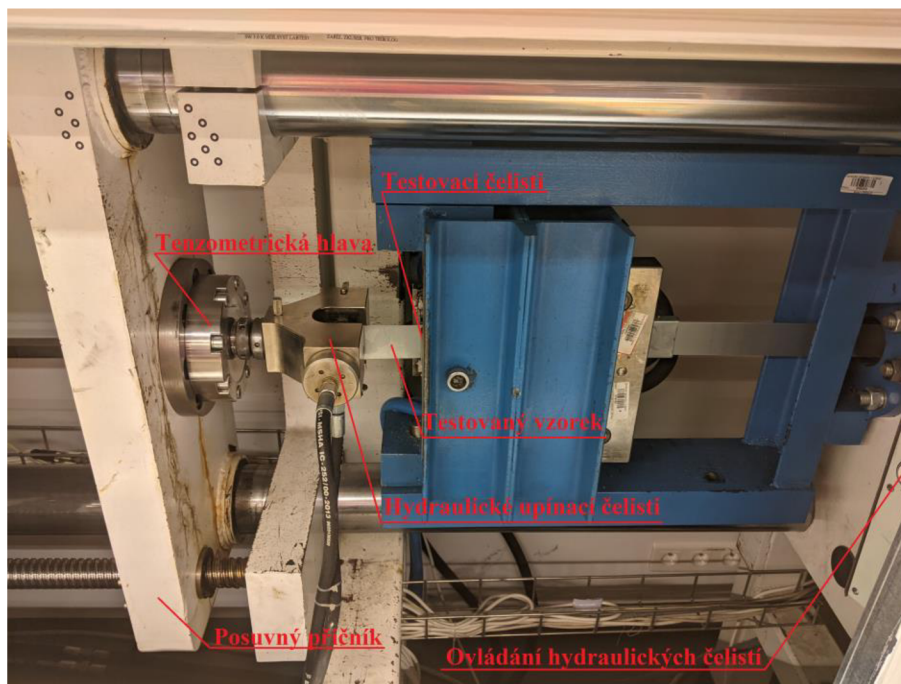
Parametry zkoušky	
Rozměr vzorku	44 x 840 mm
Celkový počet vzorků	32
Kontaktní plocha čelistí	3120 mm ² (78 x 40 mm)
Teplota čelistí	40 °C
Množství maziva	1,5 g/m ²
Mazivo	Olej 1 a olej 2
Kontaktní tlak	4; 6; 8; 10; 12 MPa
Rychlost posuvu	1 a 10 mm/s
Celková dráha měření	500 mm (á 100 mm)

Tribologické pracoviště se skládalo ze samotného testovacího zařízení SOKOL 400, hydraulického agregátu pro regulaci kontaktního tlaku testovacích čelistí, teplotního agregátu pro udržování teploty testovacích čelistí a ovládacího počítače pro záznam a zpracování výstupních dat – viz obr. 25.



Obr. 25 Tribologické pracoviště

Testovaný vzorek byl napevno upnutý v hydraulických čelistech, které byly připojené na posuvný příčnick s tenzometrickou měřicí hlavou. Tento příčnick byl posouván pomocí vodícího šroubu předem definovanou rychlostí (1 nebo 10 mm/s) po vodících tyčích a protahoval testovaný vzorek mezi testovacími čelistmi. Tyto čelisti působily na vzorek diskretně rostoucím kontaktním tlakem (4 až 12 MPa), který byl zajišťován hydraulickým agregátem. Detailní pohled na tribologický nástroj je vidět na obr. 26. Konstantní teplota byla udržována teplotním agregátem. Tenzometrickou hlavou byla měřena síla potřebná k protáhnutí pásku mezi testovacími čelistmi. Data byla zaznamenávána s frekvencí 2 kHz do měřicího počítače. Rychlost posuvu příčnicku byla nastavena pomocí ovládacího panelu stroje vedle počítače. Velikosti kontaktních tlaků se zadávaly přímo do ovládacího panelu hydraulického agregátu.



Obr. 26 Detail tribologického nástroje

3.3 Postup měření oleje 1

Po přípravě vzorků (popsané v kapitole 3.1) následovalo již samotné měření. Cílem měření bylo porovnat 2 různé oleje a to při 2 různých rychlostech a proměnlivých tlacích – viz tab. 1. Před začátkem měření bylo nutné důkladně očistit testovací čelisti od všech dříve použitých maziv, která by mohla znehodnotit výsledky měření. Čelisti byly očištěny acetonem a dále pak ještě lehce zarovnány brusným papírem pro odstranění možných nerovností vzniklých v předchozích měřeních – viz obr. 27.



Obr. 27 Očištění testovacích čelistí

Očištěné čelisti byly lehce namazány olejem 1 a připevněny do testovacího stroje. Stejným olejem byl zároveň namazán i testovací pásek. Na všechny testovací vzorky bylo vždy nanášeno $1,5 \pm 0,2 \text{ g/m}^2$ maziva. Po aplikaci maziva bylo nanášené množství zkontrolováno měřícím přístrojem firmy Infralytic GmbH – viz obr. 28. Všechny zkušební vzorky byly měřeny na 3 různých místech.



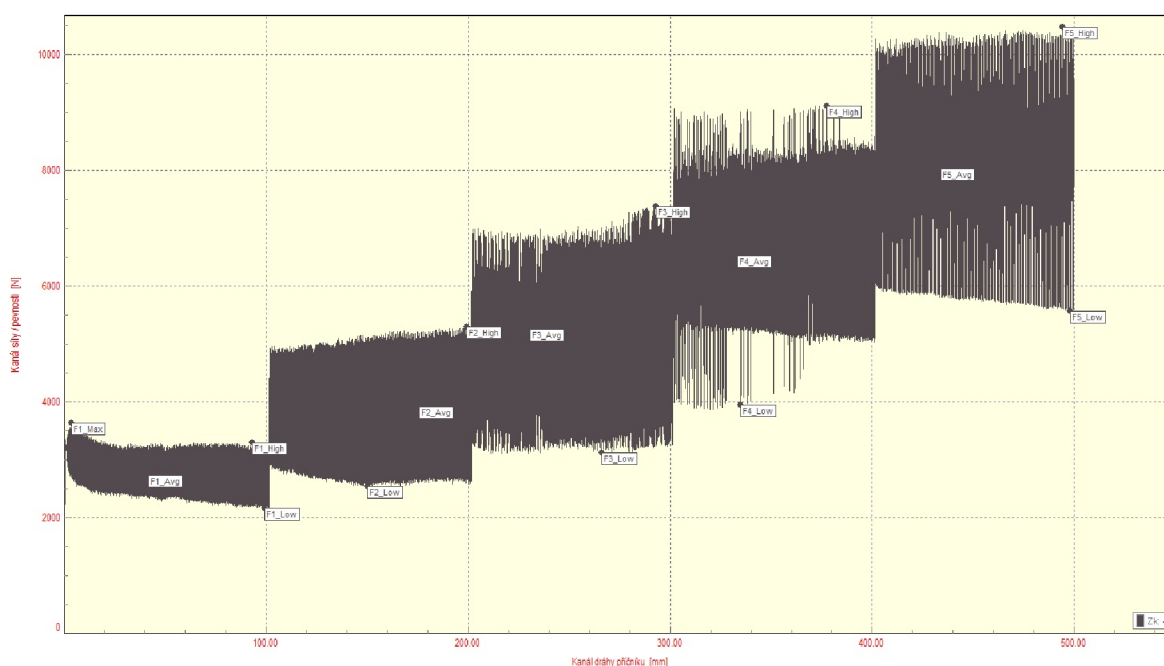
Obr. 28 Měření množství maziva na testovaném vzorku

Po zkontrolování množství maziva byl testovaný pásek upnut do hydraulických čelistí testovacího stroje. Potřebný přtlak pro udržení pásku byl vyvinut hydraulickým agregátem. Na měřícím stroji byla nastavena rychlost posuvu příčnicku na 1 mm/s a celková dráha 500 mm. Na hydraulickém agregátu byly přednastaveny požadované tlaky (4; 6; 8; 10 a 12 MPa) pro testovací čelisti. Na prvních 100 milimetrech dráhy byl testovacími čelistmi vyvíjen tlak 4 MPa na testovací pásek. Na dalších 100 milimetrech dráhy pak byl tlak 6 MPa a takto postupně až po 12 MPa na posledním úseku.

