



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

VLIV MAZIVOSTNÍCH PŘÍRAD NA SNIŽOVÁNÍ OPOTŘEBENÍ TŘECÍCH POVRCHŮ

EFFECT OF ADDITIVES ON WEAR REDUCTION OF RUBBING SURFACES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JURAJ SÚKENÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. IVAN KŘUPKA, Ph.D.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Juraj Súkeník

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Konstrukční inženýrství (2301T037)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vliv mazivostních přísad na snižování opotřebení třecích povrchů

v anglickém jazyce:

Effect of additives on wear reduction of rubbing surfaces

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem diplomové práce je analýza vlivu mezních mazacích filmů na snižování tření a následného opotřebení třecích povrchů.

Cíle diplomové práce:

Diplomová práce musí obsahovat:

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Formulaci řešeného problému a jeho analýzu
4. Vymezení cílů práce
5. Návrh metodického přístupu k řešení
6. Analýzu a interpretaci získaných údajů
7. Závěr

Forma diplomové práce: průvodní zpráva

Typ práce: analytická

Účel práce: pro V-V a tvůrčí činnost ÚK

Seznam odborné literatury:

Müller M, Topolovec-Miklozic K, Dardin A, Spikes HA. The Design of Boundary Film-Forming PMA Viscosity Modifiers. Tribol Trans 2006; 49 (2): 225-232.

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Ivan Křupka, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 19.11.2009

L.S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Mazivostné prísady tvoria neoddeliteľnú súčasť moderných mazív. V oblasti medzného mazania zohrávajú nezastupiteľnú úlohu mazivostné prísady nazývané polymérne modifikátory viskozity. Tie sú určené k zabezpečeniu dostatočnej hrúbky mazacej vrstvy pri nízkych rýchlostiach vzájomného pohybu trecích povrchov. Práca sa zaoberá účinkom konkrétnych polymérnych modifikátorov viskozity na utváranie medzného mazacieho filmu v oblasti eliptického tribologického kontaktu. Cieľom práce je taktiež overenie vplyvu zmeny koncentrácie týchto aditív na hrúbku vytváraného mazacieho filmu.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Medzné mazanie, polymérny modifikátor viskozity, eliptický kontakt, hrúbka mazacieho filmu

ABSTRACT

Lubricants additives are inseparable component of modern high-tech lubricants. Viscosity index improvers additives play uncoverable role in a branch of boundary lubrication. They are designed to ensure sufficient oil film thickness in low speeds of frictional surfaces motion. This thesis deal with effect of specific viscosity index improvers additives on boundary lubrication film formation in elliptical contact. The purpose of this work is also checking the effect of concentration changing these additives on lubrication film thickness formation.

KEYWORDS

Boundary lubrication, viscosity index improvers, elliptical contact, lubricant film thickness

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

SÚKENÍK, J. *Vliv mazivostních přísad na snižování opotřebení třecích povrchů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 58 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Ivan Křupka, Ph.D.



ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som diplomovú prácu vypracoval samostatne ako autorskú prácu, pod odborným vedením prof. Ing. Ivana Křupky, Ph.D. a za použitia uvedenej literatúry.

V Brne, dňa 27.5.2010

.....

Podpis



POĎAKOVANIE

Chcel by som sa poďakovať predovšetkým prof. Ing. Ivanovi Křupkovi, Ph.D. za cenné rady a odborné vedenie počas celého priebehu vypracovania práce. Ďalej by som sa rád poďakoval Ing. Petrovi Svobodovi, Ph.D., ktorý ma oboznámil s experimentálnymi zariadeniami. Taktiež ďakujem všetkým, ktorí sa podieľali na úspešnom splnení podmienok štúdia a realizácii mojej diplomovej práce.



OBSAH

ÚVOD	12
1 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA	13
1.1 Požiadavky kladené na moderné mazivá	13
1.2 Zloženie mazív	14
1.2.1 Základový olej	14
1.2.2 Mazivostné prísady (aditíva)	15
1.3 Charakteristiky mazív	18
1.3.1 Viskozita	18
1.3.2 Činitele ovplyvňujúce viskozitu	19
1.4 Doterajšie experimentálne výsledky v oblasti polymérnych modifikátorov viskozity	21
1.4.1 Boundary Film Formation by Viscosity Index Improvers (1996)	21
1.4.2 The Design of Boundary Film-Forming PMA Viscosity Modifiers ...	25
1.4.3 The influence of thin boundary films on real surface roughness in thin film, mixed EHD contact	33
2 FORMULÁCIA RIEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO ANALÝZA.....	36
3 VYMEDZENIE CIEĽOV PRÁCE	37
4 NÁVRH METODICKÉHO PRÍSTUPU K RIEŠENIU.....	38
4.1 Stanovenie postupu experimentu	39
4.2 Testované mazivá	40
4.3 Vedľajšie merania	40
4.3.1 Meranie elipticity trecieho telesa.....	41
4.3.2 Meranie indexu lomu.....	41
4.3.3 Meranie dynamickej viskozity.....	42
4.4 Hlavné merania	43
5 ANALÝZA A INTERPRETÁCIA ZÍSKANÝCH VÝSLEDKOV	47
5.1 Vplyv jednotlivých polymérnych modifikátorov viskozity na hrúbku mazacieho filmu	47
5.1.1 PAMA (polyalkylmetacrylate)	48
5.1.2 OCP (olefin copolymer)	48
5.1.3 Styren-isopren.....	49
5.2 Vplyv koncentrácie mazivostných prísad na hrúbku mazacieho filmu	51
5.3 Pôsobenie polymérnych modifikátorov viskozity v eliptickom tribologickom kontakte.....	52
6 ZÁVER	54
ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	55
ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV.....	56
ZOZNAM TABULIEK.....	58

