

Česká zemědělská univerzita v Praze



Technická fakulta

Vlastnosti a použití nano-olejů ve spalovacích motorech

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Vladimír Hönig, Ph.D. et Ph.D.

Autor: Vít Šulc

Praha, 2020

Prohlášení

„Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Vlastnosti a použití nano-olejů ve spalovacích motorech vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Jsem si vědom, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí. Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.“

V Praze dne 8. 4. 2020

.....

Šulc Vít

Poděkování

Děkuji doc. Ing. Vladimíru Hönigovi, Ph.D. et Ph.D. za vedení této bakalářské práce, za jeho ochotu, odborné rady a připomínky, které mi během psaní práce poskytoval. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Petru Vejvodovi a Karlu Vomáčkovi za odborné konzultace týkající se nano-olejů, studentskému týmu CULS Prague Formula Racing a rodině za podporu, během mého vysokoškolského studia.

Abstrakt: Tato bakalářská práce pojednává o vlastnostech a konkrétním použití motorových olejů vybavených nanotechnologií. Nejdříve jsou zde pro lepší pochopení souvislostí probrány základní teoretická východiska z oblasti zpracování ropy, tribotechniky, tření a opotřebení, problematika motorových olejů a jejich vlastností, aditiva a jejich funkce. Nano-oleje jsou zde zpracovány jako samostatná kapitola, ve které jsou uvedeny nejznámější nanočástice, které se do olejů přidávají. Je vysvětleno, z jakého důvodu mají vliv na vlastnosti oleje, tzn. jsou zde popsány zejména mechanismy funkce jednotlivých nanočástic. Použití nano-olejů je vysvětleno na konkrétním příkladu z prostředí mezinárodní soutěže Formule student. Dále jsou zde v praktické části ověřovány, porovnávány a vyhodnocovány vlastnosti nano-olejů společně s běžnými motorovými oleji pomocí zejména High-Frequency Reciprocating Rig (HFFR) testu. Po vyhodnocení měření bylo zjištěno, že dopad nanočástic na vlastnosti olejů není zanedbatelný. U nano-olejů bylo skutečně prokázáno zlepšení koeficientu tření a zlepšení stability olejového filmu. Součástí práce je také diskuze a ekonomické vyhodnocení, v závěru je odpovězeno na hypotézu.

Klíčová slova: Motorový olej, Spalovací motor, Tribotechnická diagnostika, Formule Student, Nano-olej.

Properties and use of nano-oils in internal combustion engines

Summary: This bachelor thesis is about features and the exact use of nanotechnical engine oils. For a better understanding of the context, there are a basic theoretical basis about using the petroleum, about tribotechnics, friction and wear, about problems of engine oils, and use of additives, explained at the beginning of this thesis. Nano oils are explained in their own chapter, including the part about the most known nanoparticles used in the engine oils. Also the exact reasons for their effects to the features of the oils are explained there, which means the actual mechanisms of the nanoparticles. The use of the nano oils is explained with the particular example from an international competition Formula Student. In the practical part of this thesis, there are comparisons between nano oils and common engine oils in terms of verification and evaluation. For these comparisons, the High Frequency Reciprocating Rig (HFFR) test was used. The results of the tests showed the not negligible impact of nanoparticles to the features of the oils. The nano oils proved that their features could improve coefficient of friction and also the stability of the oil film. The hypothesis of this bachelor thesis is answered through a discussion, described below, and also through economic evaluation.

Key words: Engine oil, combustion engine, tribotechnical diagnostics, formula student, nano oil

Cíl práce

Cílem práce je porovnat parametry a vlastnosti nano-olejů se standardními motorovými oleji.

Metodika

1. Prostudovat základní literaturu, normy, internetové odkazy a další prameny;
2. Provést literární rešerši v oblasti maziv zajistit vzorky olejů;
3. Provést vlastní analýzu a uvést nové teoretické předpoklady a názory;
4. experimentálně vyhodnotit vybrané parametry nano-olejů.

Doporučený rozsah práce

30

Hypotéza

Opotřebení oleje odpovídá převládajícímu typu provozu stroje.

Obsah

| | |
|---|---|
| Poděkování | 3 |
| Abstrakt: | 4 |
| Klíčová slova: | 4 |
| Properties and use of nano-oils in internal combustion engines..... | 4 |
| Summary:..... | 4 |
| Key words:..... | 5 |
| 1 Úvod..... | 1 |
| 2 Teoretická východiska..... | 2 |
| 2.1 Ropa jako základní surovina pro výrobu olejů | 2 |
| 2.1.1 Složení ropy | 2 |
| 2.1.2 Elementární složení ropy | 3 |
| 2.1.3 Zpracování ropy | 3 |
| 2.2 Tribotechnika | 5 |
| 2.2.1 Tribologie..... | 5 |
| 2.2.2 Tribotechnika | 5 |
| 2.2.3 Tribodiagnostika | 5 |
| 2.2.4 Mazivo | 5 |
| 2.2.5 Rozdělení maziv..... | 6 |
| 2.3 Tření a opotřebení | 6 |
| 2.3.1 Tření | 6 |
| 2.3.2 Třecí síla a koeficient tření..... | 6 |
| 2.3.3 Druhy tření | 7 |
| 2.3.4 Opotřebení..... | 7 |

| | | |
|-------|---|----|
| 2.3.5 | Druhy opotřebení | 8 |
| 2.4 | Motorové oleje | 9 |
| 2.4.1 | Žádoucí parametry na motorové oleje | 10 |
| 2.4.2 | Nežádoucí parametry motorového oleje | 10 |
| 2.4.3 | Doporučené parametry motorového oleje | 10 |
| 2.5 | Základové oleje | 11 |
| 2.5.1 | Minerální oleje | 11 |
| 2.5.2 | Polosyntetické oleje | 11 |
| 2.5.3 | Syntetické oleje | 11 |
| 2.5.4 | Klasifikace kapalin na syntetické bázi | 12 |
| 2.6 | Aditiva | 12 |
| 2.6.1 | Rozdělení aditiv podle chemické struktury | 13 |
| | Nepolární aditiva | 13 |
| | Polární aditiva | 13 |
| 2.6.2 | Aditivní přísady | 13 |
| 2.7 | Vlastnosti olejů | 15 |
| 2.7.1 | Viskozita | 15 |
| 2.7.2 | Dynamická viskozita | 15 |
| 2.7.3 | Kinematická viskozita | 16 |
| 2.7.4 | Viskozitní index | 17 |
| 2.7.5 | Viskozitně tlaková závislost | 18 |
| 2.7.6 | Mazivost | 18 |
| 2.7.7 | Maznost | 19 |
| 2.7.8 | Mazací schopnost | 19 |

| | | |
|--------|---|----|
| 2.8 | Klasifikace motorových olejů | 20 |
| 2.8.1 | Viskozitní klasifikace | 20 |
| 2.8.2 | Výkonnostní klasifikace | 21 |
| 2.9 | Nano-oleje | 22 |
| 2.9.1 | Nano-oleje s Fullereny | 22 |
| 2.9.2 | Nano-oleje obsahující nano-diamanty | 25 |
| 2.9.3 | Oleje aditivované kyselinou boritou | 26 |
| 2.9.4 | Oleje obohacené o nanodisperzi Polytetrafluorethylenu (PTFE) | 26 |
| 2.10 | Použití nano-olejů v praxi | 26 |
| 2.10.1 | Formule Student | 27 |
| 2.10.2 | Pohonná jednotka monopostu týmu CULS Prague Formula Racing | 28 |
| 2.10.3 | Podmínky provozu | 28 |
| 2.10.4 | Požadavky na motor a jeho úpravy | 29 |
| 3 | Cíl práce a metodika | 30 |
| 3.1 | Cíl práce | 30 |
| 3.2 | Metodika měření | 31 |
| 4 | Vyhodnocení experimentu | 32 |
| 4.1 | Porovnání motorového oleje s nanočásticemi a oleje bez nanočástic | 32 |
| 5 | Diskuze | 35 |
| 5.1 | Diskuze výsledků | 35 |
| 5.2 | Ekonomické zhodnocení | 35 |
| 6 | Závěr | 36 |
| 7 | Zdroje | 37 |
| 8 | Příloha | 39 |

1 Úvod

Spalovací motor je složitý stroj, který obsahuje řadu pohyblivých součástí. Jeho výkon, škodlivé emise výfukových plynů, spotřeba paliva i ztráty třením úzce souvisí mimo jiné s třecí silou a opotřebením mezi pohyblivými součástkami motoru, mezi které patří především pístní skupina, ložiska, vačky a zdvihátka ventilů. U většiny spalovacích motorů dosahují ztráty vlivem tření cca 17 až 19 % z celkového výkonu, což jsou nezanedbatelně velké hodnoty. [1]

Konstruktéři dnešních motorů se musí minimalizací tření v motoru intenzivně zabývat, protože požadavky na motory se nejen ze strany zákazníků neustále zvyšují. Motory musí plnit přísné emisní limity a zákazníci chtějí malé náklady na údržbu, nízkou spotřebu paliva a vysoký výkon, který v současné době běžně přesahuje 65 kW/l. U motorů pro závodní účely hraje snižování ztrát také významnou roli. Zejména tam, kde je omezen vstup vzduchu do motoru tzv. restriktorem se konstruktéři snaží důrazně snížit všechny ztráty v motoru počínaje třením. Ne jinak tomu je v týmu CULS Prague Formula Racing, který se intenzivně zabývá vývojem motoru pro svůj závodní monopost určený pro mezinárodní soutěž Formule student. [2]

Cest ke snižování tření je hned několik. První z nich je úprava konstrukce motoru, kde se konstruktér snaží minimalizovat kontakt jednotlivých součástí mezi sebou. K tomu slouží různé druhy ložisek, díky kterým se dostávají hodnoty třecích ztrát na minimální hodnoty. Další možností je použití úprav povrchů součástí. Velmi často je používáno speciálních povlaků, které zajišťují lepší chemickou odolnost, delší trvanlivost a vynikající tribologické vlastnosti. Třetí možností snižující tření je vhodná volba motorového oleje. Pro různé aplikace jsou používány různé motorové oleje s rozdílnými vlastnostmi, podle toho na čem nejvíce záleží. Současným trendem i nadále zůstává prodlužování servisních intervalů, aby se snížil dopad na životní prostředí a dále snižování viskozity za účelem snížení spotřeby paliva. V současné době také přibývá aplikací, kde už nestačí vylepšování vlastností motorových olejů standardními přísadami, a tak nastupují nové technologie. Jednou z nich je vylepšování vlastností motorových olejů nanočásticemi. Vzniklé nano-oleje, kterými se tato práce zabývá, pak mají jiné vlastnosti než běžné motorové oleje.

2 Teoretická východiska

2.1 Ropa jako základní surovina pro výrobu olejů

Ropa je základní surovinou pro výrobu základových olejů, tvořících více než podstatnou část finálního výrobku-motorového oleje. Ropu lze charakterizovat jako hořlavou olejovitou kapalinu bohatou na směs kapalných uhlovodíků různých struktur. Ložiska ropy se nacházejí po všech kontinentech, v různých hloubkách zemské kůry, i pod dnem moří a oceánů viz obr. 2.1.1. Ta ložiska, která byla blízko povrchu jsou již většinou vytěžena. Nová ložiska se nyní hledají v hloubkách 6 – 10 km. Ropa je používána různými způsoby v petrochemickém a chemickém průmyslu, vyrábí se z ní také motorové nafty, automobilový benzín, plynná paliva (CNG, LPG, atd.), letecká paliva, mazací oleje, topné oleje, ropný koks a asfalty.[3] [4]



Obrázek 2.1.1 Těžba ropy na moři [5]

2.1.1 Složení ropy

Ropa má většinou černou, výjimečně žlutohnědou barvu, hustota se pohybuje okolo 800 kg/m³ až výjimečně 1050 kg/m³ (většinou je lehčí než voda). V ropě jsou obsaženy především kapalně i tuhé uhlovodíky a zároveň organické sloučeniny, které mají v uhlíkovém skeletu jeden nebo více heteroatomů (síru, kyslík atd.). V nejtěžších podílech ropy jsou pak obsaženy i vysokomolekulární sloučeniny (pryskyřice, asfalteny, parafiny a cezíny) a organokovové sloučeniny s obsahem niklu a vanadu. Součástí ropy bývají také rozpuštěné plyny, a to především metan, etan, propan, butan, oxid siřičitý, sulfan někdy i dusík a vzácné plyny. Nelze však kvůli vysoké složitosti směsi uhlovodíků určit přesné složení ropy. Celosvětově je otevřených mnoho bohatých ropných ložisek a z každého ložiska se těží ropa, která se vzhledem, fyzikálními vlastnostmi a výtěžky produktů při zpracování liší od rop z jiných ložisek-často i blízkých. V podstatě však všechny běžně těžené ropy obsahují stejné složky a liší se jen vzájemným poměrem jednotlivých strukturních skupin a jednotlivých strukturních tříd.[3][4] [6]

2.1.2 Elementární složení ropy

Elementární složení ropy je zastoupeno z 84–87 % hm. uhlíkem, 11–14 % hm. vodíkem, 0,1–4 % hm. sírou, 0,01–1,0 % hm. dusíkem a 0,05–1,0 % hm. kyslíkem a také organicky vázanými kovy, jako již zmíněný vanad a nikl. Z výše uvedených procentuálních zastoupení je zřejmé, že převážnou část tvoří uhlovodíky a jejich modifikace.[3] [5]

2.1.3 Zpracování ropy

Před samotným zpracováním ropy za účelem získání jejích jednotlivých složek (frakcí) je nutné, aby došlo k odstranění emulgované vody a v ní obsažených solí. Při odsolování se k ropě přidává 3–10 % obj. čerstvé vody, která rozpustí dispergované soli a zároveň se postupně snižuje koncentrace solí v emulgované vodě. Odsolování probíhá při teplotě v rozmezí 90–150 °C. Do rafinerie musí být dopravena pouze čistá ropa, protože soli a některé další látky rozpuštěné v surové ropě by mohli poškodit technologické zařízení viz obr. 2.1.2 ať už korozi nebo např. zanesením různých ventilů a potrubí. [4]

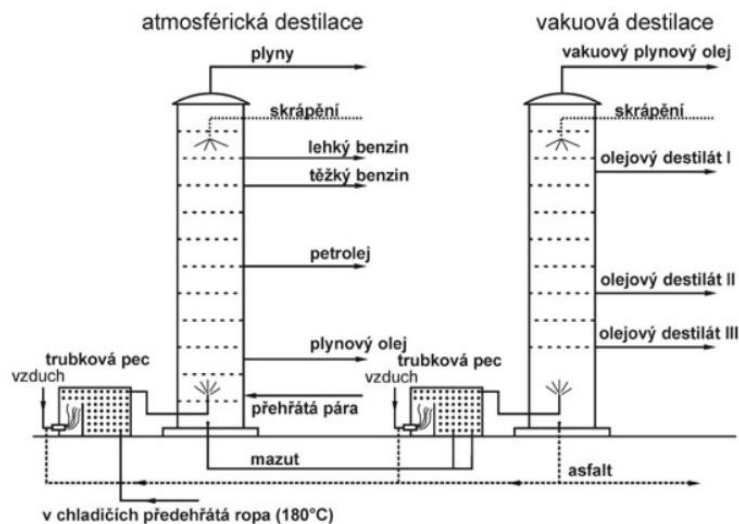


Obrázek 2.1.2 Technologická zařízení na zpracování ropy [5]