Měření bylo spuštěno po založení testovacího vzorku a nastavení všech parametrů. Hydraulický agregát začal vyvíjet kontaktní tlak v testovacích čelistech. Po dosažení požadované hodnoty 4 MPa bylo zapnuto zaznamenávání polohy a velikosti síly v tenzometrické hlavě. Zároveň byl zapnut posuv pohyblivého příčnicku. Na konci prvního úseku byl tlak automaticky zvýšen na další požadovanou hodnotu a měření probíhalo dále, jak již bylo popsáno v předchozím odstavci. Po celou dobu měření byla teplota testovacích čelistí udržována na hodnotě 40 °C pomocí teplotního agregátu. Po projetí celkové dráhy

500 mm bylo měření ukončeno a vzorek byl vyjmut z čelistí. Všechna data měření byla průběžně ukládána do PC.

Tímto způsobem bylo změřeno celkem 8 vzorků. Hlavním grafickým výsledkem zkoušky byla závislost síly na dráze F [N] – s [mm]. Graf byl rozdělen na 5 stejně dlouhých částí po 100 mm (celková dráha byla 500 mm) podle velikosti kontaktního tlaku. V každé této části pak byla ještě vymezena tzv. ustálená oblast (30–100 mm). Z těchto dat lze získat parametry uvedené v tab. 2. Na obr. 29 je ukázka průběhu skutečné síly na celkové dráze 500 mm. Data byla zpracována pomocí softwaru LabNET.



Obr. 29 Průběh skutečné síly měření č. 4 pro rychlost 1 mm/s (olej 1)

Tab. 2 Označení sil a koeficientů k vyhodnocení tribologické zkoušky protahováním pásku

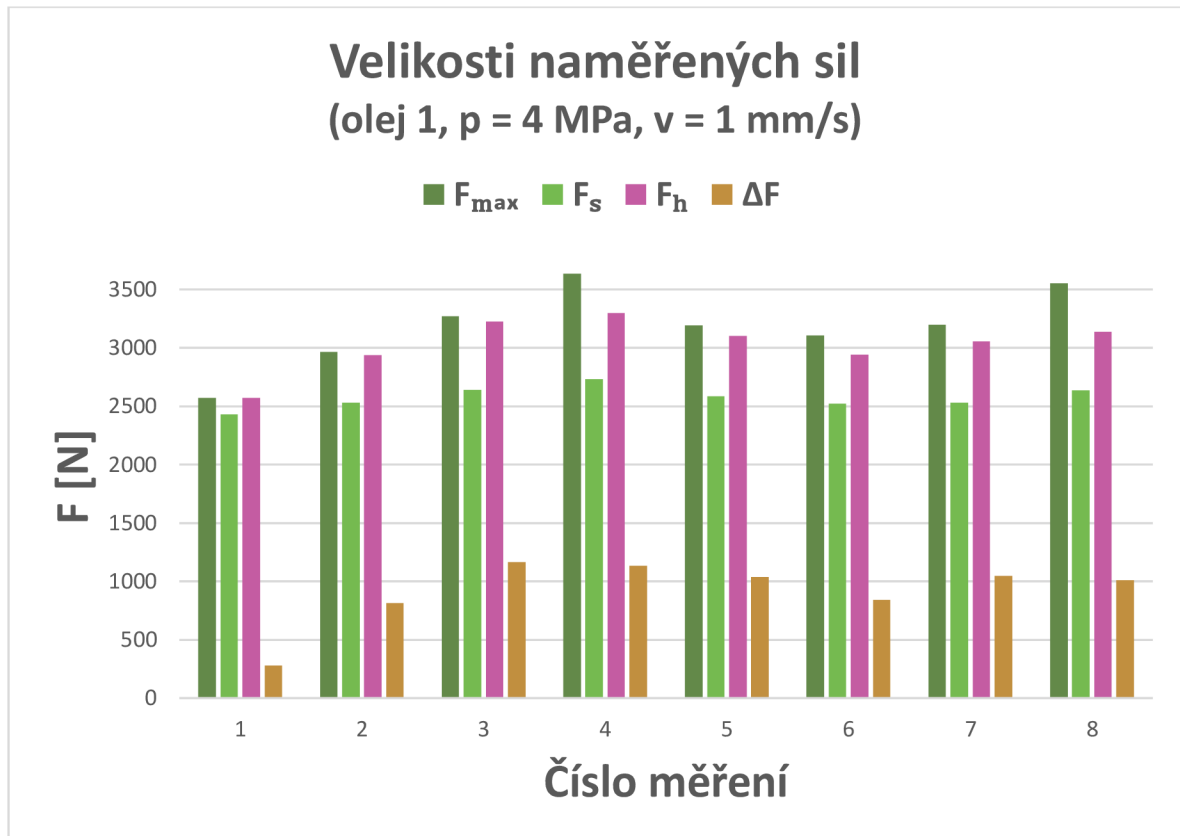
Název	Označení	Jednotky
Maximální síla	F_{max}	[N]
Maximální síla v „ustálené“ oblasti	F_h	[N]
Průměrná síla v „ustálené“ oblasti	F_s	[N]
Rozdíl maximální a minimální síly v „ustálené oblasti“	ΔF	[N]
Koeficient tření	μ	[1]

Výsledky prvních 8 zkoušek jsou uvedeny v tab. 3. Jsou zde zároveň vypočítány střední hodnoty \bar{x} a výběrové směrodatné odchylky s všech měřených sil.

Tab. 3 Změřené síly pro kontaktní tlak 4 MPa a rychlost 1 mm/s (olej 1)

Číslo měření	F_{\max} [N]	F_h [N]	F_s [N]	ΔF [N]
1	2571	2431	2571	280
2	2964	2530	2937	815
3	3268	2640	3222	1165
4	3636	2730	3297	1133
5	3191	2584	3102	1036
6	3104	2519	2940	842
7	3198	2532	3055	1045
8	3552	2633	3137	1008
\bar{x}	3186	2575	3033	916
s	333	92	224	285

Na obr. 30 jsou velikosti těchto sil vyneseny do grafu. Nejdůležitější z těchto sil je síla F_{\max} a síla F_h , ze které se následně vypočítá koeficient tření.



Obr. 30 Výsledky měření pro kontaktní tlak 4 MPa a rychlost 1 mm/s (olej 1)

Jedno z možných kritérií pro porovnání oleje 1 a oleje 2 jsou velikosti sil potřebných pro protažení vzorku testovacími čelistmi. Další možný způsob srovnání je pomocí velikosti koeficientu tření μ [1]. Pro výpočet koeficientu tření se používá maximální velikost síly v „ustálené“ oblasti F_h . Koeficient tření μ byl vypočítán dle rovnice (3.1):

$$\mu = \frac{F_h}{2 \cdot p \cdot S} \quad (3.1)$$

Kde značí:

μ koeficient tření [1]

F_h maximální síla v „ustálené oblasti“ [N]

p kontaktní tlak v testovacích čelistech [MPa]