ÚVOD

Kvalitné mazanie strojných súčastí a ich jednotlivých tribologických skupín je nevyhnutné z hľadiska ich bezporuchovej a ekonomickej prevádzky. Neoddeliteľnou súčasťou tohto procesu je mazacie médium a jeho kľúčové tribologické vlastnosti. Dnes by samotné mazivo ako frakcia ropy nedokázalo splniť extrémne požiadavky mnohých aplikácií, a preto je nutná jeho aditivácia. Tieto mazivostné prísady (aditíva), zohrávajú dôležitú úlohu v extrémnych prípadoch, vznikajúcich behom prevádzky strojných zariadení a ich jednotlivých tribologických skupín. Takýmto prípadom je z hľadiska tribológie oblasť medzného mazania, pri ktorom sa trecie povrchy nachádzajú v bezprostrednej blízkosti. To zapríčiňuje, že dochádza k vzájomnej interakcii medzi povrchovými nerovnosťami a zaťaženie nie je prenášané prostredníctvom hydrodynamického pôsobenia mazacieho filmu, ale prostredníctvom veľmi tenkého medzného filmu. Štruktúra a vlastnosti takéhoto filmu sú odlišné od štruktúry a vlastností samotného maziva a trecích povrchov. Tento jav zapríčiňujú práve aditíva zámerné primiešavané do mazív za účelom maximalizácie ochrany trecích povrchov. Ich vývoj si vyžiadala predovšetkým oblasť automobilového priemyslu.

Ako už bolo naznačené, mazanie tvorí neoddeliteľnú súčasť takmer každého strojného zariadenia. V súčasnosti sa mu začína venovať čoraz väčšia pozornosť, pretože predstavuje jednu zo zaručených alternatív zníženia spotreby energie, čo sekundárne znižuje obsah emisií vypúšťaných do ovzdušia, ale najmä predĺženia životnosti samotných strojných súčastí. Teda jednou z kľúčových funkcií mazania je ochrana trecích povrchov. Z rozsiahlych vedeckých skúmaní vyplynulo, že kritických oblastí mazania je hneď niekoľko. Prvou z nich je proces nábehu stroja do činnosti. V tomto prípade má mazacie médium (najčastejšie olej) teplotu svojho okolia, ktorá v prevažnej miere prípadov nie je ideálnou teplotou, pri ktorej mazivo spĺňa 100%-né požiadavky na mazanie trecích plôch. Jednoducho mazivo pri tejto teplote väčšinou nevykazuje ideálne fyzikálne vlastnosti, pre ktoré bolo navrhnuté. Druhá kritická oblasť mazania nastáva v prípade zvratného pohybu dvoch trecích plôch (tribologická skupina). V tomto prípade nastáva okamih, kedy je rýchlosť vzájomne sa pohybujúcich trecích povrchov nulová. To z tribologického hľadiska predstavuje kritickú situáciu, pretože mazivo v tomto okamihu nie je prirodzene „vťahované“ do kontaktu vplyvom vzájomného pohybu trecích plôch. To spôsobuje, že hrúbka mazacieho filmu je v tomto okamihu takmer nulová a mazanie musí byť zabezpečené špeciálne vyvinutými mazivostnými prísadami (aditívami), ktoré aj v tomto prípade zabezpečujú dostatočné oddelenie trecích povrchov vzájomne sa pohybujúcich súčastí. Tieto špeciálne vyvíjané zložky mazív sú pridávané do samotných základových olejov, ktoré tvoria maticu jednotlivých mazív. Táto práca sa zaoberá predovšetkým problematikou utvárania medzného mazacieho filmu prostredníctvom použitia neformulovaných polymérnych modifikátorov viskozity rôznych druhov a koncentrácií, ktoré sú komerčne dostupné. Ich pôsobenie bolo skúmané v eliptickom kontakte za použitia metódy optickej interferometrie.

1 PREHĽAD SÚČASTNÉHO STAVU POZNANIA

1

Ako už bolo v úvode naznačené, najväčším ťahúňom v oblasti vývoja mazív je automobilový priemysel. Niet sa čomu diviť, pretože motorový olej patrí medzi technologicky najzložitejšie olejárske výrobky a svojimi vlastnosťami musí čeliť množstvu často protichodným technickým požiadavkám a parametrom, ktoré je možné rozdeliť do niekoľkých nasledujúcich oblastí [1]:

1.1 Požiadavky kladené na moderné mazivá

1.1

Oblasť trenia a opotrebenia:

- minimalizácia trenia a opotrebenia
- zníženie spotreby paliva
- odolnosť olejového filmu proti pretrhnutiu
- ochrana trecích plôch proti mechanickému poškodeniu (pitting)
- priľnavosť k trecím plochám

Oblasť teploty a viskozity:

- tepelná stabilita
- odolnosť proti oxidácii
- dobrá čerpatelnosť
- čo možno najmenšia závislosť viskozity na teplote
- mechanická stabilita v strihu

Oblasť čistoty:

- disperzné schopnosti
- detergentné účinky
- zabránenie vzniku horúcich kalov
- zabránenie vzniku studených kalov
- odolnosť voči vode
- zabránenie tvorby usadenín v spaľovacom priestore

Oblasť ďalších dôležitých fyzikálnych a chemických vlastností:

- ochrana pred koróziou
- neutralizačné vlastnosti
- tepelná a oxidačná stabilita
- znášanlivosť s neželeznými kovmi a lakmi
- znášanlivosť s elastomérnymi tesneniami
- potlačenie penivosti
- dobrá odlučivosť vzduchu
- tesniaca schopnosť
- dobrá tepelná vodivosť – chladiaca účinnosť

Oblasť aplikácie:

- miesiteľnosť a znášanlivosť s ostatnými motorovými olejmi
- dlhé výmenné intervaly
- použiteľnosť v rôznych typoch motorov
- žiadne negatívne vplyvy na zdravie a životné prostredie

1.2 Zloženie mazív

Výroba moderných mazív sa skladá z troch základných operácií:

- výroba základového oleja (base stock)
- výroba aditív
- miesenie a výroba konečného maziva

1.2.1 Základový olej

Základ (base) pre mazacie oleje vzniká z viskóznejších zložiek surovej ropy destiláciou, pričom práve táto zložka najviac ovplyvní kvalitu základového oleja. Najvýznamnejší podiel na vlastnostiach má kvalita spracovávanej ropy - najmä obsah síry. Nie každá ropa je svojou kvalitou vhodná na výrobu motorového oleja a taktiež aj rôzne olejárske spoločnosti používajú pre svoj finálny výrobok rôznu kvalitu základového oleja (base stock). Niektoré spoločnosti využívajú na výrobu motorového oleja vysoko kvalitný základový olej doplnený starostlivo namiešanými aditívami, ktorým v konečnej fáze upraví vlastnosti svojho finálneho výrobku na požadovanú kvalitu. Iné spoločnosti zase volia pre výrobu lacnejší, menej kvalitný základový olej, ktorý vo výrobnom procese doplnia väčším množstvom chemických zložiek (aditív) aby vytvorili produkt, svojimi vlastnosťami podobný tomu vytvorenému z kvalitnejšieho základového oleja. Avšak kvalita a výkonnosť takto vytvorených olejov sa môže značne líšiť, a to aj keď obidva oleje dosahujú rovnakých kvalitatívnych špecifikácií stanovených normou.