Dalším krokem je destilace, kde se z ropy získávají užší frakce s požadovaným rozmezím varu. Šířka požadované frakce se reguluje tak, aby spadala do destilačního rozmezí konečného výrobku a vyhovovala požadavkům následujícího rafinačního procesu. Základní dělení ropy na užší frakce na destilačních kolonách viz obr. 2.1.3 se provádí v podstatě ve dvou stupních. Nejdříve při přibližně atmosférickém tlaku (0,15 MPa) a následně na další koloně pracující za sníženého tlaku (2 až 10 kPa). Frakce motorových paliv vychází z atmosférické destilace, kde z hlavy atmosférické destilace vycházejí plyny (butany) a lehký benzin, z horních pater těžký benzin, ze středních a dolních petrolejová frakce a plynový olej. Zbytek z atmosférické destilace ropy (mazut) se většinou rozdestiluje vakuovou destilací. Vakuovou destilací jsou pak produkovány frakce olejové. Vakuová kolona, má menší počet pater než

atmosférická kolona a její průměr je větší, což je dáno tím, že objem par při nižším tlaku je větší než za normálního tlaku. Snížením tlaku se snižuje bod varu přítomných sloučenin, takže lze za teplot do 360 - 400 °C vydestilovat z ropy (mazutu) další frakce bez jejich termického rozkladu.[7] [5]

Zpracování ropy na výsledné produkty, rozhodně nekončí její destilací. Dále je za potřeby při výrobě konkrétně maziv zařadit do výroby i další technologie zpracování. Například oleje získané z vakuové destilace jsou dále rafinovány, přičemž dochází ke zlepšení základních vlastností olejů. Z olejů jsou také odstraněny parafíny odparafinováním, které by jinak zhoršovaly vlastnosti olejů při nízkých teplotách. Syntetické uhlovodíky se vyrábí za pomoci krakování, které pomáhá štěpit vysokovroucí ropné frakce na níževroucí světlé ropné frakce. Molekuly benzínu (C₅ až C₁₂) jsou krakovány na krátké řetězce molekul plynů jako Ethen C₂H₄ nebo Buthen C₄H₈. Tyto molekuly plynů jsou dále použity pro následnou syntézu, kde jsou molekuly chemicky sloučeny do molekul Poly-alfa-Olefinu (PAO) nebo Poly-iso-Butenu pomocí hydrogenace čímž dojde ke změně jejich struktury. Vakuovou destilací se pak syntetické produkty rozdělí podle různých teplot kondenzace na produkty o různých viskozitách. Poly-alfa-Olefiny jsou dále zpracovávány pomocí hydratace, kdy dochází k navazování atomů vodíku na určitá místa řetězců uhlovodíků. Dojde tak ke změně struktury a dalšímu zlepšení vlastností.[7]



Obrázek 2.1.3 Atmosférická a vakuová destilace ropy [8]

2.2 Tribotechnika

Pro pochopení souvislostí je zapotřebí nejdříve vymezit důležité pojmy.

2.2.1 Tribologie

Tribologie je mezioborovou vědou, zabývající se vzájemným působením povrchů tuhých těles při jejich relativním pohybu nebo při pokusech o jejich vzájemný pohyb a s tím související technologií. Tribologie je také naukou o vědeckém výzkumu, technickém použití zákonitostí a poznatků pro vědní obory tření, opotřebení a mazání. [7]

2.2.2 Tribotechnika

Význam slova tribotechnika pochází z řeckého tribos čili tření. Tento obor se komplexně zabývá praktickým řešením otázek, týkajících se tření, opotřebení a mazání. Obsahem tribotechniky jsou také metody pro zjištění stavu maziva a třecích ploch. Přesto, že se jedná o poměrně mladý obor, zabývá se tribotechnika velmi starou problematikou známou již z dob staveb prvních jednoduchých strojů. Při vzájemném pohybu drsných povrchů součástí vzniká tření a objevuje se zde odpor proti pohybu, jehož následkem je třecí síla. Zmenšovat tření napomáhá mazivo, které se může nacházet v jakémkoliv skupenství. [7]

2.2.3 Tribodiagnostika

Tento obor se zabývá především řešením dvou základních problémů. Prvním z nich je zjišťování kvality maziv a prognóza znehodnocení neboli degradace olejů. Druhým je pak zjištění místa a trend opotřebení mechanického systému.[5] [7]

2.2.4 Mazivo

Na maziva se v minulosti pohlíželo jako na pouze pomocné látky. V dnešní době se však obecně věnuje velká pozornost efektivitě provozu strojů a maziva zde hrají klíčovou roli. I proto je dnes mazivo považováno za jeden s konstrukčních prvků a musí se mu tedy věnovat náležitá pozornost již při konstrukci stroje. Hlavní úlohou maziv je zabránit bezprostřednímu styku povrchů ve vzájemném pohybu a dosáhnout zmenšení tření, čímž se eliminují ztráty energie, které by vznikly při absenci maziva a s ním souvisejícího opotřebení funkčních povrchů. [5][7]

2.2.5 Rozdělení maziv

Maziva můžeme podle stavu, ve kterém se právě nacházejí rozdělit na:

- a) Tuhá;
- b) Kapalná;
- c) Plastická;
- d) Plynná.

2.3 Tření a opotřebení

Trendy rozvoje současné techniky a výroby, mezi které bezesporu patří růst absolutních a měrných výkonů strojů, prudce se rozvíjející automatizace, rostoucí složitost vzájemných vazeb strojů atd. přináší problémy s třením a opotřebením. Proto je potřeba hledat nová technologická řešení, která umožní další rozvoj zařízení i při použití stejných druhů materiálů. [9]

2.3.1 Tření

Definice tření se prakticky téměř nezměnila od doby Leonarda Da Vinci, došlo však ke zpřesnění názorů na jeho druhy. Tření můžeme definovat jako odpor proti pohybu, vznikající mezi dvěma tělesy v oblasti dotyku jejich povrchů v tečném směru k nim. Při relativním pohybu těles může být mezi nimi přítomno plynné nebo kapalně medium, které může navíc obsahovat i pevné částice. [9]

2.3.2 Třecí síla a koeficient tření

Třecí sílu T [N] můžeme vypočítat pomocí síly ve směru normály N [N] k hladké dotykové ploše a koeficientu smykového tření μ [-] ze vztahu 1. [10]:

$$T = N \cdot \mu \quad [\text{N}] \quad (1)$$

Koeficient tření nemá vlastní jednotku a závisí především na druhu povrchu po sobě smýkajících se materiálů těles. Některé hodnoty součinitelů smykového tření mezi známými nenamazanými povrchy najdete v příloze uvedené tabulce 2.3 [10]:

2.3.3 Druhy tření

Tření lze rozdělit podle několika hledisek:

Podle pohybu

- Za klidu
- Za pohybu

Podle maziva

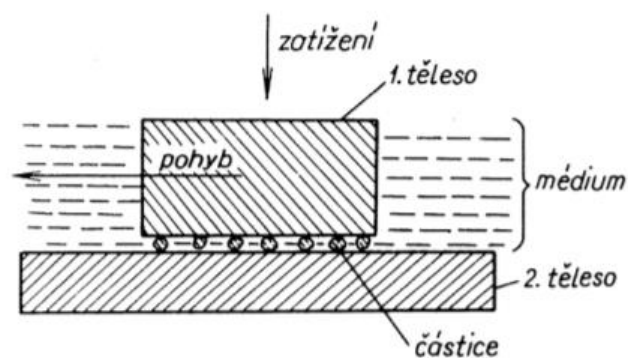
- Tření bez maziva
- Tření s tuhým mazivem
- Tření s kapalným nebo plastickým mazivem
- Tření na vrstvě plynu[9]

Při použití maziva

- Kapalinové
- Mezné
- Polosuché [11] [9] [12]

2.3.4 Opatření

Opatření lze definovat jako nežádoucí změnu povrchu nebo rozměrů tuhých těles, způsobenou buď vzájemným působením funkčních povrchů nebo funkčního povrchu a media, které opotřebení vyvolává. Projevem opotřebení bývá přemísťování částic hmoty z funkčního povrchu mechanickými účinky, popřípadě doprovázenými i jinými vlivy například elektrochemickými nebo chemickými. Základní schéma opotřebení a tření lze spatřit na obrázku 2.3.1. [9]



Obrázek 2.3.1 Základní schéma tření a opotřebení těles [9]

2.3.5 Druhy opotřebení

Opotřebení rozdělujeme viz obr. 2.3.2 na 6 základních druhů:

Adhezivní-Je charakterizováno oddělováním a přemísťováním částic z míst, kde při relativním pohybu funkčních povrchů došlo k jejich dotyku, k porušení povrchových vrstev a ke kovovému styku obou materiálů. Intenzitu adhezivního opotřebení lze výrazně ovlivnit použitím media působícím mezi povrchy.

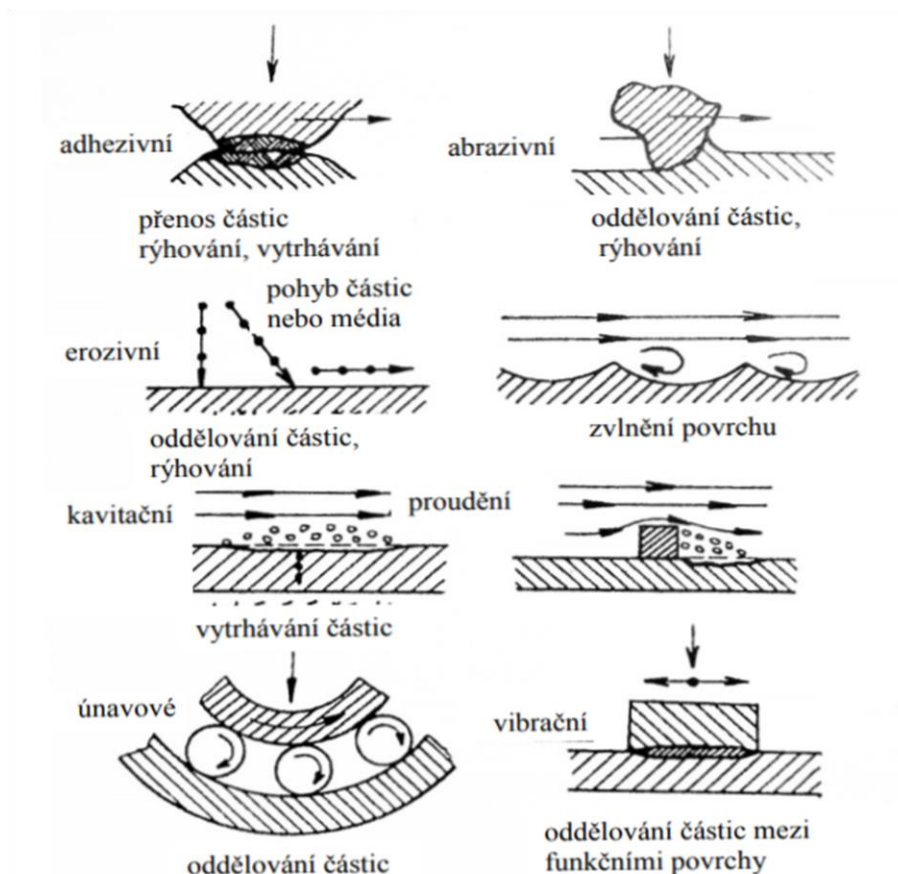
Abrazivní-Je charakteristické oddělováním částic z funkčního povrchu za účinku tvrdého a drsného povrchu druhého tělesa nebo účinkem abrazivních částic. U abrazivního opotřebení se rozlišují v podstatě dva případy. Prvním případem je opotřebovávání jednoho funkčního povrchu tvrdými částicemi, pak se jedná o interakci dvou těles. V druhém případě jde o abrazivní opotřebení částicemi, které se nacházejí mezi dvěma funkčními povrchy. Jedná se tedy o interakci tří těles, ke které prakticky dochází u všech pohybových mechanismů.

Erozivní-Lze charakterizovat jako oddělování částic a poškozování funkčního povrchu pomocí částic rozptýlených v proudící kapalině, plynu nebo páře. Erozivní opotřebení je ovlivňováno řadou faktorů, mezi které patří zejména rychlost, teplota a chemické působení nosného média dále pak druh, velikost a tvrdost částic. Pro celkový účinek erozivního media s částicemi je rozhodující kinetická energie a úhel dopadu.

Kavitační-Je možné charakterizovat jako oddělování částic a poškozování povrchu součástí v oblasti zanikání kavitačních dutin v kapalině. Při zanikání kavitační dutiny se vytvoří hydrodynamický ráz, kterým je namáhán povrch součástí nalézajících se v jeho bezprostřední blízkosti.

Únavové-Je charakterizováno postupnou kumulací poruch v povrchové vrstvě materiálu při opakovaných stykových napětích v některých oblastech funkčního povrchu. Únavové opotřebení je děj vázaný převážně na povrchovou vrstvu materiálu, může však iniciovat i tvorbu únavových lomů, které mohou zasáhnout buď jen část nebo dokonce celý průřez součástí.