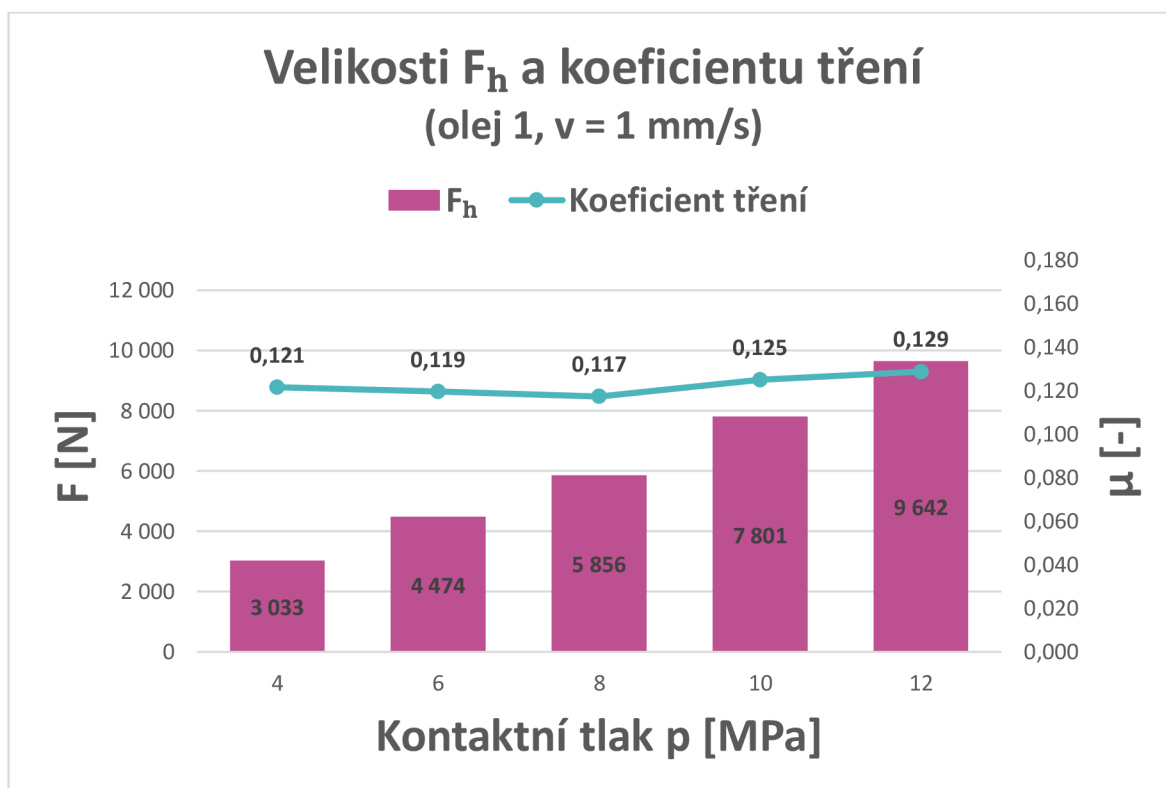
S kontaktní plocha [mm²]

V tab. 4 jsou uvedeny průměrné hodnoty koeficientů tření pro daný tlak. K výpočtu byly použity průměrné hodnoty síly F_h z příslušných 8 měření.

Tab. 4 Průměrná síla F_h a koeficient tření μ pro rychlost 1 mm/s (olej 1)

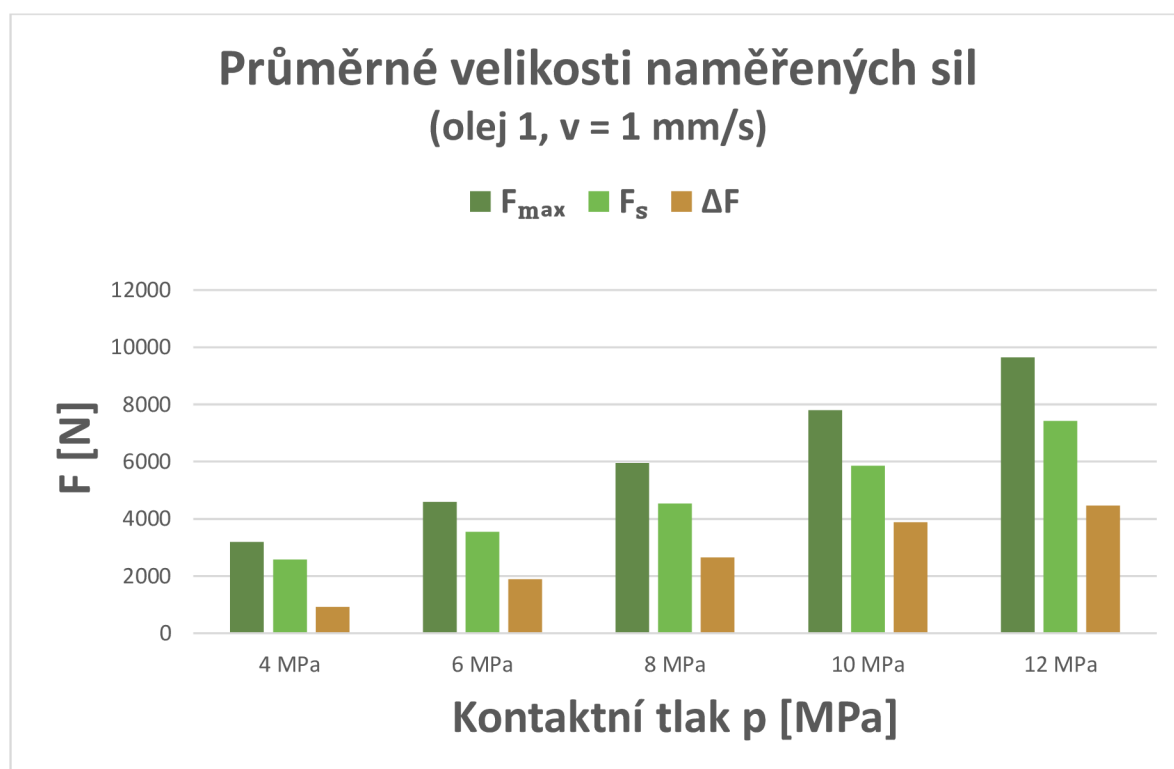
	Kontaktní tlak [MPa]									
	4		6		8		10		12	
	F_h [N]	μ [1]	F_h [N]	μ [1]	F_h [N]	μ [1]	F_h [N]	μ [1]	F_h [N]	μ [1]
\bar{x}	3033	0,121	4474	0,119	5856	0,117	7801	0,125	9642	0,129
s	224	0,009	345	0,009	654	0,013	572	0,009	531	0,007

Na obr. 31 jsou tyto průměrné hodnoty síly F_h a jí příslušnému koeficientu tření zobrazeny graficky.