Druhy základových mazacích olejov:

Minerálny základový olej

Minerálne základové oleje sa vyrábajú destiláciou z ropy. Majú sklon k tvorbe čiernych kalov, ktoré vznikajú pôsobením vlhkosti a z tohto dôvodu rýchlejšie degenerujú. Nie sú však náchylné k degenerácii z krátkodobého pôsobenia vysokých teplôt ako napríklad syntetické základové oleje. [2]

Syntetický základový olej

Syntetické základové oleje sa vyrábajú veľmi náročnou technológiou. Z ropného základu sa extrahujú iba tie zložky, ktoré sú pre mazanie vhodné na rozdiel od minerálnych základových olejov. V syntetickom základovom oleji teda nezostávajú nepotrebné a nevhodné zložky, ktoré sa nedajú normálnou frakčnou destiláciou odstrániť. Oxidácia syntetických základových olejov je pomalšia a taktiež ich schopnosť aditívácie je výrazne vyššia ako pri minerálnych základových olejoch.

Polosyntetické základové oleje

Polosyntetické základové oleje predstavujú akýsi kompromis medzi minerálnymi a plne syntetickými základovými olejmi. Výroba spočíva na minerálnom základe, do ktorého sa pridáva syntetický olej určitého zloženia. Minimálny obsah syntetickej zložky je daný normou (minimálne 20% celkového objemu), avšak súčasné špičkové polosyntetické oleje obsahujú až 65% syntetickej zložky. Kvalitatívne sú polosyntetické motorové oleje na vyššej úrovni ako minerálne oleje. [2]

1.2.2 Mazivostné prísady (aditíva) [3]

Aditíva (mazivostné prísady) pridávané do mazív sú špeciálne navrhnuté chemické zlúčeniny k dosiahnutiu špecifických vlastností konečného produktu. Ich základnou úlohou je ovplyvnenie vlastností základového oleja tak, aby sa dosiahli požadované vlastnosti konečného produktu. Aj keď je základový olej rovnaký, v konečnom dôsledku môžu vzniknúť finálne mazivá rozdielnych vlastností. Je teda zrejmé, že množstvo a zloženie aditív má výrazný vplyv na vlastnosti mazív samotných. Mazivostné prísady rozdeľujeme na základe ich vlastností a chemického zloženia do nasledujúcich skupín:

Polymérne modifikátory viskozity (VISCOSITY INDEX IMPROVERS)

Tieto chemické zlúčeniny na báze polymérov zabezpečujú v určitých špecifických prípadoch chovanie maziva adekvátne stávajúcim podmienkam. Takýmito prípadmi sú podmienky, kedy sa v kontakte nenachádza dostatočná hrúbka maziva z dôvodu nízkej rýchlosti vzájomného pohybu trecích povrchov. V takomto prípade mazivo nie je dostatočne vťahované do kontaktu – medzné mazanie. Vrstva maziva nemá dostatočnú hrúbku na úplné oddelenie dvoch trecích povrchov a dochádza ku kontaktu ich nerovností. Tento jav je z tribologického hľadiska nežiadúci a pre bežné neaditívované mazivá (základové oleje) predstavuje neprekonateľný problém. Z tohto dôvodu sa aj v minulosti hľadali látky (chemické zlúčeniny), ktoré by boli schopné tomuto javu zabrániť tým, že by sa dokázali naviazať (adsorbovať) na jednotlivé trecie povrchy a tým ich vo vyššie spomenutých kritických fázach mazania oddeliť. Zlúčeniny tohto typu sa používajú v motorových olejoch od 50-tych rokov 20. storočia, vtedy sa však vedelo iba o ich pozitívnom vplyve v oblasti medzného mazania, ale nevedelo sa takmer nič o mechanizme ich pôsobenia v mieste kontaktu. Prvé poznatky z tejto oblasti sa objavili až v 90-tych rokoch minulého storočia, kedy bola objasnená myšlienka ich účinku v oblasti medzného mazania. Tá bola objasnená na základe adsorpcie týchto zlúčenín (polymérnych modifikátorov viskozity) na kovových povrchoch. Mechanizmus naviazania polymérnych modifikátorov viskozity na kovové povrchy spočíva na základe rozdielu elektronegativít väzobných atómov trecieho povrchu (kovu) a samotnej zlúčeniny (polymérneho modifikátoru viskozity). Rozdiel týchto elektronegativít zabezpečí naviazanie sa polyméru na kovovú vrstvu trecieho povrchu prostredníctvom chemickej kovalentnej väzby [4]. Samotný aditívovaný polymérny modifikátor viskozity má vlastnú viskozitu až 30-násobne vyššiu ako základový olej, do ktorého je primiešavaný, pritom viskozitu samotného maziva v bežných koncentráciách takmer neovplyvňuje. Na trecom povrchu sa tak vytvorí vrstva polyméru, ktorá je niekoľkonásobne viskóznejšia ako mazivo nachádzajúce sa v ostatných miestach kontaktu. To spôsobuje oddelenie trecích povrchov a nárast hrúbky mazacej vrstvy oproti použitiu základového neaditívovaného oleja aj v kritických prípadoch spomenutých vyššie. Ako už bolo načrtnuté, tento jav je najmarkantnejší pri nízkych rýchlostiach vzájomného pohybu trecích povrchov, kedy je hrúbka mazacieho filmu aj podľa teórie elasto-hydrodynamického (EHD) mazania najtenšia. Vo vyšších rýchlostiach vzájomného pohybu trecích povrchov je mazivo prirodzene vťahované do kontaktu a v mieste kontaktu nastáva proces tvorby EHD mazacieho filmu. Ten sa vyznačuje tým, že hrúbka EHD filmu je dostatočne hrubá na kompletne oddelenie trecích povrchov, sily pôsobiace v mieste kontaktu sú ekvivalentné silám pôsobiacich

elastických deformácií ich materiálu, a tým zabezpečuje ideálnu ochranu trecích povrchov.