Vibrační-Je charakterizováno oddělováním částic s poškozováním povrchu materiálu vzájemnými kmitavými tangenciálními posuny funkčních povrchů těles při působení normálového zatížení. V místě styku mikronerovností může dojít k vytlačení nebo znehodnocení maziva, které se mohlo původně nacházet mezi povrchy. [9]



Obrázek 2.3.2 schéma znázornění hlavních druhů opotřebení a jejich charakteru poškození funkčního povrchu [9]

2.4 Motorové oleje

Motorový olej je komplikovaný petrochemický výrobek, na který je kladeno mnoho často protichůdných parametrů. Moderní motorové oleje musí jít ruku v ruce s vývojem moderních motorů a splňovat náročné požadavky konstruktérů ať už se jedná o vlastnosti oleje jako takové či splnění kompatibility se zařízeními na úpravu výfukových plynů a tím pádem emisních limitů vozidel homologovaných zejména pro běžný provoz. Tyto požadavky mají dopad na chemické složení a fyzikální vlastnosti motorových olejů. Vlastnosti výsledné směsi základového oleje a aditiv, ze které se skládá motorový olej, musí být vyvážené a je nutné myslet také na ekologii a hospodárnost v provozu. [7]

2.4.1 Žádoucí parametry na motorové oleje

Olej musí:

- Dobře ulpívat na mazaném povrchu při všech provozních stavech, což určuje hlavně komplexní vlastnost, kterou je mazací schopnost;
- Musí dobře odvádět teplo především ze součástí, které nemohou být přímo chlazeny kapalinou (ložiska, písty, pístní čep, pístní kroužky atd.);
- Tlumit kmity;
- Tvořit minimum popela při spalovacím procesu;
- Chránit železné i neželezné kovy před korozí;
- Odolávat zejména smykovým silovým polím v obtížně mazatelných místech motoru;
- Pomáhat dotěšňovat některé díly motoru jako např. píst ve válci, a to i za vysoké teploty;
- Odolávat stárnutí tzn. oxidaci uhlovodíků základových složek oleje;
- Zabraňovat tvorbě úsad a kalů;
- Umožňovat provozuschopnost motoru i při hlubších mrazech. [5] [13]

2.4.2 Nežádoucí parametry motorového oleje

Olej nesmí:

- Napadat těsnící materiály, obzvláště pak gufera;
- Pěnit během provozu motoru;
- Vykazovat vysoké karbonizační číslo;
- Tvořit usazeniny a kaly. [5]

2.4.3 Doporučené parametry motorového oleje

Olej má být:

- Balen tak, aby bezpečnou manipulaci s ním zvládla i laická veřejnost;
- Skladovatelný minimálně dva roky v přiměřených teplotách;
- Mísitelný s jinými oleji stejné skupiny SAE (podle viskozity) pro podobné podmínky provozu motoru bez ohledu na výrobce nebo značku;
- Málo odparný, aby zabránil ztrátám při provozu motoru za vysokých i nízkých teplot;
- Správně značen dle mezinárodních norem SAE, ACEA, API, tak, aby bylo jasno pro jaké podmínky je určen a jaká je jeho specifikace;
- Ekonomicky výhodný k provozu, což souvisí s jeho cenou a užitnými vlastnostmi. [5]

2.5 Základové oleje

Kvalitní základové oleje jsou klíčem ke kvalitnímu výslednému produktu – motorovému oleji. Velké firmy si vyrábí základové oleje ve vlastních rafineriích, běžně je však praktikována výroba v jedné velké rafinerii a následná distribuce základových olejů do mísíren po celém světě. V některých případech se vyplatí základový olej dopravovat i na velkou vzdálenost pomocí například tankerů než vyrábět stejné množství základového oleje ve více malých lokálních rafineriích. [14]

2.5.1 Minerální oleje

Základové oleje vyrobené přímo z ropy označujeme jako Minerální. Dlouhodobým vývojem bylo u minerálních olejů dosaženo značného zlepšení vlastností, ale navzdory různým recepturám a úsilí vývojářů, jsou tyto oleje limitovány základním daným chemickým složením a z toho důvodu nedosahují úroveň ochrany potřebnou pro vysoce zatěžované moderní motory. Minerální oleje jsou dostačující pro mazání starších motorů nebo motorů s nižším měrným výkonem.[7]

2.5.2 Polosyntetické oleje

Tento druh oleje vzniká tak, že se do minerálního oleje přidá syntetický olej s požadovaným složením. Obsah syntetické složky v polosyntetickém oleji musí být minimálně 20 % objemu, horní hranicí pak bývají oleje obsahující až 65 % objemu syntetického oleje. Poměr syntetické a minerální složky má velký vliv na výslednou cenu polosyntetického oleje. Co se týče vlastností, jedná se v případě polosyntetického oleje vždy o určitý kompromis mezi minerálními oleji a syntetickými oleji, od každé složky mají určité dobré vlastnosti. Nedosahují sice tak vysoké kvality jako oleje syntetické, ale jsou kvalitativně na vyšší úrovni než minerální oleje a navíc mají zajímavý poměr výkon/cena.[7]

2.5.3 Syntetické oleje

Výroba syntetického oleje neprobíhá na rozdíl od minerálních olejů přímo z ropy. Syntetické oleje jsou nejčastěji vyráběny syntézou z plynného ethylenu, kde vznikají tzv. Poly-alfa-Olefiny nebo dalšími syntézami jejichž produkty jsou tzv. esterové oleje či polyglykoly. Výsledný výrobek je složen z několika komponentů, který musí syntetický olej obsahovat. Výsledná směs tak obsahuje jen složky nezbytně nutné a vhodné. Plně syntetické oleje jsou nasazeny tam, kde běžné oleje selhávají, tj. například při extrémně nízkých či vysokých teplotách a zatíženích. Výsledné vlastnosti syntetických olejů jsou na vynikající úrovni a

vykazují perfektní stabilitu. Výborné vlastnosti jsou vykoupeny vyšší cenou než za jakou jsou prodávány minerální oleje, proto se často volí kompromis ve formě polosyntetického oleje.[7]

2.5.4 Klasifikace kapalin na syntetické bázi

| | | |
|--|---|---|
| Polyglykoly: <ul style="list-style-type: none">▪ Polyetylénglykoly;▪ Polypropylénglykoly | Organické estery: <ul style="list-style-type: none">▪ Diestery;▪ Polyolestery. | Syntetické uhlovodíky: <ul style="list-style-type: none">▪ Polyalfaolefiny;▪ Cykloalkany;▪ Alkylaromáty;▪ Polybuteny. |
| Ostatní: <ul style="list-style-type: none">▪ Silikáty;▪ Silikony;▪ Fluorované uhlovodíky. | Estery kyseliny fosforečné: <ul style="list-style-type: none">▪ Triarylfosfáty;▪ Trialkylfosfáty;▪ Alkylarylfosfáty. | |

2.6 Aditiva

Požadavky, které jsou v dnešní době kladeny na maziva následkem zvyšování výkonů v konstrukci strojů, se již nedají splnit použitím čistě ropného oleje. Zejména v aplikacích, kde se vyskytují vyšší provozní teploty, by bylo použití ropného oleje zcela bez aditiv jak ekonomicky, tak technicky neúnosné z důvodu značného zkrácení doby použití vlivem rychlého stárnutí oleje. Ke zlepšení stálosti a mnoha jiných vlastností určujících užitnou hodnotu mazacích olejů se dnes naprostá většina pro obchod určených ropných olejů opatřuje určitými přísadami. Tyto zušlechťující přísady jsou nazývány aditivy. Aditivace může probíhat přímo při výrobě motorových olejů v mísárnách, nebo při distribuci či individuálně přímo uživateli. V případě, kdy je dosahováno zmenšování určitých negativních vlastností, nazýváme přísady jako inhibitory. [13]

2.6.1 Rozdělení aditiv podle chemické struktury

Jednou z možností, jak přehledně rozdělit aditiva do základních skupin, je rozdělení pomocí chemické struktury.

Nepolární aditiva

Tato aditiva nejsou přitahována vodou kovem, sazemí, nebo kyselinou. Nepolární aditiva ovlivňují pouze samotný olej. Nejsou povrchově aktivní na rozdíl od polárních aditiv což znamená, že nejsou přitahována k povrchům, ale jsou rozptýlena v celé olejové náplni rovnoměrně. Zlepšují především viskozitu maziva, bod tuhnutí a chrání gumová těsnění proti poškození.[7]

Polární aditiva

Velké množství aditiv jsou tzv. povrchově aktivní látky čili polární látky. Polární látky obsahují molekuly, které jsou nesymetrické, a proto na jejich koncích vznikají elektrické náboje. Těmito náboji jsou molekuly přitahované k povrchům. Polární aditiva tvoří na povrchu součástí tenký film, který v závislosti na složení aditiva zajišťuje ochranu proti korozi, usazování nečistot a proti vysokému tlaku. Déle chrání před opotřebením a neutralizuje kyseliny.[7]

2.6.2 Aditivní přísady

Detergenty-Pomocí detergentů jsou odstraňovány produkty stárnutí oleje, které se vylučují především na stěnách válce a pístu. Detergenty zamezují usazování nečistot na površích, případně již vzniklé úsady rozpouštějí a umožňují lepší přilnutí maziva k mazaným plochám. Usazeniny totiž mohou způsobit mechanické poškození vlivem poškrábání funkčních povrchů anebo zapříčinit netěsnosti z důvodu změny tvaru součástí. Detergenty dále neutralizují kyselé produkty oxidace a hoření, čímž chrání motor před korozí a proti koroznímu opotřebením.

Disperzanty-Disperzanty obalují i ty nejmenší tuhé a kapalné částice nečistot, udělují jim stejný elektrický náboj, brání jim ve shlukování a udržují je v oleji ve vznosu. Nečistoty se vlivem disperzantů vznášejí v celém objemu maziva a nedochází tak ke koncentraci nečistot nebo k jejich usazování. Podobně jako detergenty také neutralizují kyselé produkty spalování jako například kyselinu dusičnou nebo kyselinu sírovou.

Vysokotlaké přísady-Tento druh aditiv chrání zejména ocelové části před opotřebením v důsledku vysokých tlaků. Mezi typická místa namáhaná vysokým tlakem patří zejména ozubená kola. U těchto aditiv dochází na povrchu součásti k chemické reakci a vytvoření odolné vrstvičky, která zabrání kontaktu kov na kov.

Antioxidanty-Tato aditiva omezují chemickou degradaci maziva, ke které dochází při styku s kyslíkem, především za vysokých teplot v motoru. Zamezují vzniku nežádoucích chemických sloučenin, které zkracují životnost maziva.

Aditiva chránící elastomery-Tyto látky zabraňují stárnutí elastomerů tím způsobem, že zamezují vyplavení a chemické degradaci elastomerů obsažených v pryžových a plastových dílech. Elastomery zajišťují, aby plastové a pryžové díly byly stále pružné.

Inhibitory pěnovosti-Protipěnicí přísady urychlují rozklad vzniklé pěny a bublin v oleji, zlešují mazání a snižují stárnutí oleje. Látky proti pěnovosti jsou založeny na bázi silikonu. Urychleným promícháváním oleje se tvoří pěna, která urychluje stárnutí a oxidaci oleje, zvyšuje stlačitelnost oleje (mohou nastat vážné problémy u mazacích soustav) a dokonce může způsobit i únik maziva ze zařízení.

Inhibitory koroze-Aditiva tohoto typu vytváří na povrchu součástí ochranný film, který brání oxidaci materiálu a tím pádem jeho korodování. K oxidaci povrchů dochází nejen díky působení vzdušné vlhkosti, ale i vlivem agresivních sloučenin vznikajících při spalování paliva ve válci.

Modifikátory Viskozity-Tyto látky upravují a stabilizují viskozitu oleje což znamená, že je viskozita méně závislá na teplotě a olej tak má lepší teplotní rozsah v jakém je schopno mazivo plnit svojí funkci. Toho je zapotřebí nejen při studených zimních startech, kdy musí být zaručena čerpatelnost i při nízkých teplotách ale naopak i při vysokých zatíženích, kdy roste teplota a snižuje se viskozita, která musí mít dostatečnou hodnotu nato, aby nedošlo k selhání olejového filmu a destrukci stoje. Změny viskozity mají rovněž dopad na výšku mazacího filmu a na ztráty energie, která vzniknou překonáváním odporu maziva.

Modifikátory tření-Tyto přísady upravují tření na požadovanou hodnotu. Přesná hodnota mezi třecími plochami je důležitá například u automatických převodovek.

Snižovače bodu tuhnutí-Snižovače bodu tuhnutí, jinak nazývané také jako depresanty snižují bod tuhnutí oleje. Tato aditiva odstraňují při velmi nízkých teplotách tuhnutí

oleje v důsledku spojování krystalků parafinu a olej tak zůstává tekutý i při velmi nízkých teplotách. Zvýšená hustota oleje a jeho nekonzistentnost za nízkých teplot zvyšuje spotřebu energie potřebné pro překonání odporu maziva a zhoršuje mazací vlastnosti.

Deaktivátory kovů-Tento druh aditiv účinně neutralizuje ionty kovů v olejích a vyváří na kovových površích ochranný film a tím deaktivátory kovů zeslabují nebo zastavují katalytickou reakci. Tím se zabraňuje chemickým reakcím, které probíhají na povrchu mikroskopických kovových částic přítomných v oleji. Kovové částičky, vzniklé důsledkem otěru kov o kov, působí jako katalyzátor chemických degradačních procesů. Typickými kovovými částicemi rozptýlenými v mazivu jsou zejména slitiny mědi, ocel nebo hliník. [7][13]

2.7 Vlastnosti olejů

V této kapitole budou uvedeny důležité základní vlastnosti motorových olejů.

2.7.1 Viskozita

Viskozita bezesporu patří mezi nejdůležitější parametry olejů. Znalosti základů viskozity jsou potřebné zejména pochopení způsobu tvorby mazací vrstvy. Při vzájemném posunutí sousedních vrstev kapaliny v kapalinovém filmu mezi dvěma rovnoběžnými deskami vystupuje síla působící proti posunutí. Tato síla je způsobena vnitřním třením kapaliny a s tím jsou spojeny částečně také ztráty při jejím toku. Pro lepší názornost, je možné si představit kapalinu jako balíček karet, kde se karty vůči sobě vzájemně posouvají při působení tečné síly. Tyto vnitřní odpory kapaliny, způsobené relativním posunem částic po sobě, nazýváme viskozitou. [5][13]

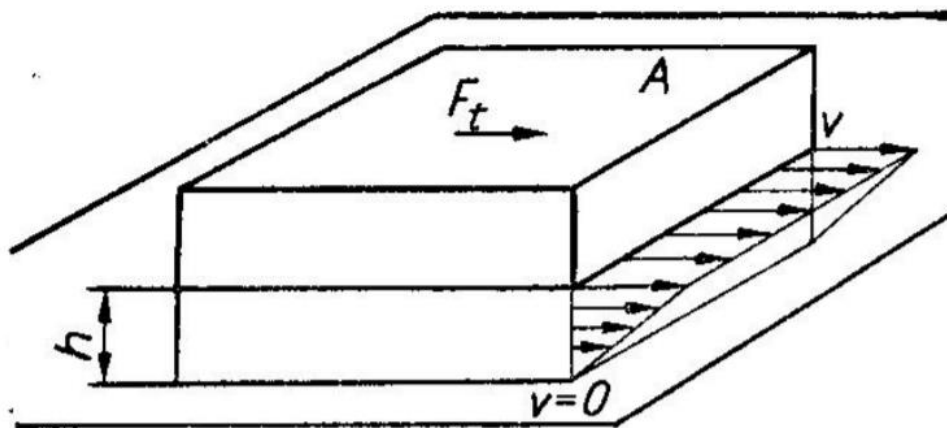
Význam viskozity

Viskozita je velmi důležitá veličina pro praktické použití mazacího oleje. Spoluurčuje zatížitelnost, průtok oleje, třecí ztráty, vývin tepla, tloušťku mazací vrstvy, mechanickou účinnost a v některých případech i opotřebení. [13]