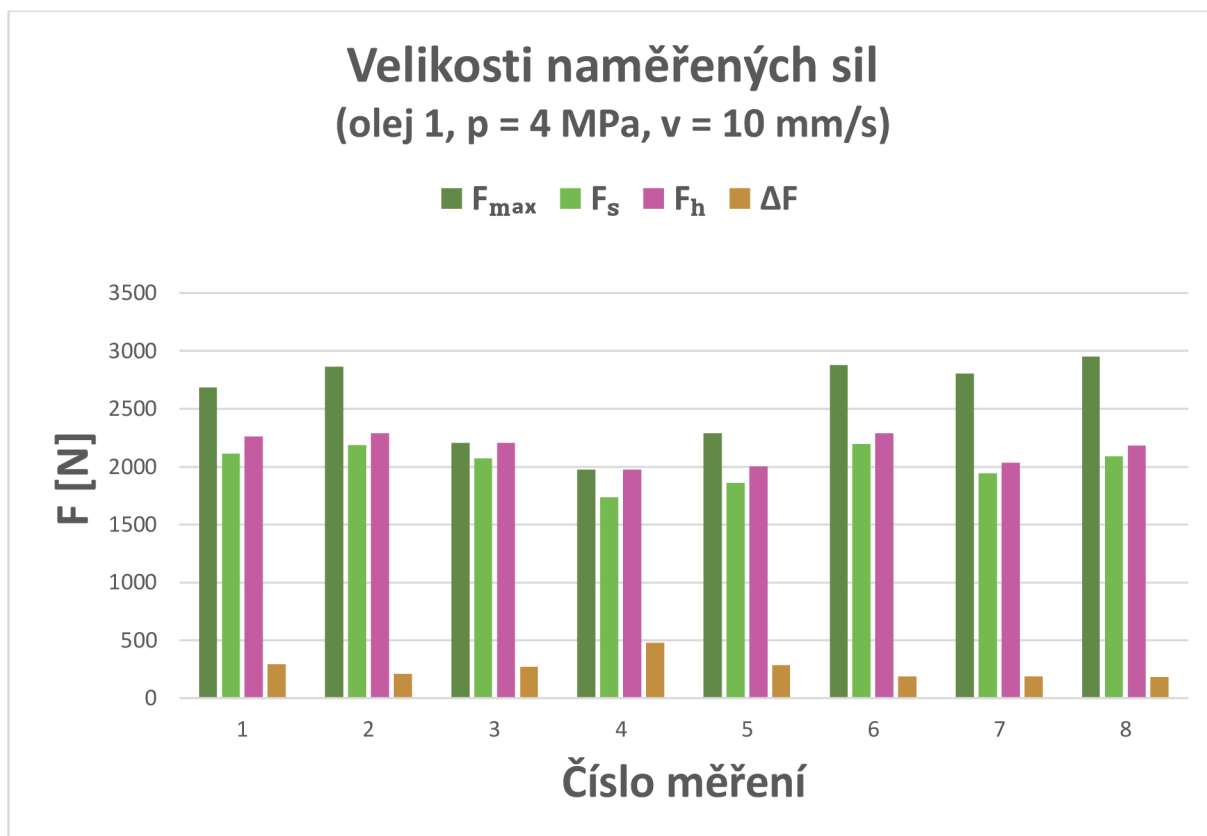
Obr. 31 Průměrné velikosti síly F_h a koeficientu tření μ pro rychlost 1 mm/s (olej 1)

Na obr. 32 jsou vidět průměrné hodnoty zbylých měřených sil při všech kontaktních tlacích.

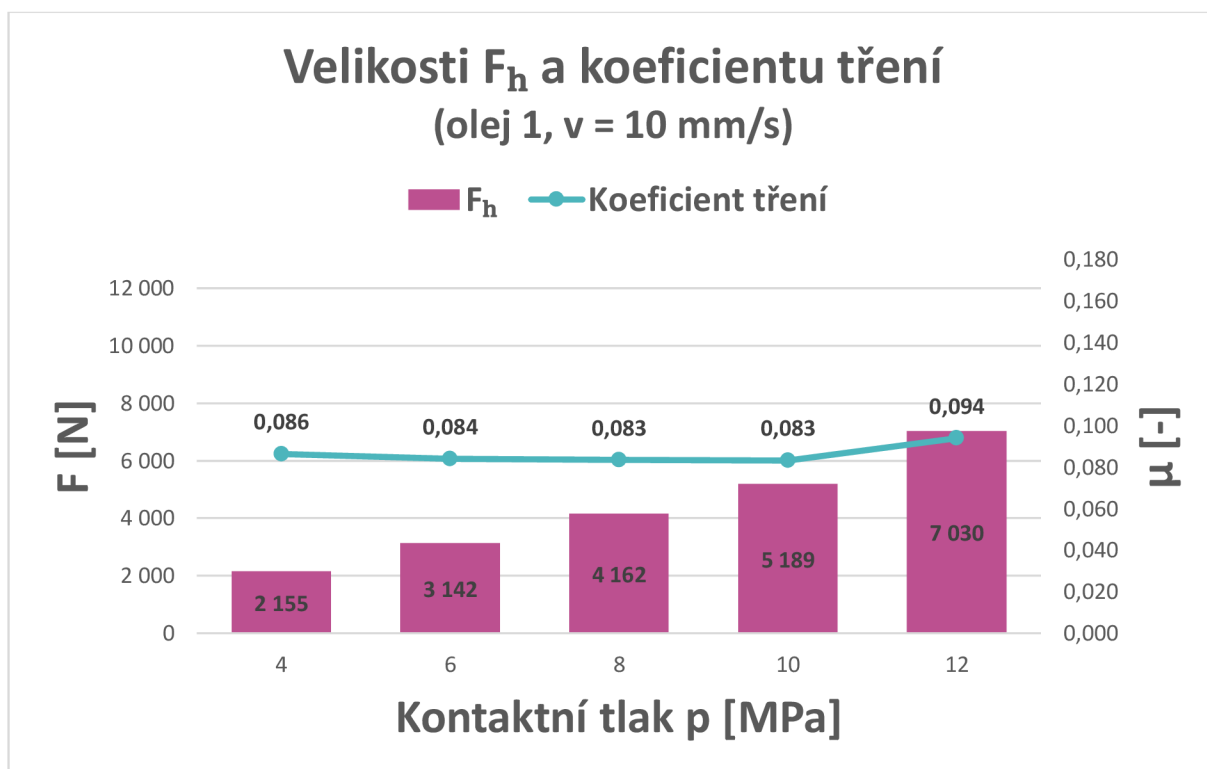


Obr. 32 Průměrné velikosti měřených sil pro rychlost 1 mm/s (olej 1)

Vzorky s rychlostí posuvu 10 mm/s se měřily obdobným způsobem. Opět bylo měřeno 8 vzorků na dráze 500 mm. Tlaky byly postupně zvyšovány identickým způsobem diskrétně od 4 až do 12 MPa. Na obr. 33 a obr. 34 jsou zobrazeny výsledné změřené síly a vypočítané koeficienty tření. Velikosti sil a koeficientů tření byly nižší, než u rychlosti posuvu 1 mm/s. Obzvláště síla ΔF byla podstatně menší. Toto je způsobeno pozinkovaným povrchem testovacích vzorků, který má tendenci se tzv. zadírat při nižších rychlostech posuvu.



Obr. 33 Výsledky měření pro kontaktní tlak 4 MPa a rychlost 10 mm/s (olej 1)



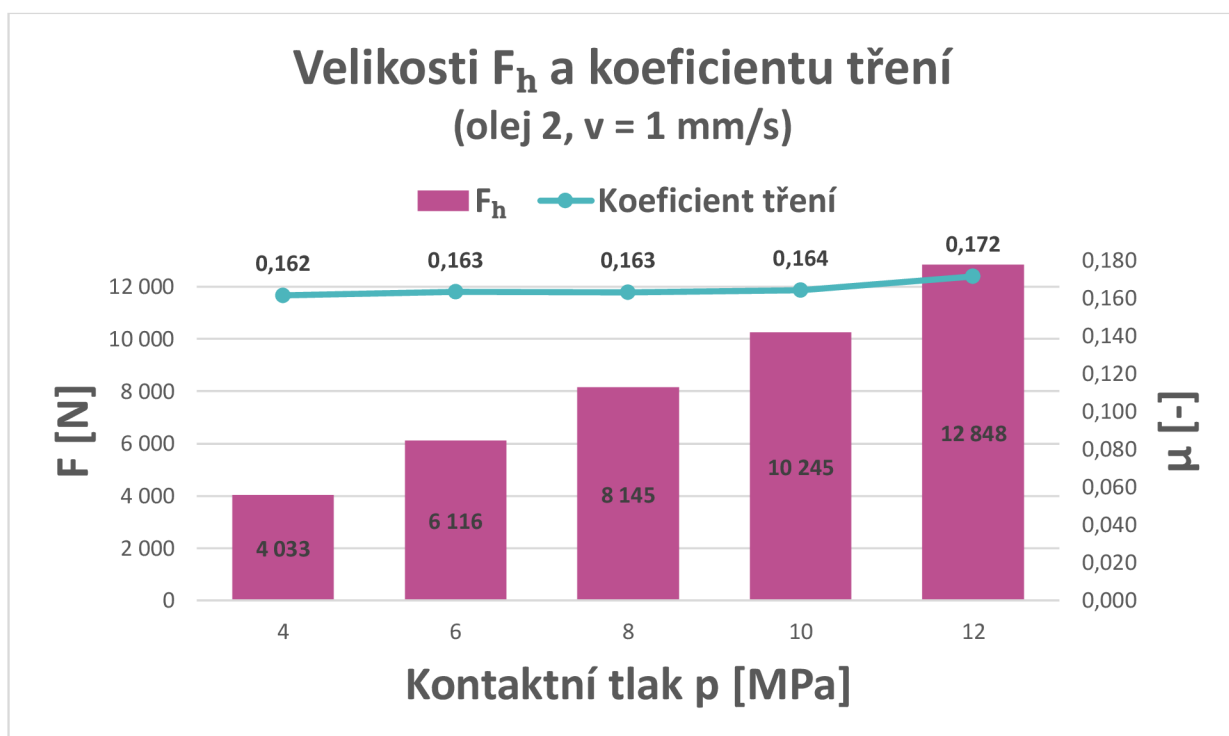
Obr. 34 Průměrné velikosti síly F_h a koeficientu tření μ pro rychlost 10 mm/s (olej 1)