Čistiace a rozpúšťacie prísady (DETERGENT AND DISPERSANTS)

Nachádzajú uplatnenie najmä v oblasti mazania spaľovacích motorov, kde usadeniny oleja ulpievajúce na piestnych krúžkoch a v mazacom systéme spôsobujú rapídne opotrebenie a upchanie mazacích kanálov. Výrobcovia motorových olejov do svojich výrobkov primiešavajú aditíva, ktoré zabraňujú tvorbe usadenín a udržiavajú mazací systém čistý. Vývoj týchto aditív bol veľmi progresívny a časom sa objavovali pokročilejšie chemické zlúčeniny, ktoré ešte účinnejšie redukovali tento sprievodný jav spaľovania. Práve tieto aditíva sú označované ako detergenty a disperzanty.

Detergenty sú chemické zlúčeniny brániace tvorbe usadenín a redukuje mieru ich hromadenia. Pracujú na základe neutralizácie kyselín ako produktu spaľovania. Jedným z hlavných dôvodov, prečo je olej potrebné meniť v pravidelných intervaloch je zbavenie sa týchto neutralizovaných znečistení spolu s olejom, kým olej nestratí schopnosť ich neutralizácie.

Dispersanty sú chemické zlúčeniny, ktoré vylučujú a zadržujú nečistoty a usadeniny. Tie sú dôsledkom spaľovania a oxidácie oleja. Schopnosť oleja neutralizovať kyslé škodliviny ako produkt spaľovania určuje tzv. **TBN** (Total Base Number). Je to charakteristická veličina rezervy alkalinity (zásaditosti). Čím je hodnota TBN vyššia, tým je aj schopnosť oleja neutralizovať kyslé produkty spaľovania účinnejšia. Priemerné hodnoty sa pohybujú okolo TBN 12.

Prísady proti napeneniu (ANTI-FOAM AGENTS)

Extrémne premiešavanie oleja spôsobuje jeho napenenie. Tento jav je nežiaduci, pretože je pri ňom značne znížená funkcia mazania. Vzduch obsiahnutý v spenenom oleji by mohol spôsobiť problém pri hydraulicky ovládaných častiach strojných zariadení a v neposlednom rade ich kavitačné opotrebenie. Spenenie oleja je spôsobené pumpovaním oleja v systéme mazania a jeho následné premiešanie s plynmi nachádzajúcimi sa okolí. Princíp činnosti prísad proti napeneniu spočíva v tom, že sa tieto prísady naviažu na vzniknuté bubliny vzduchu, ktoré sa k sebe následne priblížia a nakoniec sa sami zničia. Prísady proti napeneniu potláčajú alebo úplne zabraňujú tvorbe peny v mazive pri jeho kontakte s plynmi v jeho okolí. Je mnoho testov, ktoré určujú, do akej miery je ten-ktorý olej schopný odolávať napeneniu.

Antikorózne prísady (RUST AND CORROSION INHIBITORS)

Sú špeciálne aditívne prísady, ktoré sa naviažu na vnútorné komponenty mazacieho systému a zabraňujú tým tvorbe hrdze a rozožieraniu samotných vnútorných komponentov. Princíp ich činnosti spočíva vo vytvorení ochrannej vrstvy na povrchu, ktorá bráni kontaktu vody s kovovým povrchom. Tieto zlúčeniny sú extrémne priľnavé. Po prilnutí k povrchu plnia svoju funkciu pri odstavení mazania na dlhšiu dobu. Bránia tak kontaktu vzdušnej vlhkosti s kovovými súčasťami pri absencii maziva. Tieto aditíva tvoria pasívnu ochranu a vplyvom ich funkcie v sú priebehu životnosti maziva odbúravané. V súčasnosti sa používajú dva hlavné typy

korózných inhibítorov. Funkciou prvého z nich je chemické naviazanie sa na povrchy vnútorných častí mazacej sústavy a ich následná pasívna ochrana. Funkciou druhého typu je neutralizácia kyselín už obsiahnutých v mazive do takého stavu, aby už neboli schopné žiadneho poškodenia vnútorných častí motoru. Účinok týchto aditív závisí na dĺžke intervalov výmeny olejovej náplne. Bežné antikorozívne aditíva používané k tomuto účelu obsahujú zinok, fosfor, dietyl-difosfát zinočnatý (ZDDP), vápnik, bárium. Sulfonát bária a fenolát vápniku sú bežné chemické zlúčeniny, ktoré sú význačné vysokým obsahom alkalických (zásaditých) kovov ako bárium a vápnik. Tie sú schopné účinne neutralizovať kyseliny, kvôli svojej vysokej alkalinite. Tieto chemické aditívne zlúčeniny zohrávajú významnú úlohu v aditívii motorových olejov, kde palivá (benzín, motorová nafta) samotné sú pri svojom spaľovaní významným zdrojom kyselín spôsobujúcich koróziu vnútorných častí motorového priestoru.

Antioxidačné prísady (OXIDATION INHIBITORS)

Oxidácia je chemická reakcia maziva so vzdušným kyslíkom. Intenzita tejto degeneračnej chemickej reakcie je tým vyššia, čím je vyššia pracovná teplota maziva a prostredia, v ktorom toto mazivo plní svoju funkciu. Nie je ani tak dôležité koľko kyslíka dokáže motorový olej absorbovať, ale koľko oxidov sa v ňom jeho pôsobením vytvorí. Oxidácia spôsobuje zvýšenie viskozity, ako aj napomáha tvorbe kyselín, usadenín a nežiaducich povlakov hlavne na mazaných trecích povrchoch. Tieto povlaky zabraňujú dostatočnému odvodu tepla z trecích povrchov čo následne spôsobuje zvýšenie prevádzkovej teploty mazaného strojného zariadenia a jeho prehrievanie. Toto prehrievanie ešte viac urýchľuje degeneráciu maziva oxidáciou. Oxidačné inhibítory v princípe narušujú chemickú reakciu (oxidáciu), ale taktiež rozkladajú už vzniknuté nežiaduce produkty oxidácie. Povlaky a usadeniny nie sú tvorené iba z oleja pri vysokých teplotách, ale taktiež pri nízkych a stredných teplotách (napríklad procese spaľovania v spaľovacom motore). Použitelných oxidačných inhibítorov je nespočetné množstvo. Behom životnosti oleja však strácajú svoju účinnosť. Preto sú veľmi dôležité pravidelné výmeny olejovej náplne.