2.7.2 Dynamická viskozita

Za podmínek, při kterých se nehmotná destička viz obr. 2.7.1 základní plochy A pohybuje na homogenní oddělující kapalinové vrstvě tloušťky h rychlostí v , může se podle Newtonova vyjádření vypočítat síla posuvu podle vztahu 2:[13]

$$F_t = \eta A \frac{dv}{dh} \quad [N] \quad (2)$$



Obrázek 2.7.1 Model k odvození newtonova zákona tření [13]

Pro smykové napětí platí vztah 3: [13]

$$\tau = \frac{F_t}{A} = \eta \frac{d_v}{d_h} \quad [\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (3)$$

Součinitel úměrnosti η se označuje jako dynamická neboli absolutní viskozita. Hodnota součinitele směrnosti závisí především na vlastnostech příslušné kapaliny. Podíl d_v/d_h nazýváme rychlostním spádem.[13]

F_t = třecí síla [N]

η = dynamická viskozita [mPas]

A = zkladní plocha [mm²]

$\frac{d_v}{d_h}$ = rychlostní spád [$\frac{\text{m} \cdot \text{s}^{-1}}{\text{m}}$]

τ = smykové napětí [N. s. m⁻²]

2.7.3 Kinematická viskozita

Kromě dynamické viskozity η byl navíc zaveden ještě poměr mezi viskozitou a hustotou nazývaný kinematická viskozita ν dána vztahem 4:[13]

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad [\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4)$$

Do rovnice se musí dosadit hodnoty, které byly naměřené při stejných teplotách, k níž se vztahuje údaj viskozity. Z důvodu snadného

ν = kinematická viskozita [mm².s⁻¹]

ρ = hustota [kg/m³]

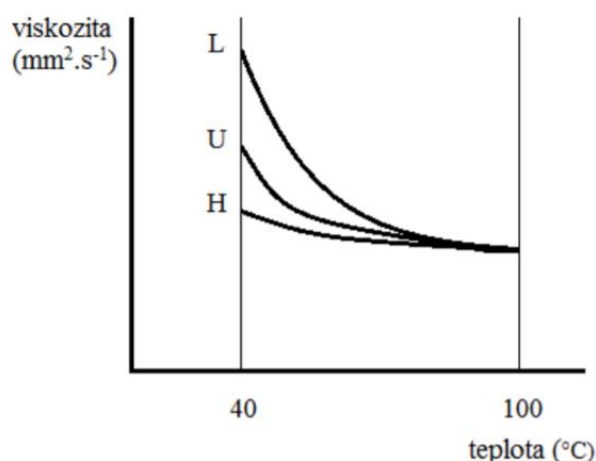
η = dynamická viskozita[mPas]

technického měření, jsou mazací oleje normalizovány a klasifikovány podle hodnot kinematické viskozity. [13]

2.7.4 Viskozitní index

Viskozita mazacího oleje značně závisí na teplotě. S rostoucí teplotou se viskozita exponenciálně zmenšuje. Tato teplotní závislost není u všech olejů totožná, liší se podle typu použitého oleje, a to v závislosti především na použitém základové oleji. Užitečná hodnota mazacího oleje je tak v mnoha případech určována převážně stupněm VT-závislosti. U motorových olejů je požadována malá teplotní závislost pro usnadnění spouštění motoru při nízkých teplotách, a naopak při vysokých teplotách je nutné udržet mazací vrstvičku dostatečně silnou natolik, aby byl mazací film stálý s vyhovující viskozitou. Nejvíce rozšířená, a to především v obchodním sektoru světově zavedená charakteristika pro VT-závislost mazacích olejů, je viskozitní index (VI). Tato veličina byla zavedena Američany Deanem a Davidem v r. 1929 se dá snadno spočítat, jestliže je známa viskozita při 40 °C a 100 °C. Viskozitní index závisí na struktuře olejů. Nejvyšší VI mají n-alkany, nižší viskozitní index mají cyklany a alkylycyklany, nejnižší hodnoty jsou u aromátů a alkylaromátů. Čím je rozvětvení vyšší, tím nižší je viskozitní index. Hodnota VI kolem 100 a výše ukazuje na velmi plochou VT-křivku, tzn. dobrou VT-závislost. Čím více se VI blíží nule, tím je křivka strmější, tzn. tím horší je VT-závislost. Vysoké hodnoty VI tedy znamenají, že se viskozita s teplotou mění málo, zatímco nízké hodnoty VI signalizují velkou změnu viskozity s teplotou viz obr. 2.7.2.

VI se vypočítá z rozdílu vybraných standardů L - Low [$mm^2 \cdot s^{-1}$] s nízkým VI, H-High [$mm^2 \cdot s^{-1}$] s vysokým VI a neznámého vzorku U - Unknow [$mm^2 \cdot s^{-1}$]: [5] [15]



$$VI = \frac{L - U}{L - H} \cdot 100 \quad [-]$$

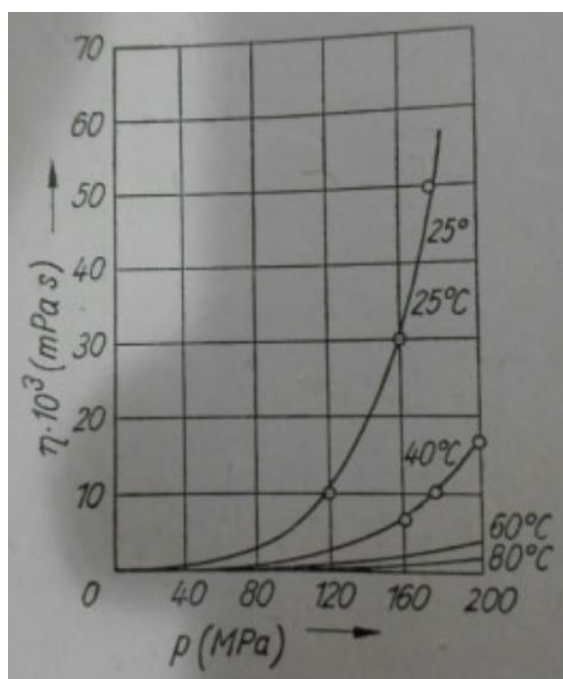
Obrázek 2.7.2 Závislost viskozity na teplotě

[5]

2.7.5 Viskozitně tlaková závislost

Viskozita newtonské kapaliny je konstantou hmoty závisující na teplotě a tlaku. Při malých měrných tlacích je závislost na tlaku v podstatě zanedbatelná. Stouplou-li tlaky na hodnoty vyšší než několik desítek viz obr.2.7.3, popřípadě stovek MPa, je třeba přihlížet k přírůstku viskozity s tlakem. Nárůst viskozity s tlakem probíhá přibližně exponenciálně. Zvláštní význam má V_p závislost pro:

- Výpočet tloušťky mazacího filmu podle elastohydrodynamické teorie ve vysoce zatížených valivých prvcích jako např. typicky v převodech nebo valivých ložiskách.
- Určení tekutosti olejů v mezerách a trubkách, které jsou pod vysokým tlakem např. typicky součásti hydraulických systémů
- Určení čerpací schopnosti olejů ve vysokotlakých mazacích zařízeních např. typicky vysokotlaké mazací přístroje pro kompresory aj. [13]



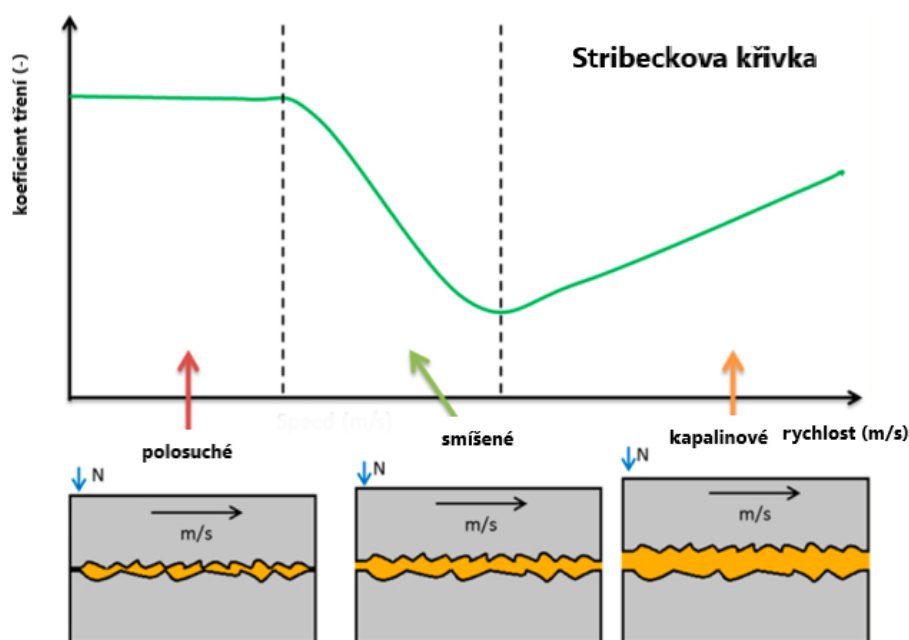
Obrázek 2.7.3 V_p izotermy v lineárně děleném souřadnicovém systému [13]

2.7.6 Mazivost

Mazivost je podle dnešních představ mazací schopnost kapaliny uplatňující se v oblasti hydrodynamického mazání, ve kterém dané mazivo zajišťuje co nejmenší součinitel tření při optimální únosnosti kapalninné vrstvy. Tato vlastnost se týka pouze kapalných maziv tzn., že se netýká plastických maziv, mazacích tuků či tuhých maziv. Vysokou mazivost vykazují právě vysoce rafinované oleje zbavené polárních látek. [5]

2.7.7 Maznost

Maznost je mazací schopností maziva pro oblast mazání meznou mazací vrstvou, je tedy vlastností všech druhů maziva, zajišťující co největší únosnost tzv. mezní mazací vrstvičky při optimálním koeficientu tření. V technické praxi se maznost maziva projevuje nejen rozdílným koeficientem tření v daleko větším rozpětí než u mazivosti v kapalinném tření, ale i různým stupněm opotřebení povrchů součástí, protože mazání v oblasti inflexního bodu Stribeckovy křivky viz obr. 2.7.4 velmi snadno přechází do oblasti provozní nespolehlivosti, resp. rizikové havarijní oblasti. [5]



Obrázek 2.7.4 Stribeckova křivka [16]

2.7.8 Mazací schopnost

Mezi nejdůležitější základní vlastnosti všech druhů olejů bezesporu patří mazací schopnost. Tento pojem vyjadřuje vlastnost projevující se přilnutím maziva k mazanému povrchu a vytvořením souvislé vrstvy s dostatečnou únosností a malým vnitřním třením. Mazací schopnost závisí nejen na vlastnostech samotného oleje ale i na dalších faktorech. Mezi další faktory ovlivňující mazací schopnost patří jakost kluzného povrchu, druhy kluzných materiálů, provozní rychlost, provozní teplota atd. Není proto možné určit jednoznačně její velikost. Pro porovnání mazací schopnosti různých maziv se používají různé testery, jimiž jsou

napodobovány třecí podmínky podobající se podmínkám mezi třecími plochami reálného strojního zařízení. [5] [17]

Mazací schopnost je komplexní vlastností zahrnující 3 další vlastnosti popsané výše:

- Viskozitu;
- Mazivost;
- Maznost.

2.8 Klasifikace motorových olejů

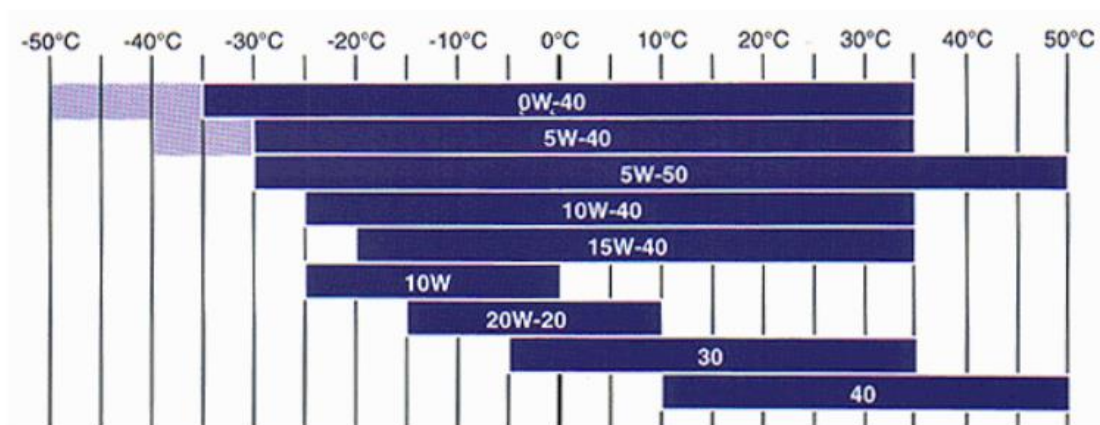
Z důvodu různých technologických a konstrukčních řešení výrobců motorů v různých částech světa s rozdílnými technicko-politickými podmínkami, se výrazně rozšířil pohled na kvalitativní ukazatele automobilových olejů a zejména požadavky na motorové oleje udělaly z tohoto typu jeden z nejsložitějších výrobků petrochemického průmyslu. Aby bylo možné jednoduchým způsobem určit, jaký motorový olej lze použít pro konkrétní typ motoru je důležité mít možnost porovnat jejich vlastnosti. Nejdůležitější parametry pro výběr správného motorového oleje z provozního hlediska jsou především [5] [15]:

- Viskozitní klasifikace
- Výkonnostní klasifikace
- Tovární specifikace

2.8.1 Viskozitní klasifikace

Většina maziv je prodávána pod obchodními názvy, které samy o sobě nic neříkají o vlastnostech a možnostech použití maziva. Pouze u automobilových olejů bývá součástí názvu i viskozitní specifikace. Pro běžné označování viskozitních vlastností motorových olejů je dlouhodobě používána klasifikace SAE (Society of Automotive Engineers, USA). Principem klasifikace je zařazení každého motorového oleje do viskozitní třídy, které existují ve dvou podobách: zimní třída označené písmenem W (Winter) a letní třída bez dalšího označení. Pokud je olej označen pouze tímto symbolem (SAE 30 atd.), jedná se o jedno-sezónní olej (monográdní). Oleje podle SAE 30 je možné používat do okolní teploty 40 °C, oleje podle SAE 40, 50, 60 již horní teplotu okolního vzduchu nemají omezenou. Obecně se dá říci, že čím je toto číslo nižší, tím má vhodnější vlastnosti pro zimní provoz. Dnešní moderní oleje jsou již vyráběny výhradně jako oleje vícestupňové – celoroční (tzv. multigrádní). Obyčejný motorový

olej bývá současně zařazený do dvou tříd zimní a letní, např. SAE 15W/40. První číslo udává viskozitní třídu při -18 °C, druhé číslo při 100°C. Dva oleje se stejným zařazením do viskozitní třídy mohou mít výrazně rozdílné užité vlastnosti. Doporučené viskozitní třídy SAE motorových olejů podle vnějších teplot najdete v obrázku [5][18]