3.4 Postup měření oleje 2

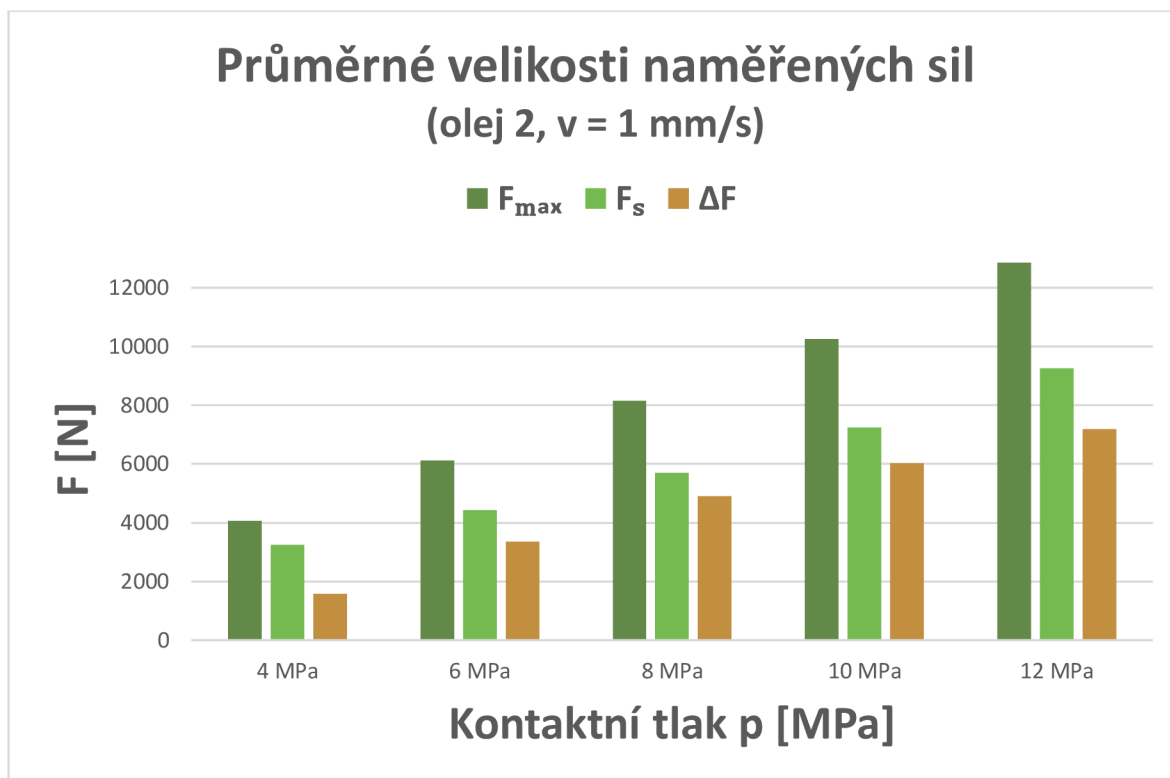
Měření oleje 2 probíhalo identicky jako měření oleje 1. Pouze před měřením byly čelisti opět ošetřeny acetonem a brusným papírem pro odstranění veškerých stop po oleji 1. Následně probíhalo 8 měření pro rychlost posuvu 1 mm/s a 8 měření pro rychlost 10 mm/s. Tlak se opět diskrétně měnil od 4 do 12 MPa. Výsledné průměrné hodnoty síly F_h a koeficientu tření μ jsou uvedeny v tab. 5 a graficky zobrazeny na obr. 35. Průměrné hodnoty ostatní sil jsou na obr. 36 vyneseny do grafu.

Tab. 5 Průměrná síla F_h a koeficient tření μ pro rychlost 1 mm/s (olej 2)

	Kontaktní tlak [MPa]									
	4		6		8		10		12	
	F_h [N]	μ [1]	F_h [N]	μ [1]	F_h [N]	μ [1]	F_h [N]	μ [1]	F_h [N]	μ [1]
\bar{x}	4 033	0,162	6 116	0,163	8 145	0,163	10 245	0,164	12 848	0,172
s	372	0,015	430	0,011	556	0,011	441	0,007	633	0,008



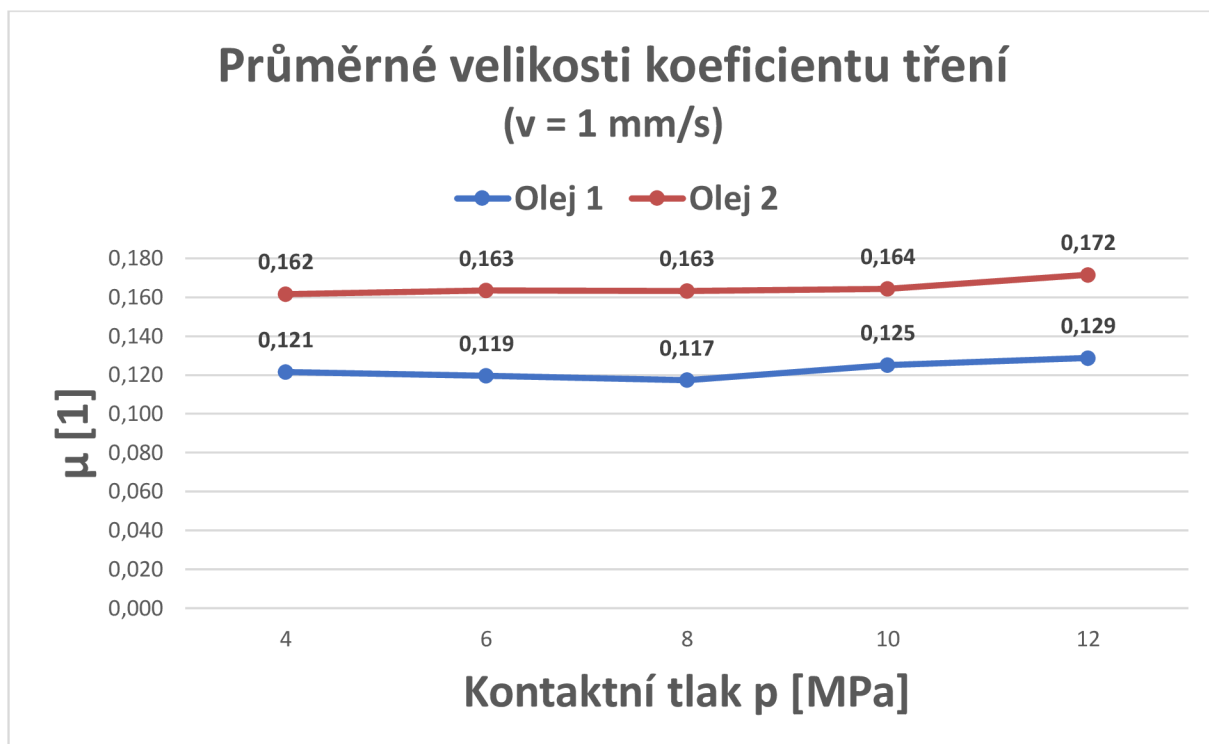
Obr. 35 Průměrné velikosti síly F_h a koeficientu tření μ pro rychlost 1 mm/s (olej 2)