Prísady proti nadmernému opotrebeniu (ANTI-WEAR ADDITIVES)

Menej kvalitné minerálne základové oleje majú väčšiu pevnosť mazacieho filmu než kvalitné minerálne či syntetické základové oleje. Dôvodom sú aromatické uhľovodíky a hlavne sírne zlúčeniny, ktoré majú veľmi dobré protioderové vlastnosti. Avšak tieto protioderové vlastnosti sa dajú do značnej miery ovplyvniť práve prítomnosťou mazivostných a protioderových prísad vo výslednom produkte vzniknutom aditívii základového oleja a príslušných protioderových mazivostných prísad. Tieto mazacie prísady zapríčiňujú výrazné zvýšenie pevnosti mazacieho filmu. Vytvorenie takto pevného mazacieho filmu je možné dosiahnuť najmä použitím syntetických esterových olejov. Prísady proti opotrebeniu sa používajú kvôli situácii, ktorá nastáva v strojných zariadeniach za určitých špecifických prevádzkových podmienok, kedy sa pri hydrodynamickom mazaní konformných povrchov hydrodynamický mazací film nedokáže dostatočne rýchlo obnoviť po predchádzajúcom cykle (zvrtný pohyb trecích povrchov). Je to jav, ktorý sa nazýva medzné mazanie (boundary lubrication). Tento druh aditív pracuje

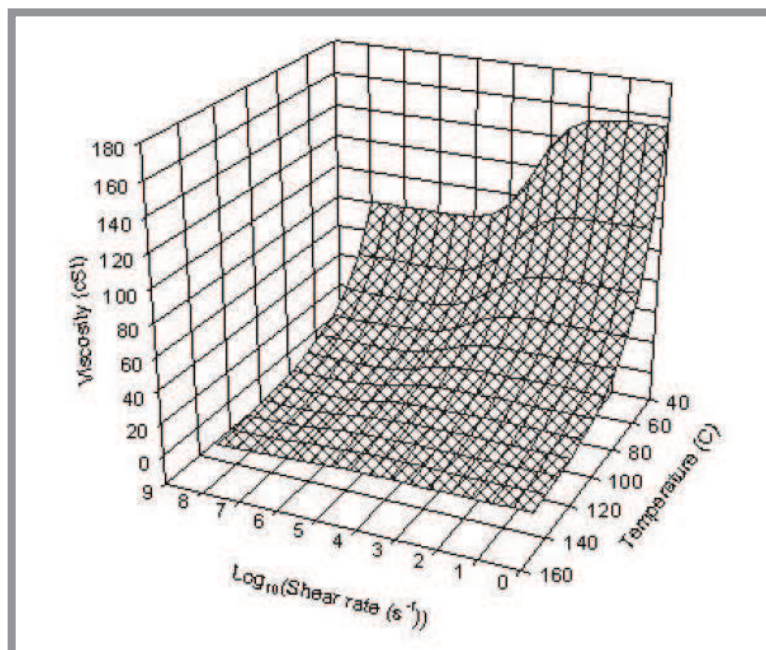
ako reduktor trenia medzi vzájomne sa pohybujúcimi konformnými povrchmi. Zabráňuje najhoršiemu možnému prípadu, kedy dochádza k priamemu kontaktu povrchov kov-kov. Najpoužívanejšie ANTI-WEAR aditíva sú zlúčeniny zinku a fosforu. Ďalšou možnosťou je použitie tzv. EXTREME PRESSURE (EP) vysokotlakových mazacích prísad kvôli zníženiu trenia a ďalšiemu zabráneniu nadmerného opotrebenia silne namáhaných častí strojných zariadení. EP aditíva sú taktiež veľmi často používané v mazivách pre ozubené prevody. Z chemickej podstaty sú EP aditíva zlúčeninami síry, fosforu, chlóru alebo disulfátu molybdénu. Pomer jednotlivých zložiek závisí na konkrétnych podmienkach použitia daného maziva.

1.3 Charakteristiky mazív

1.3.1 Viskozita [5]

Viskozita je základným parametrom pre hodnotenie mazív. Predstavuje mieru vnútorného trenia kvapaliny, spôsobeného odporom molekúl pri vzájomnom pohybe. **Kinematická viskozita** [m^2/s] sa meria pomocou kapilárneho alebo rotačného viskometru. Meranie pomocou kapilárneho viskometru je viac používané a jeho princíp spočíva v meraní prietoku kvapaliny cez kapiláru. Čím je kvapalina hustejšia, tým je väčšia jej váha a prietok je väčší.