Obrázek 2.8 Doporučené viskozitní třídy SAE motorových olejů podle vnějších teplot (°C) [19]

2.8.2 Výkonnostní klasifikace

Výkonnostní klasifikace charakterizuje okamžité i dlouhodobé vlastnosti motorového oleje při různých provozních zatíženích. Hodnoceny jsou vlastnosti jako např. ochrana proti otěru, oxidaci a korozi stěn válců a ložisek, ochrana proti tvorbě úsad za vysokých teplot, oxidační stabilita, pěnovost oleje, úspora paliva atd. Pro označení výkonnostní kategorie motorových olejů se používají následující normy:

- klasifikace API (American Petroleum Institute, USA)
- klasifikace CCMC (Comité des Constructeurs d'Automobile du Marché Commun, EU)
- klasifikace ACEA (Association des Constructeurs Européens d'Automobile, EU)
- firemní normy výrobců motorů a vozidel (VW, MB, MAN atd.)
- klasifikace MIL-L (normy americké armády)
- jiné klasifikace (např. ILSAC)

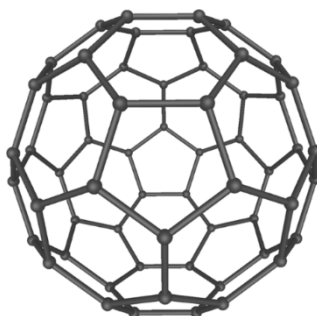
V současné době mají pro určení výkonnosti oleje dominantní význam klasifikace API, ACEA a firemní normy předních výrobců automobilů. Klasifikace CCMC je zastaralá a její uvádění je pouze dočasné. Klasifikace MIL-L se uplatňují v kategorii užitkových vozidel.[5] [18] [19]

2.9 Nano-oleje

Motorové oleje vylepšené pomocí nanotechnologie reagují na vývoj moderních motorů, které jsou optimalizovány směrem k vysoké efektivitě, bez poklesu výkonu, což má za následek nižší spotřebu paliva, emise ale také vyšší potenciál k opotřebení. Do olejů jsou kromě dalších aditiv, přimíchávány nano-aditiva, která jsou tvořena buď jednotlivými atomy nebo molekulami. Jako základové oleje jsou často používány Poly-alfa-Olefiny nebo nanočástice lze podle jejich velikosti definovat jako částice s velikostí $<100\text{nm}$ a v olejích jsou další cestou, jak efektivně snížit ztráty vyvolané třením. Výsledky četných studií kombinovaných se zkušenostmi s formulací se autoři důrazně snaží naznačit, že nanomateriály skutečně mají potenciál pro zlepšení lubrikační vlastnosti. Ne všechny jsou ale vhodné pro komerční využití, vzhledem ke sporným nebo neprokázaným vlastnostem.[2][20] [21]

2.9.1 Nano-oleje s Fullereny

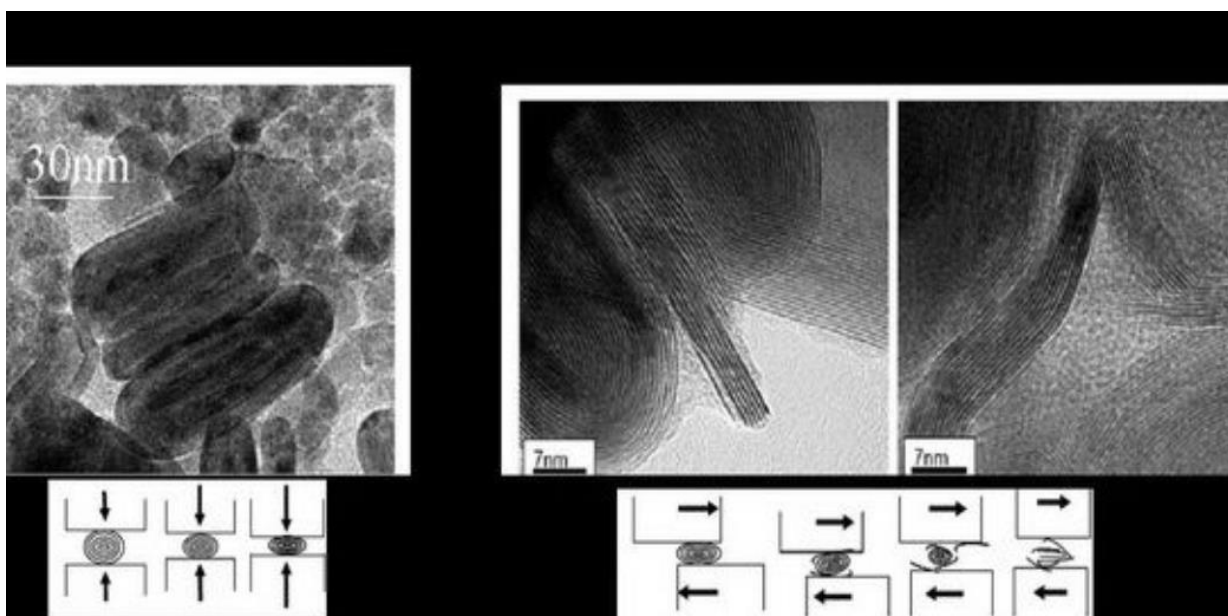
Fullereny jsou nanomateriálem na bázi uhlíku. Jedná se o souměrné kulovité nebo trubičkovité útvary, složené většinou z uhlíkových atomů. Fullereny mají podobnou strukturu jako grafit, který je složen z vrstvených destiček pravidelných šestiúhelníkových útvarů, avšak útvary fullerenů budou obsahovat atomy ve formě pětiúhelníků i šestiúhelníků, což umožní sestavení útvarů do tvaru koule – doslova ve tvaru fotbalového míče. Aby byla struktura svinuta do uzavřeného prostorového útvaru, musí být součet vnitřních úhlů jejich stěn alespoň v některých bodech menší než 360° tj. musí se v ní objevit „pětiúhelníkové poruchy“. Nejmenším fullerenem je fulleren C_{20} nejznámějším a nejstabilnějším je pak je fulleren C_{60} . viz obr. 2.9.1 Existují ale i další modifikace s různými počty atomů uhlíku jako například C_{70} , fullerenové prstence, nanotrubičky, sférické částice založené na několika vrstvách uhlíku, atd. [22] [21]



Obrázek 2.9.1 Fulleren C_{60} [22]

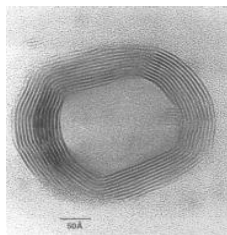
Uhlík však není jediným prvkem z periodické soustavy prvků, ze kterých mohou být fullereny sestaveny. Ve skutečnosti téměř jakákoliv složka s plochou strukturou může být transformována do této prostorové kulovité podoby. Tedy i sulfid molybdeničitý nebo podobné mřížkové struktury mohou tvořit uzavřené mnohostěnné nebo trubicovité útvary a pokud budou uspořádány ve vícevrstvé, do sebe zapadající formě, budou nejstabilnější ze všech možných útvarů.[21] [23]

Tyto fullereny se jako přísada do maziv chovají naprosto odlišně než konvenčně používané přísady. Například grafit spoléhá na vrstvení jednotlivých destiček, které přes sebe kloužou, aby bylo docíleno snížení tření. Fullereny oproti tomu působí více jako „kuličková ložiska“ mezi dvěma povrchy a při vysokých zátěžích a rázech se mohou zdeformovat viz obr. 2.9.2, aby bylo udrženo oddělení třecích ploch.



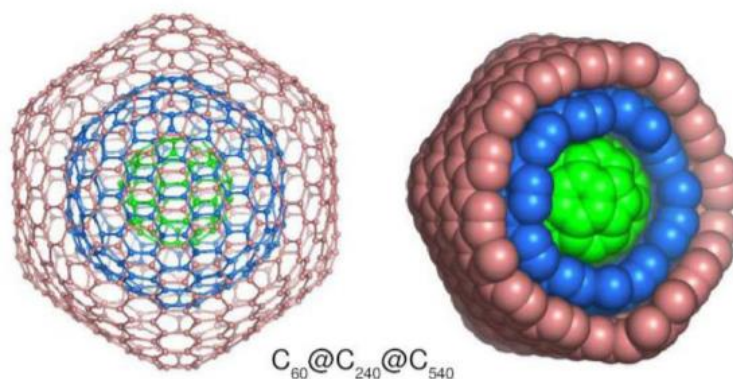
Obrázek 2.9.2 Mechanismus válcování a deformování fullerenu [21]

Funkce tohoto tzv. mechanismus válcování zatím však nebyla 100% prokázána. V kapalných mazivech se používají vícevrstvé, kulovité útvary vypadající pod mikroskopem jako rozříznutá cibule viz obr. 2.9.3.



Obrázek 2.9.3 Více-vrstvý fullerene pod mikroskopem [21]

Kovalentní vazby pevně spojují metalické a sulfidové atomy v rámci jedné z vrstev fullerenu, která se může formovat do podoby trubičky nebo jiného kulovitěho tělesa viz obr. 2.9.4. Mezi jednotlivými vrstvami fullerenu se však nacházejí slabé Van der Waalsovy vazby, díky kterým se jednotlivé vrstvy mohou pohybovat vůči sobě navzájem, čímž se může velice efektivně měnit tvar fullerenu v závislosti na tlaku, kterému je vystaven. Díky tomu jsou fullereny o mnoho odolnější vůči stlačování a také výrazně lépe, než lamelární útvary odolávají střihovým silám v převodovém ústrojí a v motorech. Díky výraznému zvýšení zátěžové kapacity oleje je tedy dosaženo snížení tření, zahřívání a vzniku opotřebení součástí. Dalším důležitým benefitem aplikace nano převodových olejů je snížení ztrát výkonu, které jsou nejvyšší právě v převodovém ústrojí.[2] [21] [24] [25]



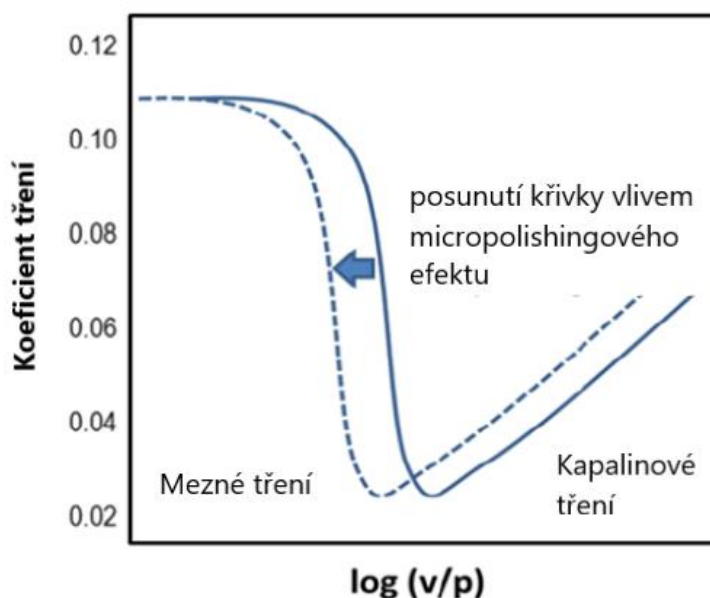
Obrázek 2.9.4 Fullereny v podobě kulovitých (cibulovitých) útvarů [22]

Nepřítomnost volných sulfidových atomů (atomy v kouli nemají volné vazby) dělá fullereny téměř chemicky nereaktivní, v podstatě až naprosto netečné – a tím vysoce odolné vůči oxidaci. Zatímco u motorových olejů je toto faktor důležitý, u olejů převodových přímo kritický.

U jiných forem látek snižujících opotřebení jsou aditiva obvykle přitahována povrchem součástí k jejich ochraně díky opačné polarizaci. Přestože nemají žádný elektrický náboj, ani pozitivní ani negativní, mají všechny molekuly elektrický dipól, který jim přisuzuje přitažlivost ke kovovým povrchům. Tyto síly mohou velice často soupeřit s jinými, na povrchu aktivními aditivy v oleji, a proto není vhodné přidávat do motorového či převodového oleje různá zázračná aditiva, jejichž aktivita může omezit nebo vyrušit vlastnosti původních „sériových“ aditiv a vést k celkovému neprospěchu takovéto aplikace. Fullereny jsou jako přísady na povrchu součástí neaktivní, a tak mohou být používány společně s ostatními proti-otěrovými aditivy a na povrchu součástí s aktivními aditivy, pokud to je nutné. [20][2] [21]

2.9.2 Nano-oleje obsahující nano-diamanty

Tento termín se obvykle používá k popisu ultradispergovaných diamantů produkovaných detonací hexagenu nebo trinitrotoluenu v uzavřené komoře. Průměrná velikost částic je 4 až 6 nm. Při použití nanodiamantů jako mazacího aditiva se tvrdí, že nanodiamanty se vkládají do kluzných povrchů, což je činí odolnějšími vůči opotřebení nebo alternativně umožňuje „mazání valivým mazáním“ mezi povrchy, čímž se snižuje tření a opotřebení. Skutečnost, že ke snížení tření dochází, když jsou nanodiamanty přidávány do mazacích formulací, je v souladu s jejich mikropolishingovým účinkem, což vede k rychlejšímu zaběhnutí a plynulejší párování povrchů. Podobný účinek byl pozorován u uhlíkových nanohornů. V důsledku toho dochází k přechodu z plného filmu na mezní mazání při nižším poměru rychlosti k tlaku a Stribeckův diagram je posunut doleva (viz obrázek 2.9.5, který ukazuje posun ve Stribeckově diagramu kvůli mikropolishingovému účinku nanodiamantů). Posun ve Stribeckově diagramu kvůli mikropolishingovému účinku nanodiamantů. Mikropolishingový účinek nanodiamantů se stává nevýznamným v případě starého oleje, kde míře opotřebení a drsnosti povrchu dominují další faktory, například to, jak je olej kontaminován. Navíc, protože se abrazivita nanodiamantů neodstraní po počátečním období záběhu, existuje nebezpečí nadměrného opotřebení po delší dobu.[2]



Obrázek 2.9.5 Posun křivky ve Stribeckově diagramu vlivem mikropolishingového efektu [2]

2.9.3 Oleje aditivované kyselinou boritou

V nepříliš vzdálené minulosti byla kyselina boritá běžným aditivem v kapalinách pro zpracování kovů díky svým vynikajícím vlastnostem a bakteriostatickým i baktericidním účinkům. Některé nedávné studie však uvádějí „lubrikační aditiva na bázi nanočástic na bázi boru, která mohou drasticky snížit tření a opotřebení v široké škále průmyslových a dopravních aplikací“, což naznačuje nový zájem o kyselinu boritou. Výměnou síry a fosforu se předpokládá, že přísady boru odstraní hlavní zdroje emisí a odpadů nebezpečných pro životní prostředí. [2]

2.9.4 Oleje obohacené o nanodisperzi Polytetrafluorethylenu (PTFE)

PTFE je dobře znám pro svoje použití v mazacím inženýrství s působivým profilem výkonosti v tucích, řetězových olejích, mazivech na suchý film atd. Rozpoznání potenciálu pro snížení tření a opotřebení vedlo k použití PTFE jako mazadla a modifikátoru tření suchého filmu dlouho předtím, než se každodenně začalo používat slovo „nano“. Je známo, že oleje a tuky obohacené PTFE vykazují vyšší odolnost proti mikrosvárům, vyšší indexy zátěže a sníženou přilnavost. Ačkoli se nanodisperze PTFE používají v řadě produktů pro ošetření motorů na trhu s náhradními díly, použití PTFE v motorových olejích je dosti omezené z důvodu inherentní nestability disperzí PTFE v oleji, rizika zanesení olejového filtru a problémů s recyklací.[2]

2.10 Použití nano-olejů v praxi

Výše popsané vlastnosti olejů s nanotechnologií naznačují, že jejich použití ve spalovacích motorech bude potřeba tam, kde je tlak na maximální snížení tření, teploty, vibrací, zvýšení spolehlivosti a životnosti.