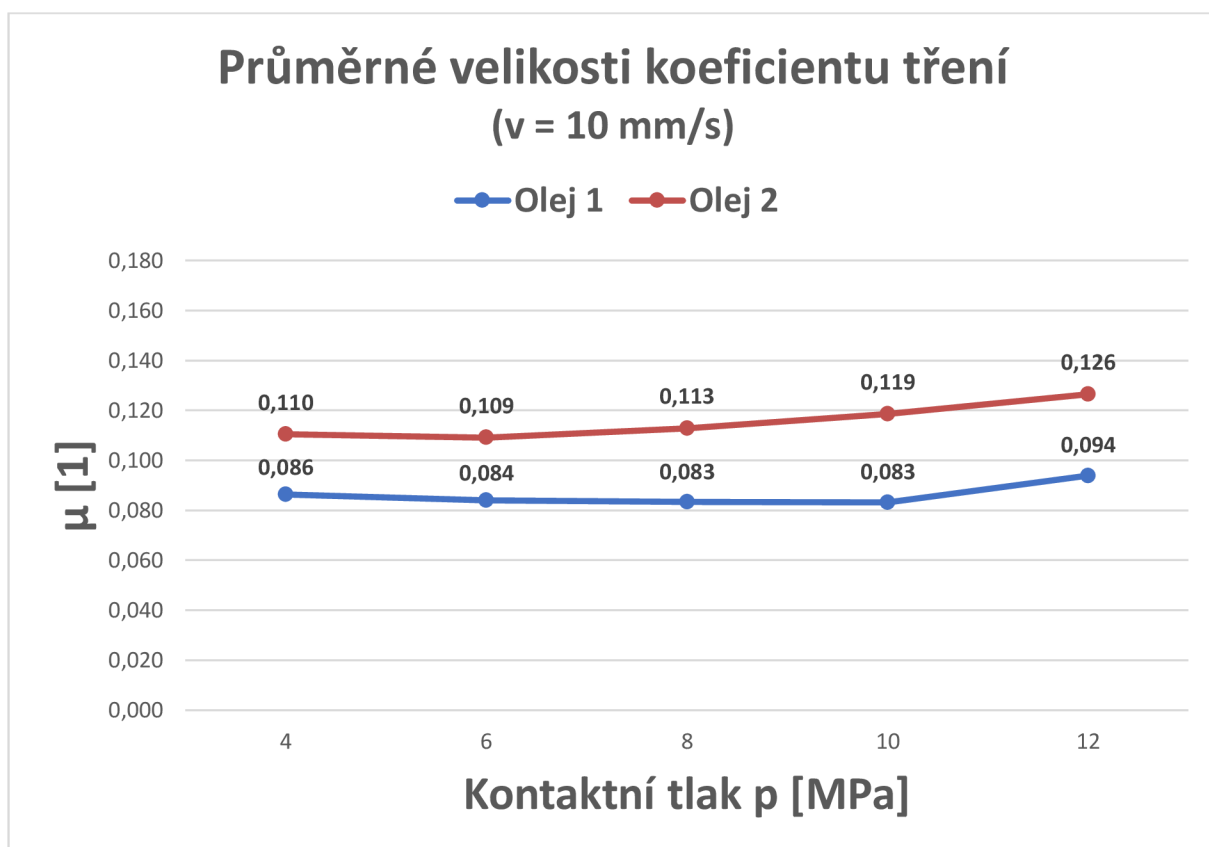
Obr. 36 Průměrné velikosti měřených sil pro rychlost 1 mm/s (olej 2)

3.5 Porovnání naměřených dat

V této kapitole jsou porovnány veškeré výsledky z měření. Hlavním cílem je porovnat velikosti koeficientů tření μ u obou olejů. Dále pak také velikosti jednotlivých protahovacích sil u každého oleje. Na obr. 37 jsou porovnány velikosti koeficientu tření každého oleje při rychlosti posuvu 1 mm/s. Na obr. 38 jsou tytéž hodnoty, ale pro rychlost 10 mm/s. Je zřejmé, že hodnoty koeficientu tření jsou vyšší při použití oleje 2.



Obr. 37 Průměrné velikosti koeficientu tření pro rychlost 1 mm/s



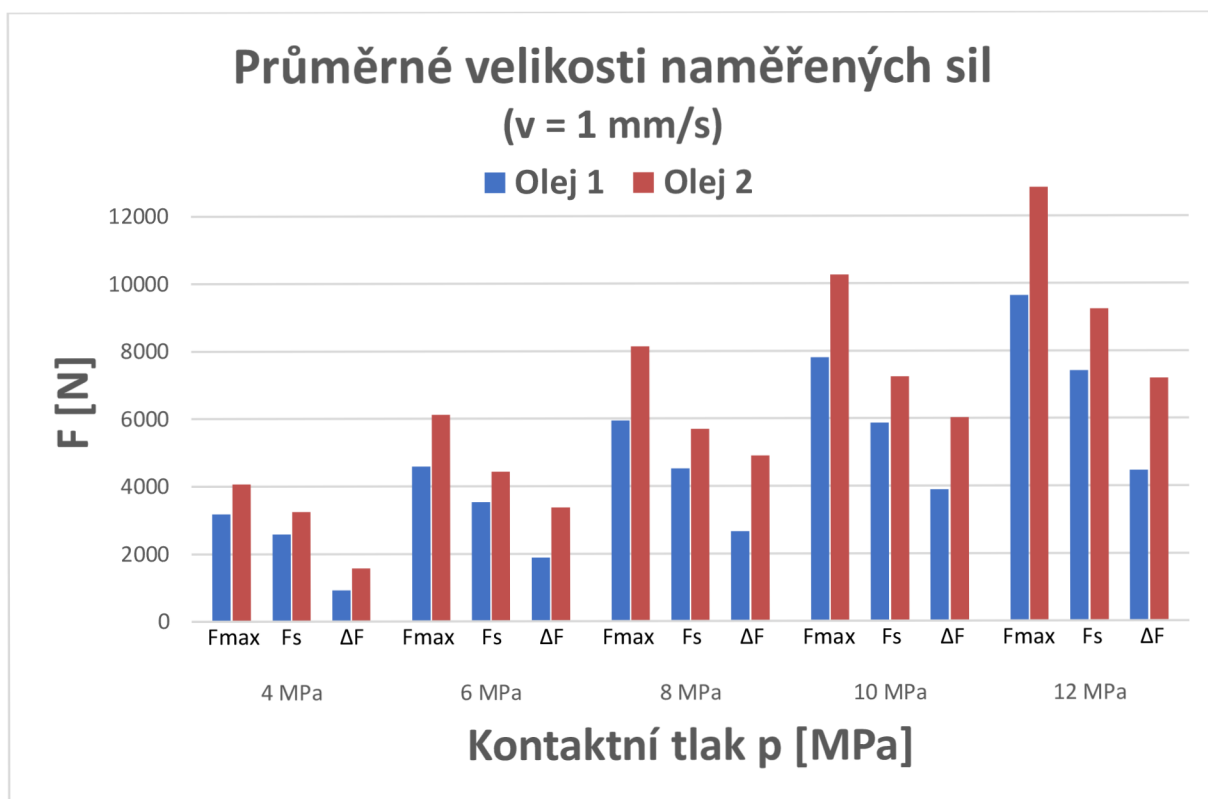
Obr. 38 Průměrné velikosti koeficientu tření pro rychlost 10 mm/s

V následující tab. 6 jsou porovnány procentuální nárůsty velikosti koeficientu tření oleje 2. Hodnoty oleje 1 jsou uvažovány jako referenčních 100 %. Vůči nim jsou vždy vypočítány procentuální nárůsty koeficientu tření μ oleje 2 a to zvláště pro každý tlak.