Násobením kinematickej viskozity hustotou oleja dostaneme **dynamickú viskozitu** [Pa.s]. **Viskózny index** je závislosť viskozity na teplote a je vyjadrený jedným číslom. Čím je toto číslo vyššie, tým je teplotný gradient viskozity menší. Teda priebeh teplotne-viskóznej krivky je plochejší a viskozita sa so zmenou teploty mení len veľmi málo. Na stykovej ploche dvoch vrstiev tekutiny pohybujúcich sa rôznou rýchlosťou sa prejavuje viskozita tečným napätím, ktorým sa snaží rýchlejšia vrstva urýchľovať pomalšiu, a tá naopak zadržiavať vrstvu rýchlejšiu. Viskozita je jednou z najdôležitejších vlastností, ktorá ovplyvňuje tokové vlastnosti látok. Určuje vlastne režim mazania, tvorbu a únosnosť mazacieho filmu, veľkosť odporu pohyblivých častí, tesniacu schopnosť a čerpatelnosť (čerpatelnosť charakterizuje chovanie sa odporu pohyblivých častí pri nízkych teplotách, ich schopnosť nasávania do olejového čerpadla a vytlačovania z neho). Kľúčovým parametrom maziva je zmena jeho viskozity pri daných podmienkach. Viskozita sa mení hlavne v závislosti na teplote, tlaku a veľkosti strižných síl pôsobiacich pri styku jednotlivých trecích častí strojných zariadení (obr. 1). Táto zmena viskozity v závislosti na daných podmienkach určuje, do akej miery je mazivo schopné plniť svoju funkciu napríklad v náročných podmienkach spaľovacieho motora. Moment, kedy môže dôjsť k porušeniu celistvosti mazacieho filmu, je daný pevnosťou mazacieho filmu. Túto vlastnosť motorového oleja udáva parameter **HTHS** (High Temperature High Shear) viskozity. Je to viskozita motorového oleja pri vysokých teplotách a za pôsobenia veľkých strižných síl (vysoké zaťaženie). Čím je HTHS viskozita vyššia, tým je väčšinou vyššia aj pevnosť mazacieho filmu.



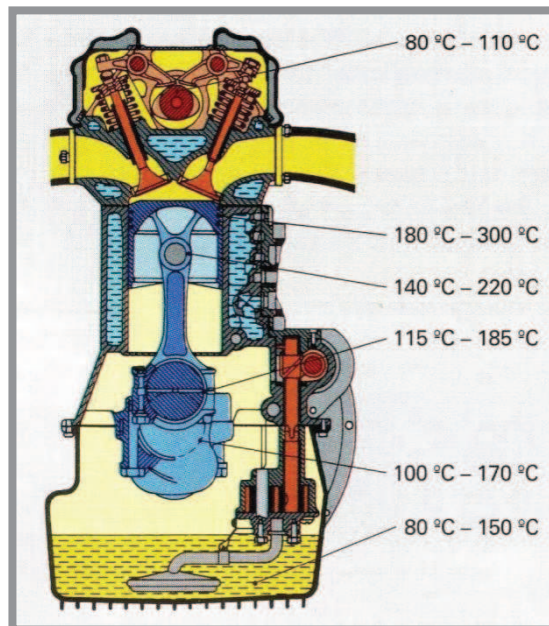
Obr. 1 Zmena viskozity v závislosti na teplote a veľkosti strižných síl [6]

1.3.2 Činitele ovplyvňujúce viskozitu

1.3.2

Vplyv teploty na viskozitu maziva [5]

Viskozita maziva s rastúcou teplotou klesá a naopak s klesajúcou teplotou narastá. Mazivá musia z tohto hľadiska spĺňať dve protichodné požiadavky. Na jednej strane musia byť dostatočne tekuté pri nízkych teplotách (zima) pre zabezpečenie čo najnižšieho opotrebenia behom prevádzky v chladných podmienkach a v podmienkach vyskytujúcich sa pri nábehu strojného zariadenia, kedy má mazivo teplotu svojho okolia. Je to kvôli tomu, aby sa mazivo čo najrýchlejšie dostalo do celého mazacieho systému a to sa dá zabezpečiť jedine čo najvyššou tekutosťou. Na strane druhej musí byť mazivo dostatočne viskózne pri vysokých prevádzkových teplotách, kedy zariadenia pracujú pod vysokým zaťažením. Je to veľmi dôležité z hľadiska stability mazacieho filmu vytváraného na mazaných plochách. Keby nebolo mazivo za týchto podmienok dostatočne viskózne, mohlo by dôjsť k rozrušovaniu a pretrhávaniu mazacieho filmu, čo by spôsobilo prechod od hydrodynamického / elasto-hydrodynamického mazania k zmiešanému a časom až k medznému mazaniu. Tým by došlo k nežiaducemu zvýšeniu trenia a kontaktu kov na kov, ktoré by vyústilo do nadmerného opotrebenia trecích povrchov. Tieto rozmanité teplotné podmienky, ktorým čelia mazivá je možné ilustrovať na podmienkach, ktoré sa nachádzajú v spaľovacom motore (obr. 2).



Obr. 2 Približné teploty v jednotlivých častiach spaľovacieho motoru [7]

Vplyv zaťaženia na viskozitu maziva [5]

Viskozita oleja závisí na zaťažení. Čím je zaťaženie vyššie, tým je vyžadovaná vyššia viskozita maziva. Zaťaženie je úzko späté s prevádzkovou teplotou a veľkosťou pôsobiacich strižných síl.

Vplyv rýchlosti vzájomného pohybu trecích povrchov na viskozitu maziva [5]

So vzrastajúcou rýchlosťou vzájomného pohybu trecích povrchov sa olej dostáva obtiažnejšie do mazacieho priestoru a je z neho rýchlejšie vytláčaný. Čím je vzájomná rýchlosť pohybujúcich sa trecích plôch vyššia, tým musí byť viskozita použitého maziva nižšia.

Vplyv prevádzkových podmienok na viskozitu maziva [5]

Prevádzkové podmienky, počas ktorých je motorový olej využívaný majú taktiež rozhodujúci vplyv na jeho viskozitu. Jedným z najdôležitejších parametrov je pritom dĺžka doby používania jednej náplne maziva. V súčasnosti sa už môžeme stretnúť s tzv. „long life“ mazivami, ktoré sa vyznačujú dlhými výmennými intervalmi. Avšak viskozita každého maziva sa behom jeho životnosti mení. Má na to vplyv niekoľko faktorov. Jedným z najdôležitejších je oxidácia (starnutie) motorového oleja, ktorá zapríčiňuje nárast viskozity motorového oleja.

Viskozita mazív však nie je jediným kvalitatívnym ukazovateľom maziva. Podstatnou mierou je možné kvalitu mazív ovplyvniť rôznymi mazivostnými prísadami, ktoré upravujú správanie sa maziva v tribologickom kontakte a tým podstatnou mierou zlepšujú kvality mazív samotných. Týmto spôsobom je taktiež možné kompenzovať rôzne nežiadúce vlastnosti čistých základových olejov

a prispôbiť tak mazivo tak, aby čo najviac spĺňalo požiadavky konkrétnej aplikácie, na ktorú bude použité (napr. motorové oleje). Jedným z takýchto mazivostných prísad sú práve polymérne modifikátory viskozity, ktorým sa venuje taktiež výskumná časť tejto práce. Tie svojou činnosťou zabezpečujú podstatné zlepšenie mazacích funkcií maziva v podmienkach medzného mazania.