2.10.1 Formule Student

Ideálním příkladem ukázky vhodného použití je soutěž Formule student viz obr. 2.10.1. Formula SAE je mezinárodní inženýrská soutěž pro studenty vysokých škol technického zaměření. Zadáním soutěže je vyvinout, vyrobit, otestovat a na závodech demonstrovat prototyp monopostu formule student podle platných pravidel formule student pro víkendového závodníka, který by se mohl vyrábět ve fiktivní sérii 1000 kusů. Záběr soutěže je velice komplexní a sahá za hranice závodní trati, nejedná se tedy o klasický motorsport. Na závodech se týmy účastní statických i dynamických disciplín, kde postupně sbírají body, které se nakonec sečtou a stanoví se celkové pořadí. [26]

Formule student vznikla v USA v roce 1981. Od roku 1998 existuje také evropská větev projektu, Formula Student. Obě soutěže mají stejný cíl a téměř stejná pravidla. Každý rok se v rámci Formula Student/SAE pořádají soutěže po celém světě. V současné době v seriálu Formula Student/SAE soutěží téměř 600 univerzitních týmů z celého světa ve třech kategoriích a to: Combustion, Electric a Driverless.



Obrázek 2.10.1 formule student
zdroj: archiv týmu CULS Prague Formula Racing

2.10.2 Pohonná jednotka monopostu týmu CULS Prague Formula Racing

Základem pro pohonnou jednotku současného monopostu týmu CULS Prague Formula Racing určenou pro závody Formule student je motor původně z motocyklu britské výroby Triumph Speedtriple 675. Základní parametry současného závodního motoru se nacházejí v tabulce 2.10.

Tabulka 2.10 parametry upraveného závodního motoru Triumph Daytona 675

| Parametr | Hodnota |
|---------------------------------|--|
| Zdvihový objem motoru | 675 ccm |
| Počet válců | 3 |
| Typ rozvodu | DOHC |
| Počet ventilů | 12 |
| Hmotnost bez příslušenství | 53 kg |
| výkon | 63 Kw-10 600 ot/min |
| Točivý moment | 67 Nm-9 300 ot/min |
| zdvih | 52.3 mm |
| vrtání | 75 mm |
| Typ paliva | RON 98 |
| Spotřeba paliva – závodní režim | 171 /100 km |
| zapalování | elektronické |
| vstříkování | Double MPI |
| převodovka | Šestistupňová manuální s možností sekvenčního řazení |

2.10.3 Podmínky provozu

Motor se při dynamických disciplínách soutěže pohybuje ve zcela jiných podmínkách, než je běžné při normálním provozu silničního motocyklu. Podmínky provozu od začátku ovlivňují zejména pravidla, která předepisují maximální objem motoru, průměr restriktoru na vstupu do sacího traktu, palivo, maximální úroveň hluku, vzhled závodní trati atd. Charakter trati závisí na druhu dynamické disciplíny a na podmínkách okruhu, kde se soutěž právě koná. Z důvodu maximálního využití potenciálu motoru jsou některé jeho části odlehčovány a upravují se tak, tak aby se záměrně snížila jejich životnost z několika desítek tisíc km na stovky km, což má za následek menší mechanické ztráty, menší momenty setrvačnosti rotačních hmot,

vyšší účinnost motoru atd. Typickým příkladem těchto úprav je zvednutý kompresní poměr, který se díky snížené hlavě válců dostal až na hodnotu 13,5:1. Motor se musí také vypořádat s většími jízdními odpory, než jaké jsou běžné při provozu motocyklu. Značně narostl zejména odpor vzduchu, valivý odpor a odpor proti zrychlení. Aby motor co nejlépe překonával jízdní odpory a uděloval monopostu požadovanou jízdní dynamiku, pracuje téměř neustále v oblasti otáček, kde se nachází maximální výkon a točivý moment. Nejvyužívanější spektrum otáček se při závodním nasazení nachází mezi 8000 až 10 500 ot/min. Pokud by v těchto otáčkách došlo k odlití oleje z olejové vany motoru vlivem např. bočního přetížení v zatáčce a čerpadlo oleje by nasálo vzduch, stačila by pouhá sekunda bez kvalitního mazání na to, aby došlo k značnému poškození nebo dokonce destrukci celého motoru a tím pádem by monopost pravděpodobně nedokončil závod, což by znamenalo bodovou ztrátu v celkovém hodnocení soutěže.

2.10.4 Požadavky na motor a jeho úpravy.

Na rozdíl od běžné jízdy je během závodu požadován od motoru vždy maximální výkon a točivý moment v prakticky každém okamžiku. Ve formuli student ale nemusí znamenat nejvýkonnější ten nejlepší. Jde také o spolehlivost a spotřebu paliva, která je během disciplíny Endurance taktéž bodována. Pokud se tým zaměří pouze na jeden parametr motoru, tak pravděpodobně nemá šanci vyhrát. Motor se musí citlivě naladit tak, aby jeho ovládání a řízení bylo předvídatelné, dávkovatelnost plynu plynulá a odezva na pohyb pedálu akcelérátoru velmi čitelná a rychlá. To platí dvojnásob při jízdě na mokré vozovce, kdy je potřeba citlivě dávkovat plyn, aby nedošlo z přetáčivému smyku a ztrátě kontroly nad monopostem. Aby motor zvládnul náročné podmínky provozu během soutěže co možná nejlépe a podával konstantně konkurenci schopné výkony v souladu s pravidly, musí projít řadou úprav. Na současném motoru určeném pro sezonu 2020 se navrhli nové vačkové hřídele, sací a výfukové potrubí, škrťací klapka s restriktorem, olejové hospodářství, chladicí systém, elektronika motoru, dále byl motor vybaven sníženou hlavou válců, programovatelnou řídicí jednotkou, dvojitým nepřímým vstříkáváním paliva, vysokonapětovými zapalovacími cívkami, odlehčeným závodním alternátorem s vlastní řídicí jednotkou, kryt alternátoru byl vyroben z karbonových vláken a dále celý karter prošel odlehčením od nálitků, použit byl také ve velké míře hliníkový spojovací materiál. Pro minimalizaci třecích ztrát v motoru a zvýšení spolehlivosti bude pravděpodobně

použit motorový olej s obsahem nanočástic, jelikož bylo týmem zjištěno podezření na zvýšené opotřebení kompozice kluzných ložisek klikové hřídele viz obr. 2.10.2.



Obrázek 2.10.2 Poškozená kluzná ložiska klikového hřídele u motoru Triumph Daytona 675

Zdroj: Archiv autora

3 Cíl práce a metodika

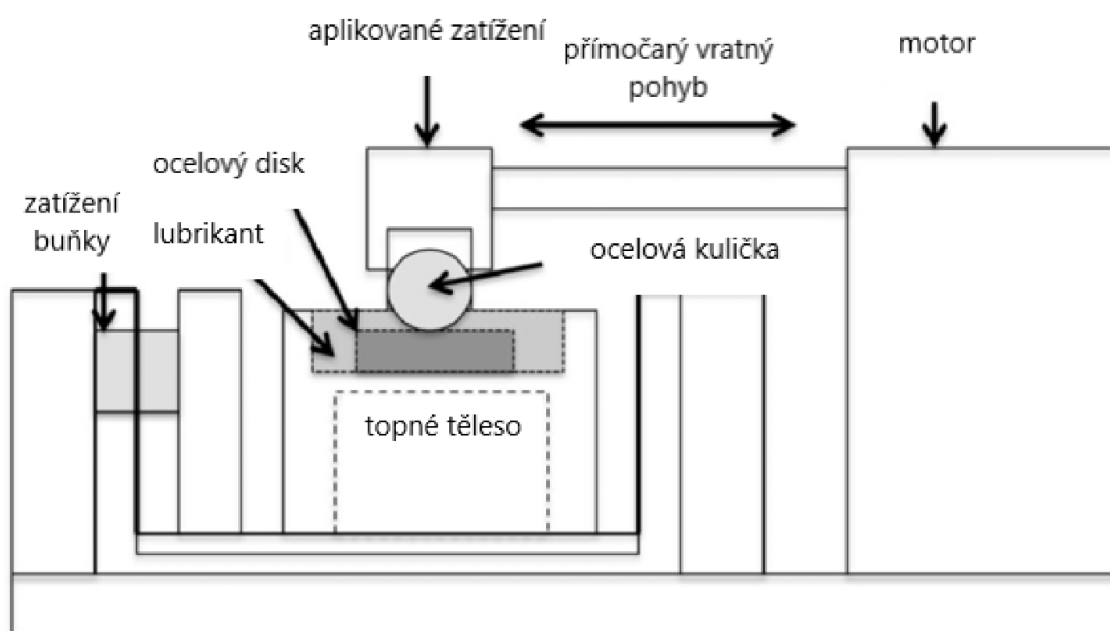
V této kapitole je uveden cíl práce a metodika měření, pomocí kterého byly ověřovány a porovnávány teoretické předpoklady a očekávané vlastnosti vzorků motorových olejů.

3.1 Cíl práce

Cílem práce je porovnat parametry a vlastnosti nano-olejů se standardními motorovými oleji. Zároveň ověřit tvrzení výrobce o kvalitě motorového oleje a zabezpečit tak spolehlivý provoz motoru na nadcházející sezonu.

3.2 Metodika měření

HFFR test neboli High-Frequency Reciprocating Rig test, slouží jako metoda k měření mazivosti především motorové nafty (norma ČSN EN ISO 12156-1), jde ale použít i pro lubrikanty nebo topné oleje. Princip testu spočívá v tom, že se malý vzorek například lubrikantu, umístí do vyhřívané lázně, ve které jsou v kontaktu povrchy dvou těles. Jedno těleso má tvar destičky a druhé těleso tvar koule. Je možné používat celou řadu zkušebních tělísek, avšak standardní zkušební tělíska pro testování jsou ocelová kulička o průměru 6 mm (horní pohyblivé zkušební tělísko) a ocelový disk o průměru 10 mm (spodní nepohyblivé zkušební tělísko). Při měření je kulička zatížena ve směru kolmém na rovinu destičky a současně se pohybuje přímočarým vratným pohybem. Kulička se během testu smýká po povrchu destičky nastavenou frekvencí tam a zpět. Během měření je snímán koeficient tření, teplota vzorku a kontaktní odpor. Na obrázku 3.2.1 je možné shlédnout schéma testovací metody. [27]



Obrázek 3.2.1 schéma měřicí metody (HFFR test)

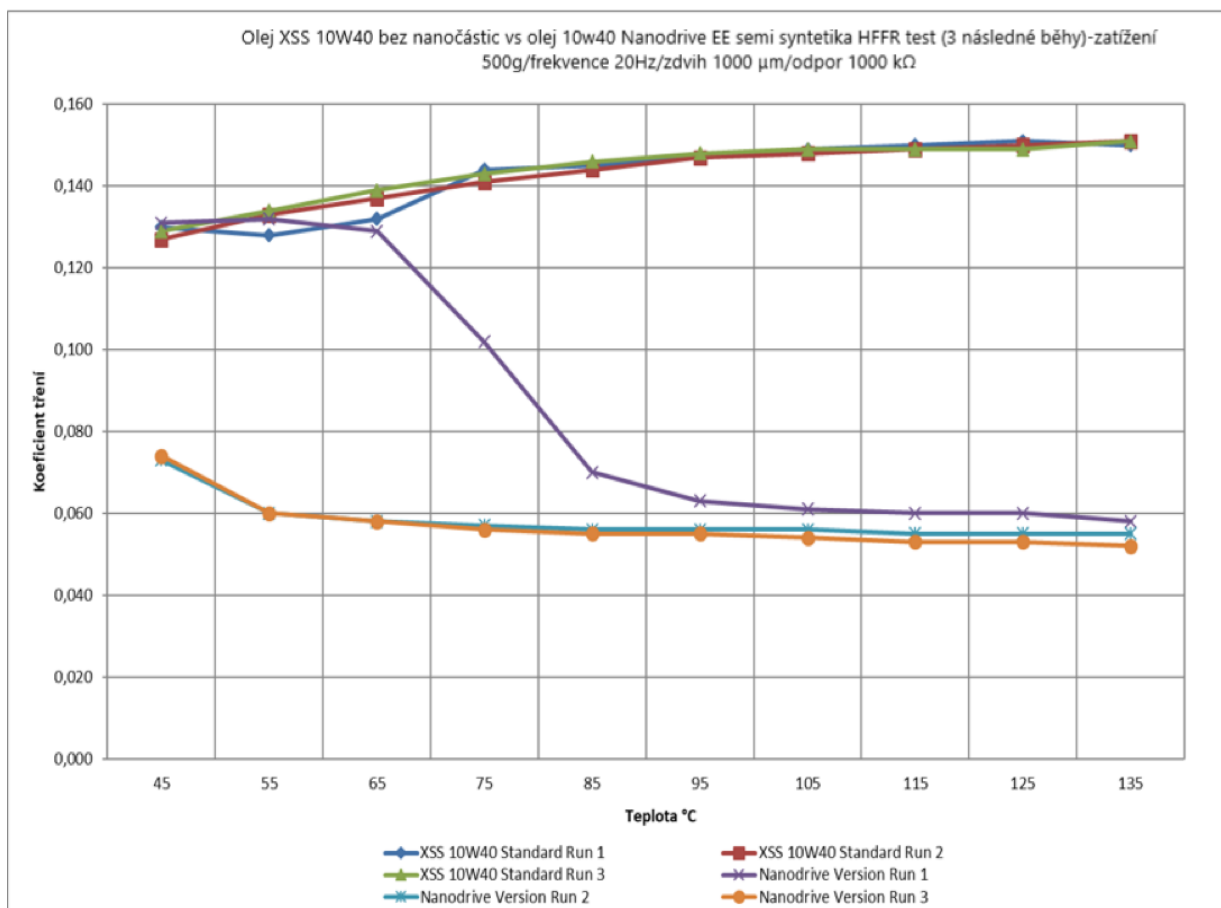
[28]

4 Vyhodnocení experimentu

4.1 Porovnání motorového oleje s nanočásticemi a oleje bez nanočástic

U motorových olejů s nanočásticemi i bez nanočástic můžeme hodnotit stejné vlastnosti. Pro co nejlepší porovnání jednotlivých olejů je zapotřebí vybrat vhodnou metodu a vhodné vlastnosti, které se budou porovnávat. Vzhledem k tomu, že nanočástice mají za úkol hlavně modifikovat tření, je vhodné je porovnat z hlediska mazivosti. Mazivost kapaliny obecně roste s vyšší viskozitou a hustotou, ale tato závislost není vždy pravidlem. Mazivost kapaliny je závislá především na jejím chemickém složení. Testování mazivosti olejů se používá při výzkumu zjišťování kvality a obsahu aditiv, testování základových olejů a sledování oxidačních změn v průběhu namáhání. V praxi pak mazivostní testy slouží především k předcházení haváriím zapříčiněným např. zadřením motoru nebo čerpadla. Pro případ porovnání nano-olejů s běžnými oleji, byl vybrán HFFR test. Aby se lépe prokázal dopad nanočástic na vlastnosti motorových olejů, byly provedeny dva následující testy.