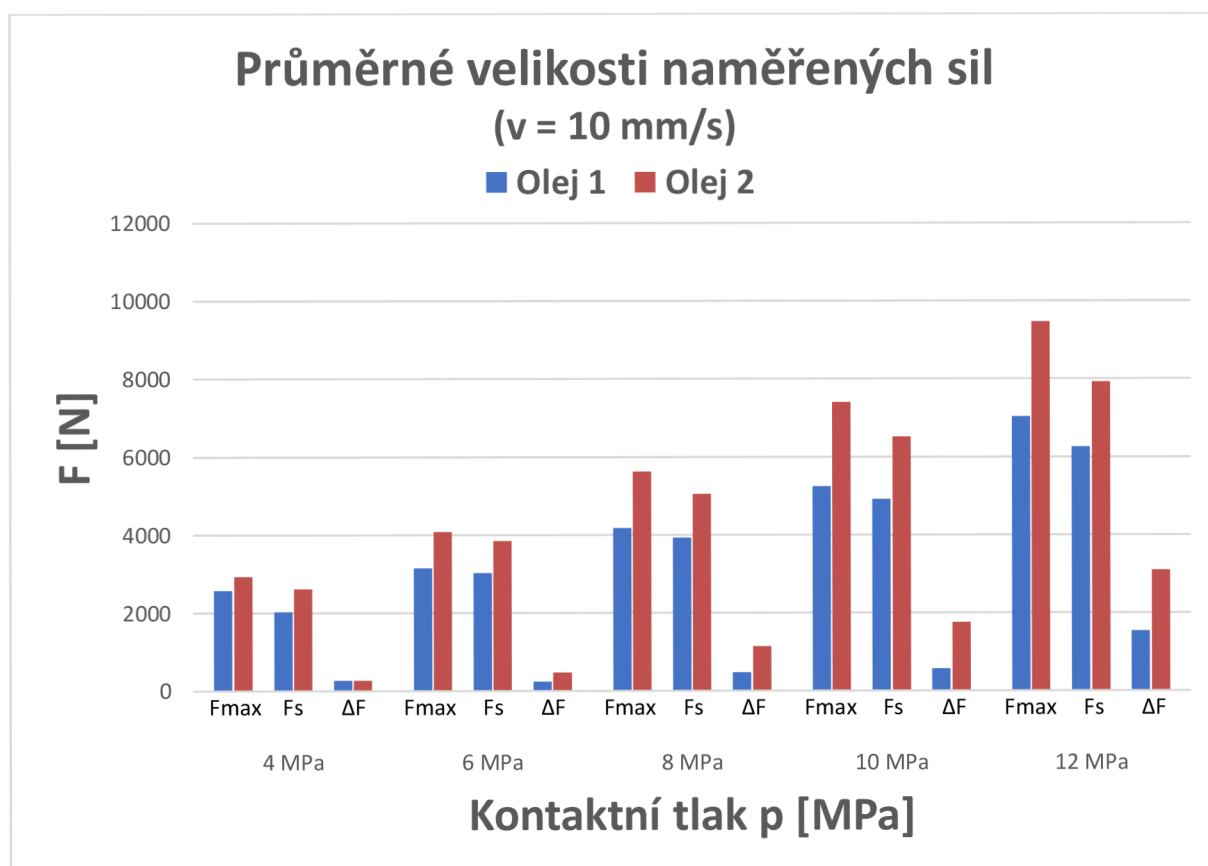
Tab. 6 Procentuální porovnání koeficientů tření oleje 2 proti oleji 1

Rychlost [mm/s]	Tlak [MPa]	μ – Olej 1		μ – Olej 2	
		[1]	[%]	[1]	[%]
1	4	0,121	100,0 %	0,162	133,0 %
	6	0,119		0,163	136,7 %
	8	0,117		0,163	139,1 %
	10	0,125		0,164	131,3 %
	12	0,129		0,172	133,2 %
10	4	0,086	100,0 %	0,110	127,8 %
	6	0,084		0,109	130,0 %
	8	0,083		0,113	135,2 %
	10	0,083		0,119	142,6 %
	12	0,094		0,126	134,7 %

V rámci porovnání protahovacích sil jsou na obr. 39 a obr. 40 vyneseny jejich hodnoty pro olej 1 a olej 2 při obou měřených rychlostech. Na první pohled je patrné, že k protahování s použitím oleje 2 je potřeba větší síla. Zároveň „kmitání“ síly ΔF v ustálené oblasti je větší při použití oleje 2.



Obr. 39 Velikosti měřených sil pro rychlost 1 mm/s



Obr. 40 Velikosti měřených sil pro rychlost 10 mm/s

3.6 Statistické vyhodnocení naměřených dat

Všechna naměřená a následně vypočítaná data byla podrobena statistické analýze rozptylu ANOVA (dvoufaktorová) na hladině významnosti $\alpha = 5 \%$. Cílem bylo ověřit, zda na hodnotu koeficientu tření μ mají statisticky významný vliv zvolené faktory. Prvním faktorem F1 byl vliv druhu použitého oleje a druhým faktorem F2 byl vliv velikosti kontaktního tlaku p testovacích čelistí. Pro každou rychlost posuvu byla provedena samostatná analýza. Výsledky pro rychlost 1 mm/s jsou uvedeny v tab. 7 a pro rychlost 10 mm/s jsou výsledky v tab. 8 [21].

Tab. 7 Dvoufaktorová analýza rozptylu pro rychlost posuvu 1 mm/s

Faktor	p – hodnota	F	F _{krit}	Statisticky významný vliv
F1 – druh oleje	$2,21 \cdot 10^{-28}$	334,734	3,978	MÁ
F2 – kontaktní tlak	0,0575	2,407	2,503	NEMÁ
F1 – F2 interakce	0,890	0,280	2,503	NEMÁ

1) Faktor F1 – vliv druhu oleje

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

2) Faktor F2 – vliv kontaktního tlaku

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

3) Faktor F1-F2 – vliv interakcí druhu oleje a kontaktního tlaku

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

Tab. 8 Dvoufaktorová analýza rozptylu pro rychlost posuvu 10 mm/s

Faktor	p – hodnota	F	F _{krit}	Statisticky významný vliv
F1 – druh oleje	8,4*10 ⁻²⁶	271,755	3,978	MÁ
F2 – kontaktní tlak	3,9*10 ⁻⁵	7,584	2,503	MÁ
F1 – F2 interakce	0,220	1,471	2,503	NEMÁ

1) Faktor F1 – vliv druhu oleje

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

2) Faktor F2 – vliv kontaktního tlaku

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

3) Faktor F1-F2 – vliv interakcí druhu oleje a kontaktního tlaku

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

V tab. 9 je uvedeno celkové vyhodnocení statistické analýzy rozptylu ANOVA na hladině významnosti $\alpha = 5\%$ pro sledovaný parametr koeficient tření.

Tab. 9 Vyhodnocení statistické analýzy rozptylu

Sledovaný parametr	Rychlost posuvu [mm/s]	Faktor	Statisticky významný vliv
Koeficient tření μ [1]	1	F1 – druh oleje	MÁ
		F2 – kontaktní tlak	NEMÁ
		F1 – F2 interakce	NEMÁ
	10	F1 – druh oleje	MÁ
		F2 – kontaktní tlak	MÁ
		F1 – F2 interakce	NEMÁ

4 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo analyzovat tribologické vlastnosti nové generace maziv používaných v automobilovém průmyslu. Hlavní cíl tohoto výzkumu bylo porovnání tribologických vlastností aktuálně používaného (olej 1) a nově vyvinutého oleje (olej 2) a posouzení, zda olej 2 vykazuje lepší tribologické vlastnosti než olej 1. Pro stanovení vlivu oleje bylo zapotřebí experimentální zjištění koeficientu tření při použití daného oleje a statistické vyhodnocení naměřených dat. Tento experiment byl prováděn v laboratořích KSP pomocí tribologické zkoušky protahováním pásku.