1.4 Doterajšie experimentálne výsledky v oblasti polymérnych modifikátorov viskozity

1.4

Objavenie metódy optickej interferometrie umožnilo významný rozvoj v oblasti sledovania správania sa polymérnych modifikátorov viskozity a ich vplyvu na utváranie medzného mazacieho filmu. To zapríčinilo vyjasnenie v spôsobe chápania mechanizmu utvárania týchto tenkých medzných filmov práve vďaka polymérnym modifikátorom viskozity. Výsledky jednotlivých doteraz publikovaných prác zaoberajúcich sa touto problematikou sú zachytené v nasledujúcej časti práce takisto so závermi, ktoré zo získaných výsledkov vyplývajú.

1.4.1 Boundary Film Formation by Viscosity Index Improvers (1996) [8]

1.4.1

Jednou z prvých experimentálnych štúdií je práca publikovaná pod názvom Boundary Film Formation by Viscosity Index Improvers v Júli roku 1996. Na tejto práci sa podielali významné osobnosti v obore tribológie, ako sú Matthew Smeeth, Hugh Spikes a Selda Gungel z univerzity Imperial College v Londýne. Práca sa zaoberá ako jedna z prvých väčším množstvom polymérnych modifikátorov viskozity a ich správaním sa v kritických podmienkach utvárania medzného mazacieho filmu.

Experimentálna časť práce prebiehala na tribometri, pracujúcom na princípe optickej interferometrie opísanej v predchádzajúcej časti práce. Ako tribologická skupina bola použitá leštená oceľová guľička (AISI 52100) priemeru 19,05 mm v kontakte so zafírovým diskom pokrytým polopriepustnou vrstvou chrómu a oxidu kremičitého. Priemerná drsnosť trecích povrchov týchto dvoch telies bola 15nm. Vzájomná rýchlosť trecích povrchov bola zabezpečená vhodne zvoleným prevodom tak, aby bolo možné dosiahnuť rýchlosti od 0,0002 m/s. Všetky experimenty boli prevádzané prostredníctvom čistého valenia (slide-to-roll ratio = 0), teda poháňaná bola len oceľová guľička a disk bol voľne unášaný. Takto vybavená tribologická skupina bola uzatvorená v izolovanej a temperovanej komore, ktorá zabezpečovala konštantné tepelné podmienky počas celého priebehu experimentu. Ten bol prevádzaný pri teplotách od 20°C do 150°C, pričom tieto teploty predstavujú reálne podmienky prevádzky strojných mechanizmov. Temperovaná komora zabezpečovala konštantnú teplotu počas celého trvania experimentu s presnosťou $\pm 0,5^\circ\text{C}$ a merania prebiehali konkrétne pri teplotách 22,5°C, 30°C, 50°C, 80°C, 120°C a 150°C. Ako referenčné mazivo bol použitý minerálny základový olej. Jednotlivé polymérne modifikátory zapojené do experimentu sa nachádzajú v nasledujúcej tabuľke (Tab. 3), pričom ich koncentrácia v referenčnom základovom oleji bola zvolená tak, aby bola viskozita výsledného maziva pri jednotlivých úrovniach teplôt porovnateľná s ostatnými v teste zahrnutými aditívami (Tab. 4).

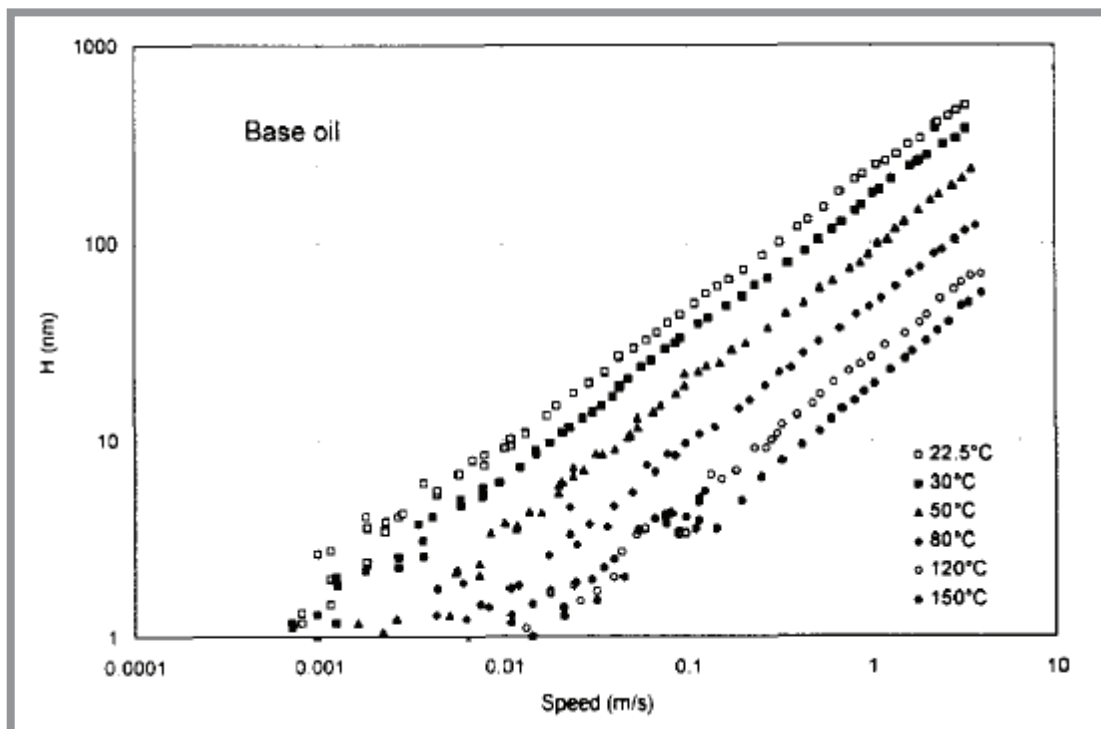
ABBR.	POLYMER TYPE	APPROX. MWt (M _w)
OCP-1	Olefin copolymer	99000
OCP-2	Olefin copolymer	220000
PSB	Poly(styrene-b-isoprene) block copolymer	280000
HIP-S	Hydrogenated isoprene star copolymer	548000
PMA-O	Mixed PMA/olefin copolymer	144000
PMA	Polymethacrylate	427000
OCP-D	Dispersant poly(ethylene propylene) copolymer	99500
OCP-P	Olefin copolymer with polyethylene segments	220000