Graf 4.1 HFFR test 10w40



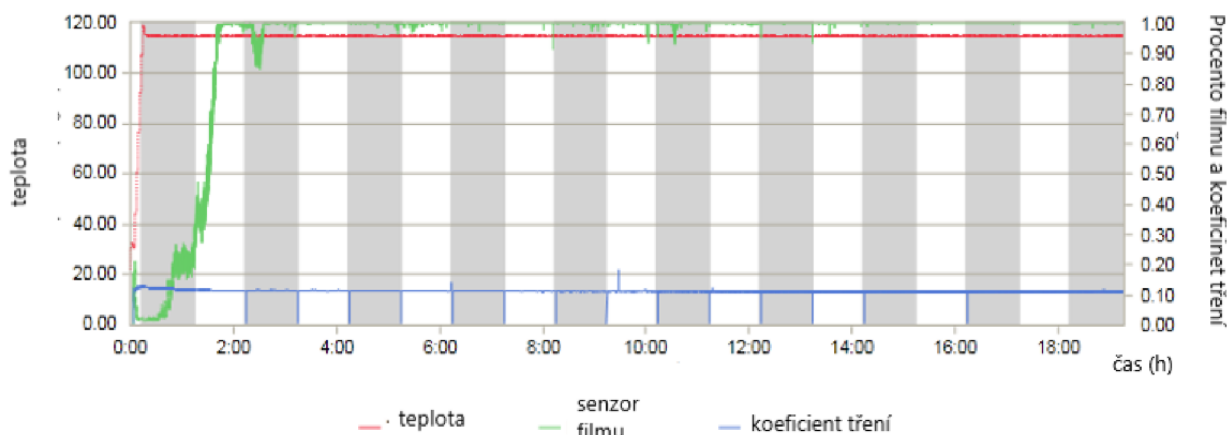
Poprvé jsou zde po 10 hodin testovány dva motorové oleje, při zatížení 500 g a frekvenci 20 Hz. Oleje pochází od stejného výrobce se stejnou viskozitní třídou. Rozdíl mezi nimi je v tom, že jeden z nich (polosyntetický EE nanodrive10W-40) obsahuje nanočástice. V tabulce můžeme vidět tři následné běhy měření koeficientu tření v závislosti na teplotě. Je zde jasně vidět rozdíl v průběhu koeficientu tření u nano-oleje a u běžného oleje. Zatím co hodnota koeficientu tření u běžného polosyntetického oleje zůstává přibližně na stejné hodnotě, tak u oleje s nanočásticemi klesá nejdříve při prvním zatížení postupně a pak při každém dalším běhu již rovnou prudce nastupuje nízká hodnota koeficientu tření.

V druhém případě se testují pomocí HFFR testu po dobu tentokrát 20 hodin, taktéž dva motorové oleje od stejného výrobce, se stejnou viskozitní klasifikací 5W-30. Jeden z nich opět obsahuje nanočástice (XF LL C3 5W-30). Na rozdíl od prvního testu zde vidíme hodnoty

Tabulka 4.1 hodnoty a průběh HFFR testu oleje 5w-30 s nanočásticemi

| Informace o profilu XF LL C3 5W-30 | | | |
|------------------------------------|--|--------------------------------------|------------------|
| 20 hodinový test | | Průměrné hodnoty během jednoho kroku | |
| krok | popis kroku | Film | koeficient tření |
| 1 | 0:10:00 (500g zatížení; teplota od 30 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 4% | 0.123 |
| 2 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 11% | 0.121 |
| 3 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 78% | 0.116 |
| 4 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 98% | 0.116 |
| 5 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 100% | 0.115 |
| 6 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 100% | 0.115 |
| 7 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 100% | 0.114 |
| 8 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 100% | 0.114 |
| 9 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 100% | 0.114 |
| 10 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 100% | 0.113 |
| 11 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 100% | 0.113 |
| 12 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 100% | 0.113 |
| 13 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 100% | 0.113 |
| 14 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 100% | 0.112 |
| 15 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 100% | 0.112 |
| 16 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 100% | 0.112 |
| 17 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 100% | 0.112 |
| 18 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 100% | 0.111 |
| 19 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 100% | 0.111 |
| 20 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 100% | 0.111 |

HFFR teplota, procento filmu a koeficient tření v závislosti na čase

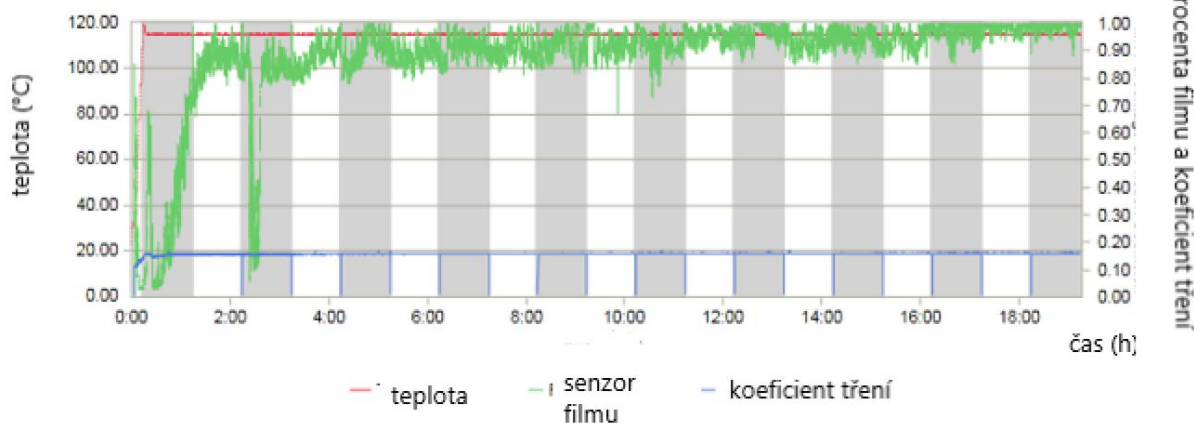


koeficientu tření, teploty a velikosti ochranného v závislosti na čase viz tabulky 4.1 a 4.2. Zatížení je opět 500 g a frekvence otěru je 20 Hz. V tabulce je vidět, jak se mění s jednotlivými cykly testu koeficient tření a velikost ochranného mazacího filmu. Hodnoty jsou zpracovány jako průměr za jeden měřící cyklus trvající 1 hodinu. Během průběhu testu lze vysledovat, že u běžného motorového oleje 5W-30 je na první pohled vidět značná volatilita ochranného mazacího filmu v průběhu času. Na druhou stranu u oleje doplněného o nanočástice se hodnota olejového filmu stabilizuje a drží téměř konstantní hodnotu po celou dobu testu, pochopitelně s výjimkou začátku testu. Teplota oleje se skoro po celou dobu testu udržuje u obou olejů na hodnotě 115 °C. Koeficient tření se během testu ustálil na nižší hodnotě u oleje aditivovaným nanočásticemi. Pro lepší představu o výsledném opotřebení jsou testy doplněny o fotografie poškozených povrchů míst dotyku.

Tabulka 4.2 hodnoty a průběh HFFR testu oleje 5w-30 bez nanočástic

| Informace o profilu 5W30 bez nanočástic | | | |
|---|--|--------------------------------------|------------------|
| 20 hodinový test | | Průměrné hodnoty během jednoho kroku | |
| krok | popis kroku | Film | koeficient tření |
| 1 | 0:10:00 (500g zatížení; teplota od 30 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 14% | 0,126 |
| 2 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 32% | 0,153 |
| 3 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 85% | 0,155 |
| 4 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 73% | 0,157 |
| 5 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 87% | 0,158 |
| 6 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 90% | 0,158 |
| 7 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 88% | 0,158 |
| 8 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 91% | 0,159 |
| 9 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 90% | 0,159 |
| 10 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 91% | 0,159 |
| 11 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 92% | 0,159 |
| 12 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 92% | 0,159 |
| 13 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 95% | 0,159 |
| 14 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 96% | 0,159 |
| 15 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 96% | 0,159 |
| 16 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 93% | 0,159 |
| 17 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 94% | 0,159 |
| 18 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 94% | 0,159 |
| 19 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 97% | 0,160 |
| 20 | 1:00:00 (500g zatížení; teplota od 115 do 115°C; frekvence od 20 do 20Hz, zdvih od 1000μm do 1000μm) | 99% | 0,159 |

HFFR teplota, procento filmu a koeficient tření v závislosti na čase



5 Diskuze

5.1 Diskuze výsledků

Z provedených testů vyplynulo, že nanočástice, které obsahují moderní nano-oleje, mají skutečně pozitivní dopad na zde zkoumané vlastnosti motorových olejů, zejména pak na koeficient tření. Tento trend už naznačovali například zdroje [2] [20] [25]. Pro měření bylo použito HFFR testu, který se pro lepší průkaznost opakoval dvakrát se dvěma oleji různé viskozitní třídy. Podařilo se tak částečně vyvrátit názor, že nano-oleje jsou pouze marketingovou bublinou sloužícím pro lepší prodejnost a falešnou exkluzivitu daného produktu. Přesné chemické složení olejů je výrobním tajemstvím a obsahy jednotlivých složek nejsou známy, přesto je zde dopad na měřené vlastnosti zcela zřejmý a dostačující na to, aby se daly výsledky měření zhodnotit jako očekávané. V této bakalářské práci nejsou zpracovány dopady nanočástic na zdravý člověka a přírody, což může do budoucna ovlivnit jejich použití a rozšíření mezi běžné spotřebitele. Zdravotní nezávadnost rozhodně nebyla prokázána nebo dokončena u všech druhů nanočástic, což jejich použití značně komplikuje.

5.2 Ekonomické zhodnocení

Je vhodné se zde zamyslet také nad ekonomickou stránkou použití nano-olejů. Hospodárnost provozu, hraje významnou roli zejména v civilním a soukromém sektoru. Klíčovým parametrem pro hospodárny provoz jsou, pokud možno co nejnižší náklady na provoz stroje. V této oblasti se musí brát v úvahu i servisní náklady, které tvoří nemalou část provozních nákladů. Do servisních nákladů samozřejmě patří i výměna oleje, kam se promítá kromě dalších aspektů i cena motorového oleje, ta je u nano-olejů vyšší většinou minimálně o 1/3 z celkové ceny, což hraje na první pohled proti ekonomice provozu. Výhodné vlastnosti Nano-olejů však umožňují snížení tření, zmenšení opotřebení součástí a lepší tlumení kmitů, tím pádem nižší spotřebu paliva, nižší pravděpodobnost náhlých mechanických poruch i potencionální potřebu drahých náhradních dílů jako je například turbodmychadlo jehož cena může být i několik desítek tisíc korun. Lepší vlastnosti nano-olejů a jejich odolnost proti stárnutí jsou tak velkou výhodou zejména v oblastech, kde dochází k rychlému opotřebení oleje i motoru jako takového. Nano-olej pak může i přes vyšší náklady na jeho pořízení představovat úsporu při dlouhodobém provozu stroje. V oblastech, kde nepanují náročné provozní podmínky, nachází oleje vybavené nanotechnologií uplatnění spíše u nadšenců, kteří chtějí dopřát svým strojům to nejlepší i když to pro ně znamená náklady navíc.

6 Závěr

V praxi dnes existují aplikace, kde je zapotřebí se zaměřit na optimalizaci tření ve spalovacím motoru. Provozní podmínky, ve kterých se mohou motory pohybovat jsou různé. Pokud je po motoru požadováno, aby pracoval například ve vysokých otáčkách, při vysokých teplotách motorového oleje, při vysokém zatížení nebo například dlouhodobě plnil přísné emisní limity, je zde na místě se zamyslet nad použitím vhodného oleje.

Pro lepší proniknutí do problematiky mazání a maziv obecně je nejprve na začátku práce popsána problematika a základní pojmy z oblasti výroby a funkce maziv, tribologie, tření a opotřebení. Podrobněji je popsána problematika motorových olejů a jejich vlastnosti.

V současnosti může být použito mnoho druhů olejů od různých výrobců. Ne všechny výrobky však mohou dobře posloužit i v těch nejtěžších podmínkách, kde běžné motorové oleje rychle stárnou a degradují. Toto tvrzení se opírá o autorovi zkušenosti z prostředí soutěže formule student, které se jako člen týmu CULS Prague Formula racing pravidelně účastní. Hypotéza, která říká, že opotřebení oleje odpovídá převládajícímu typu provozu stroje je pravdivá, neboť se prokázalo, že běžný motorový olej nezvládá mazat upravený motor pracující v režimu maximálního výkonu po delší dobu. Důsledky špatného mazání jsou uvedeny v kapitole o požadavcích na motor. Pro lepší zvládnutí náročných podmínek provozu, byly vyvinuty oleje obsahující nanočástice. Nano olejům je v této bakalářské práci věnována samostatná kapitola a v další navazující kapitole je uveden popis konkrétního použití nano-olejů v praxi na příkladu z prostředí soutěže formule student.