Tato tribologická zkouška protahováním pásku (označovaná jako 1B) byla prováděna na testovacím zařízení SOKOL 400. Každým olejem bylo namazáno 8 zkušebních pásků, které byly testovány při rychlosti posuvu 1 mm/s a poté 8 pásků testovaných při rychlosti 10 mm/s. Zároveň byl v průběhu každé zkoušky postupně diskrétně zvyšován kontaktní tlak z hodnoty 4 MPa až na 12 MPa (po 2 MPa). Pomocí tenzometrické hlavy byla na PC zaznamenávána velikost síly potřebné k protažení pásku. Ze zaznamenaných dat byly vypočítány velikosti příslušných tribologických sil a koeficientů tření. Výsledné hodnoty byly přehledně zaznamenány do tabulek a vyneseny do grafů. Při porovnání velikostí tribologických sil bylo patrné, že na protahování s použitím oleje 2 je potřeba vyšší síly, než při použití oleje 1. Této skutečnosti si bylo možné všimnout dále v tab. 6 a v následujících grafech, kde byl očividně koeficient tření vyšší zhruba o 35 % při použití oleje 2. Pro ověření tohoto předpokladu byla všechna vypočítaná data podrobena dvoufaktorové statistické analýze rozptylu na hladině významnosti 5 %, za účelem zjištění vlivu druhu použitého oleje a velikosti kontaktního tlaku. Pro obě rychlosti posuvu vyšel vliv druhu použitého oleje jako statisticky významný. Pro rychlost 10 mm/s vyšla velikost kontaktního tlaku také jako statisticky významná. Nicméně pro rychlost 1 mm/s vyšlo, že na hladině významnosti 5 % nemá velikost kontaktního tlaku statisticky významný vliv na změnu koeficientu tření.

Výsledek ANOVY z hlediska vlivu druhu použitého oleje nebyl nijak překvapivý a lze tedy konstatovat, že olej 2 má horší tribologické vlastnosti a je méně vhodný pro mazání při tažení plechu v automobilovém průmyslu. Poněkud překvapivý byl vliv velikosti kontaktního tlaku na koeficient tření, kdy rostoucí kontaktní tlak ovlivňoval koeficient tření až při rychlosti 10 mm/s, nikoliv při rychlosti 1 mm/s. Pro ověření tohoto trendu lze doporučit provedení testování na větším počtu vzorků, ověřit vliv zadírání použitím plechu s jinou povrchovou úpravou než je pozinkování, zvolit širší rozsah kontaktních tlaků a rychlostí posuvu, popřípadě zjistit vliv pracovní teploty čelistí.

5 Seznam použité literatury

- [1] MANG, Theo. *Industrial Tribology: Tribosystems, Friction, Wear and Surface Engineering, Lubrication*. Weinheim: WILEY-VCH, 2011. ISBN 978-3-527-32057-8.
- [2] KOLNEROVÁ, Michaela. *Vliv technologických podmínek na vznik zadírání pozinkovaných plechů při tažení* [online]. B.m., 2005 [vid. 2022-02-26]. Disertační práce. Technická Univerzita v Liberci. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/38797>
- [3] BLAŠKOVITŠ, Pavel, Jozef BALLA a Marián DZIMKO. *Tribológia*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1990. ISBN 80-05-00633-0.
- [4] ČTVRTEČKA, Daniel. *Stanovení vlivu množství maziva na velikost koeficientu tření* [online]. B.m., 2021 [vid. 2022-02-27]. Diplomová práce. Technická Univerzita v Liberci. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/160727>
- [5] MÜCK, Jonáš. *Maziva vhodná pro tažení nerezavějící oceli* [online]. B.m., 2014 [vid. 2022-02-27]. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: <http://dspace.vutbr.cz/handle/11012/39252>
- [6] STACHOWIAK, Gwidon W. a Andrew W. BATCHELOR. *Engineering tribology. Fourth edition*. B.m.: Oxford: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN 978-0-12-397047-3.
- [7] MENG, Yonggang, Jun XU, Zhongmin JIN, Braham PRAKASH a Yuanzhong HU. A review of recent advances in tribology. *Friction* [online]. 2020, **8**(2), 221–300. ISSN 2223-7704. Dostupné z: doi:10.1007/s40544-020-0367-2
- [8] MENDŘICKÝ, Radomír. *Modelování a identifikace tření u vysoce přesných polohových servomechanismů* [online]. B.m., 2006 [vid. 2022-02-26]. Disertační práce. Technická Univerzita v Liberci. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/38804>
- [9] CORTÉS GUTIÉRREZ, Jairo Alejandro. *Tribometer set-up and friction coefficient in elastomers of sealing systems* [online]. B.m., 2014 [vid. 2022-02-28]. Thesis. Collegio di Ingegneria Informatica, del Cinema e Meccatronica. Dostupné z: <http://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/16508>
- [10] HELEBRANT, František, Ladislav HRABEC a Jan BLATA. *Provoz, diagnostika a údržba strojů* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3028-5. Dostupné z: <https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/340/content/galerie-souboru/vyuka/Provoz-diagnostika-a-udrzba-stroju-studijni-material.pdf>
- [11] SOLFRONK, Pavel. *Vliv morfologie povrchu plechu na rozvoj deformace při tažení výlisků z plechu* [online]. B.m., 2002 [vid. 2022-02-26]. Disertační práce. Technická Univerzita v Liberci. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/38720/U_361S.pdf?sequence=1

- [12] BRUCE, Robert W. *Handbook of lubrication and tribology*. B.m.: CRC Press, 2012. ISBN 978-1-4200-6909-9.
- [13] MANG, Theo. *Lubricants and lubrication*. Weinheim: WILEY-VCH, 2007. ISBN 978-3-527-31497-3.
- [14] Design, commissioning and testing of gas bearing turbo compressors with gases other than air [online]. 2016 [vid. 2022-3-4]. Dostupné z: <https://www.celeroton.com/en/technology/tech-blog/detail/design-commissioning-and-testing-of-gas-bearing-turbo-compressors-with-gases-other-than-air.html>
- [15] Plastická maziva - tuky [online]. 2013 [vid. 2022-3-4]. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20131008152754/https://www.eni.com/cz_CZ/produkty-sluzby/plasticka-maziva/plasticka-maziva.shtml
- [16] SLEZÁK, Pavel. *Vliv odpařování olejů na tribologické vlastnosti a pevnost lepených spojů v odlupu u hlubokotažných plechů* [online]. B.m., 2008 [vid. 2022-03-05]. Diplomová práce. Technická Univerzita v Liberci. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/2551>
- [17] ČÁBELOVÁ, Kateřina. *Porovnání vlivu velikosti kontaktní plochy na koeficient tření při tribologickém testování* [online]. B.m., 2008 [vid. 2022-03-06]. Diplomová práce. Technická Univerzita v Liberci. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/2543>
- [18] ZBRÁNEK, Ivo. *Vliv technologických parametrů (rychlosti, teploty a tlaku) na velikost koeficientu tření při tažení plechů s povlaky Zn* [online]. B.m., 2004 [vid. 2022-03-06]. Diplomová práce. Technická Univerzita v Liberci. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/147916>
- [19] TULKA, Jaromír. *Povrchové úpravy materiálů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2005. ISBN 80-214-3062-1.
- [20] Encyclopædia Britannica, Inc. Zinc processing [online]. 1999 [vid. 2022-3-12]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/zinc-processing/The-metal-and-its-alloys>
- [21] NEUBAUER, Jiří, Marek SEDLAČÍK a Oldřich KŘÍŽ. *Základy statistiky: aplikace v technických a ekonomických oborech*. Praha: Grada, 2016. ISBN 978-80-247-5786-5.