Za účelem prokázání pozitivního efektu nano-olejů na snížení tření a tím pádem energie potřebné k jeho překonání, byly provedeny s pomocí pana Ing. Petra Vejvody mazivostní HFFR testy několika vzorků oleje s nanočásticemi i bez nanočástic a došlo k jejich vzájemnému srovnání. Testy prokázaly lepší vlastnosti u olejů s nanočásticemi, a proto bude v další sezoně použit tento duh motorového oleje. Práce tak dosáhla stanovených cílů.

Zdroje

- [1] ALI, Mohamed Kamal Ahmed a / Hou XIANJUN. Improving the tribological behavior of internal combustion engines via the addition of nanoparticles to engine oils [online]. 2015. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1515/ntrev-2015-0031>
- [2] ZHMUD, BORIS AND PASALSKIY, Bogdan. Nanomaterials in Lubricants: An Industrial Perspective on Current Research [online]. 2013, 101. Dostupné z: doi:[10.3390/lubricants1040095](https://doi.org/10.3390/lubricants1040095)
- [3] PETROLEUM. Původ, vznik, vyhledávání a těžba ropy. cit 29.3.2020 [online]. 2020. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/ropa/>
- [4] BLAŽEK, Josef a Vratislav RÁBL. *Základy zpracování a využití ropy*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0619-2.
- [5] HÖNIG, Vladimír. *Přednášky paliva a maziva - elektronický zdroj*
- [6] PETROLEUM. Složení ropy. cit 6.4.2020 [online]. 2017. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/ropa/slozeni-ropy.aspx>
- [7] VLK, František. *Paliva a maziva motorových vozidel*. 2006. ISBN 80-239-6461-5.
- [8] 6.A, mendelovo gymnázium. Zpracování ropy. cit 2.4.2020 [online]. 2007. Dostupné z: <http://ropoweb.xf.cz/postup.html>
- [9] VOCEL, MILAN, Vladimír DUFEK. *Tření a opotřebení strojních součástí*. B.m.: Praha: SNTL, 1976.
- [10] VLADIMÍR ŠLEGER, Pavel Neuberger. *Statika s příklady od A do Z*. B.m.: Česká zemědělská universita v Praze, 2006. ISBN 80-213-0855-9.
- [11] VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. 2003. ISBN 80-238-8756-4.
- [12] HROMÁDKO, JAN, JIŘÍ HROMÁDKO, Vladimír HÖNIG a Petr MILER. *Spalovací motory*. B.m.: Garda Publishing, 2011.
- [13] BRENDL, HORST, HORNING, ELFRIEDE, LEISTNER, DIETMAR, NEUKIRCHNER, JOHANNES, SCHMIDT, HANS, WINKLER, HERBERT, WINKLER, Lothar. *Tribotechnika*. B.m.: Praha: SNTL, 1984.
- [14] PETROLEUM.CZ. Základy výroby minerálních olejů. cit 23.3.2020 [online]. 2017. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/zpracovani/zpracovani-ropy-34.aspx>
- [15] HÖNIG, Vladimír. *Cvičení z paliv a maziv*. B.m.: Česká zemědělská universita v Praze, 2015. ISBN 978-80-213-2384-1.
- [16] ROBINSON JW, ZHOU Y, BHATTACHARYA P, ERCK R, QU J, BAYS JT, Cosimbescu L. Probing the molecular design of hyper-branched aryl polyesters towards lubricant applications [online]. 2015. Dostupné z: doi:[10.1038/srep18624](https://doi.org/10.1038/srep18624)
- [17] SEJKOROVÁ, Marie. *Metody tribotechnické diagnostiky*. B.m.: 1. vyd. Ostrava, Pardubice: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Univerzita Pardubice, 111s., 2013. ISBN 978-80-248-3280-7.

- [18] EKOLUBE, s. r. o. Viskozita automobilových motorových olejů. *cit 9.2.2020* [online]. 2020. Dostupné z: <https://www.oleje.cz/clanek/Viskozita-automobilovych-motorovych-oleju>
- [19] EKOLUBE, s. r. o. Výkonnostní třídy automobilových motorových olejů. *cit 18.2.2020* [online]. 2020. Dostupné z: <https://www.oleje.cz/clanek/Vykonnostni-tridy-automobilovych-motorovych-oleju>
- [20] ING, E U R, Martyn MANN, Hons M I Mech E a C ENG. Advances in low friction gearbox oil lubrication using nanotechnology. nedatováno.
- [21] ING. PETR VEJVODA. Odborné konzultace -. In: . B.m. 2020.
- [22] SCI-LINE/KATEDRA FYZIKY UJEP ÚSTÍ N.L. Fullereny. *cit 4.4.2020* [online]. 2020. Dostupné z: https://www.sci-line.cz/extra/images/nanosvet/unikatni_vlastnosti/Fullereny.pdf
- [23] GRAFEN. Fullereny. *cit 7.4.2020* [online]. 2011. Dostupné z: <https://www.grafen.cz/nanotechnologie/18-fullereny>
- [24] LEE, JAEKEUN & CHO, SANGWON & HWANG, YU-JIN & LEE, CHANGGUN & KIM, Soo. Enhancement of Lubrication Properties of Nano-oil by Controlling the Amount of Fullerene Nanoparticle Additives. *Tribology Letters* [online]. 2007. Dostupné z: doi:10.1007/s11249-007-9265-2
- [25] LEE, JAEKEUN AND CHO, SANGWON AND HWANG, YU-JIN AND CHO, HAN-JONG AND LEE, CHANGGUN AND CHOI, YOUNGMIN AND KU, BON-CHUL AND LEE, HYEONGKOOK AND LEE, BYEONGCHUL AND KIM, DONGHAN AND KIM, Soo. Application of fullerene-added nano-oil for lubrication enhancement in friction surfaces. *Tribology International - TRIBOL INT* [online]. 2008, 42. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2008.08.003
- [26] CULS PRAGUE FORMULA RACING. Formule Student/SAE [online]. 2012. Dostupné z: <http://culsracing.cz/formule-studentsae/>
- [27] DOUSTDAR, OMID AND WYSZYNSKI, MIROSLAW LECH AND MAHMOUDI, HAMID AND TSOLAKIS, A. Enhancing the properties of Fischer-Tropsch fuel produced from syngas over Co/SiO₂ catalyst: Lubricity and Calorific Value. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2016. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/148/1/012092
- [28] KALAM, M. A. & MASJUKI, H.H. & HASEEB, A. S. M. A & REDZUAN, M.A. & SYAZLY, M.. Friction and wear characteristics of biodiesel contaminated lubricants. [online]. 2007. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/290534341_Friction_and_wear_characteristics_of_biodiesel_contaminated_lubricants

Seznam obrázků

| | |
|--|-----------|
| <i>Obrázek 2.1.1 Těžba ropy na moři</i> | <i>2</i> |
| <i>Obrázek 2.1.2 Technologická zařízení na zpracování ropy</i> | <i>3</i> |
| <i>Obrázek 2.1.3 Atmosférická a vakuová destilace ropy.....</i> | <i>4</i> |
| <i>Obrázek 2.3.1 Základní schéma tření a opotřebení těles</i> | <i>7</i> |
| <i>Obrázek 2.3.2 Schéma znázornění hlavních druhů opotřebení a jejich charakteru poškození funkčního povrchu</i> | <i>9</i> |
| <i>Obrázek 2.7.1 Model k odvození newtonova zákona tření</i> | <i>16</i> |
| <i>Obrázek 2.7.2 Závislost viskozity na teplotě.....</i> | <i>17</i> |
| <i>Obrázek 2.7.3 Vp izotermy v lineárně děleném souřadnicovém systému.....</i> | <i>18</i> |
| <i>Obrázek 2.7.4 Stribeckova křivka.....</i> | <i>19</i> |
| <i>Obrázek 2.8 Doporučené viskozitní třídy SAE motorových olejů podle vnějších teplot (°C) ..</i> | <i>21</i> |
| <i>Obrázek 2.9.1 Fulleren C60</i> | <i>22</i> |
| <i>Obrázek 2.9.2 Mechanismus válcování a deformování fullerenu</i> | <i>23</i> |
| <i>Obrázek 2.9.3 Více-vrstvý fulleren pod mikroskopem</i> | <i>23</i> |
| <i>Obrázek 2.9.4 Fullereny v podobě kulovitých (cibulovitých) útvarů</i> | <i>24</i> |
| <i>Obrázek 2.9.5 Posun křivky ve Stribeckově diagramu vlivem micropolishingového efektu.....</i> | <i>25</i> |
| <i>Obrázek 2.10.1 formule student.....</i> | <i>27</i> |
| <i>Obrázek 2.10.2 Poškozená kluzná ložiska klikového hřídele u motoru Triumph Daytona 67530</i> | |
| <i>Obrázek 3.2.1 Schéma měřicí metody (HFFR test)</i> | <i>31</i> |

Seznam tabulek

| | |
|---|-----------|
| <i>Tabulka 2.10 Parametry upraveného závodního motoru Triumph Daytona 675</i> | <i>28</i> |
| <i>Tabulka 4.1 Hodnoty a průběh HFFR testu oleje 5w-30 s nanočásticemi.....</i> | <i>33</i> |
| <i>Tabulka 4.2 Hodnoty a průběh HFFR testu oleje 5w-30 bez nanočástic.....</i> | <i>34</i> |

Seznam grafů

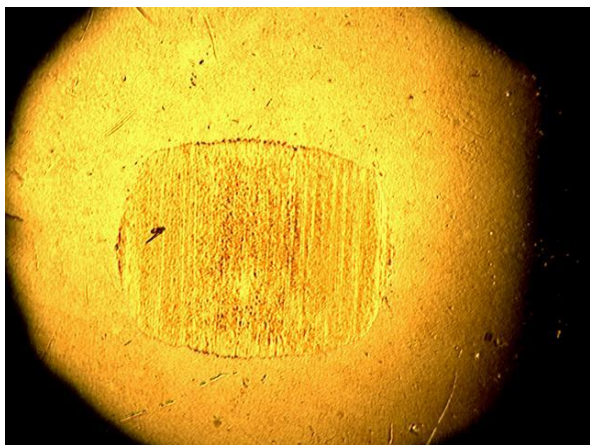
| | |
|---------------------------------------|-----------|
| <i>Graf 4.1 HFFR test 10w40</i> | <i>32</i> |
|---------------------------------------|-----------|

Příloha

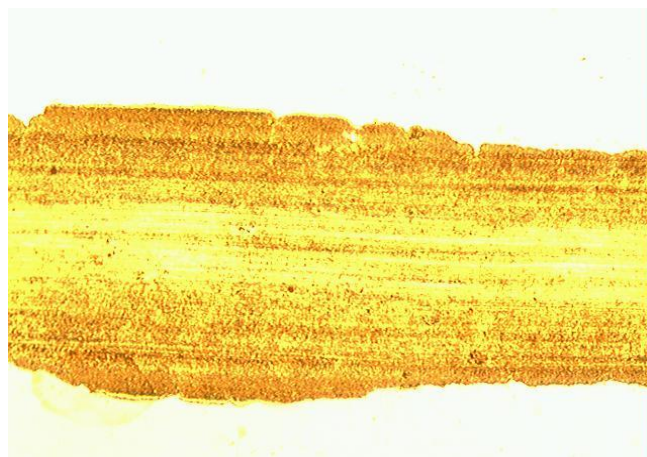
Tabulka 1.3 Přehled častých kombinací materiálů a jejich koeficient tření [10]

| materiály těles | μ (-) |
|--------------------|-----------|
| Ocel-led | 0,02 |
| ocel-teflon | 0,10 |
| ocel-ocel | 0,15 |
| ocel-dřevo | 0,50 |
| dřevo-konopné lano | 0,60 |
| ocel-pryž | 0,70 |
| pryž-asfalt | 0,80 |

Fotografie opotřebovaných povrchů u 20 hodinového HFFR testu nano oleje XF LL C3 5W30



opotřebovaná ocelová kulička při testu nano oleje – 10x zvětšeno



opotřebovaný disk při testu nano oleje-10x zvětšeno

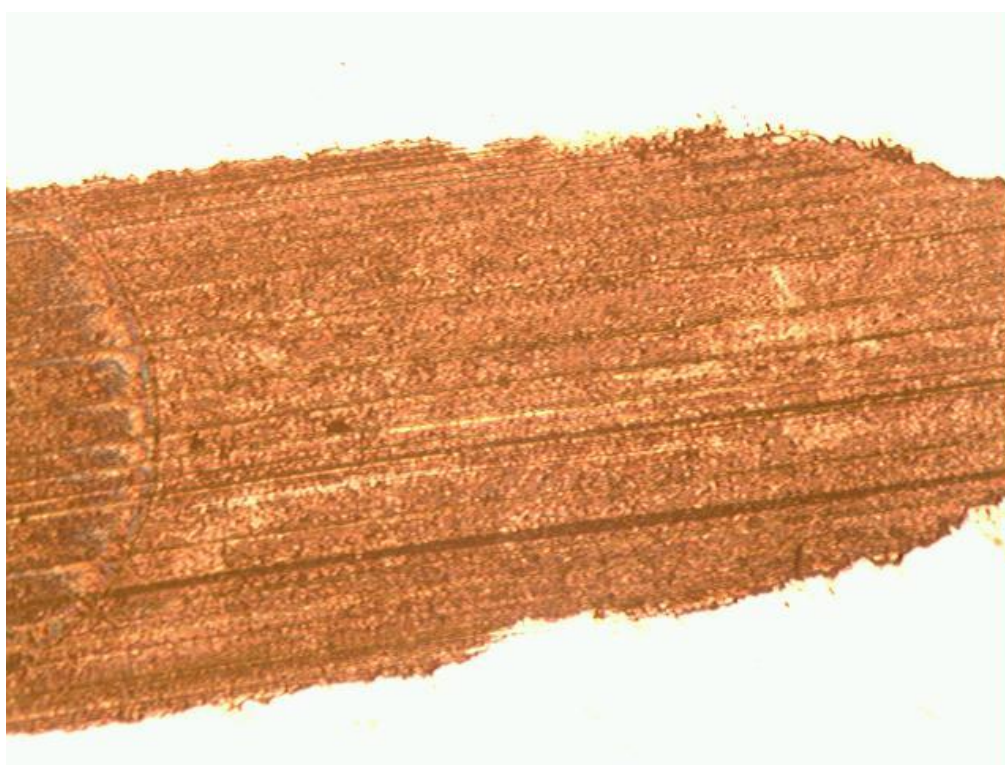
Velikost opotřebované plochy= 0.096 mm²

Průměr opotřebení exponovaného místa= 0.212 mm

Fotografie opotřebovaných povrchů u 20hodinového HFFR testu standardního oleje 5W30



Opotřebovaná ocelová kulička při HFFR testu běžného oleje 10x zvětšeno



*opotřebovaný disk při HFFR test běžného oleje-10x
zvětšeno - znatelně větší poškození funkčního povrchu*

Velikost opotřebované plochy= 0.032 mm².