Tab. 1 Polymérne modifikátory viskozity zahrnuté v experimente spolu s ich molekulovými hmotnosťami [8]

POLYMER	CONCENTRATION (wt.%)	LOW SHEAR RATE VISCOSITY (cP)	
		30°C	120°C
None (Base Oil)		25.3	2.46
OCP-1	6	43.7	3.95
OCP-1	10	63.4	5.28
OCP-2	6	44.6	3.99
OCP-2	10	64.7	5.36
PSB	6	45.3	4.11
PSB	10	64.5	5.47
HIP-S	6	50.2	4.45
HIP-S	10	76.5	6.61
PMA-O	6	50.0	4.61
PMA-O	10	89.0	7.83
PMA	6	44.7	4.88
PMA	10	66.4	7.22
OCP-D	0.27	30.3	2.89
OCP-D	0.81	45.0	3.96
OCP-D	1.35	67.1	4.74
OCP-P	6	43.7	3.95
OCP-P	10	61.9	5.23

Tab. 2 Jednotlivé koncentrácie polymérnych modifikátorov viskozity obsiahnutých v experimente [8]

Z výsledkov pozorovania správania sa minerálneho základového oleja pri jednotlivých teplotách je možné usúdiť, že výsledky experimentálneho merania korešpondujú s elastohydrodynamickou teóriou. Tento jav je dostatočne preukázateľný v grafe (obr. 3), podľa ktorého sa smernice jednotlivých kriviek závislosti rýchlostí vzájomného pohybu trecích povrchov na hrúbke mazacieho filmu pohybujú v intervale 0,67 až 0,75, čo korešponduje s hodnotou 0,67 udávanou teóriou elastohydrodynamického mazania.

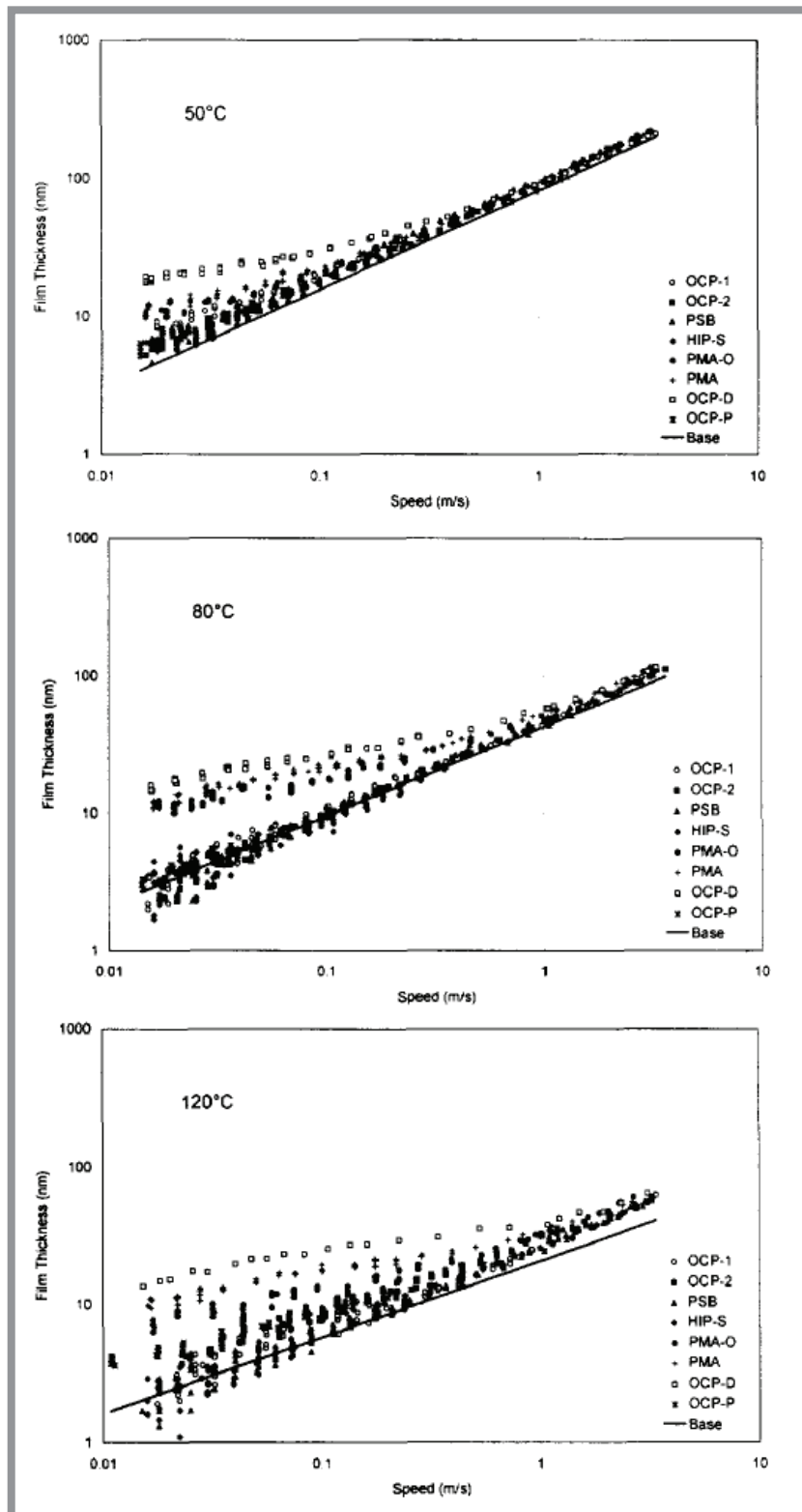


Obr. 3 Správanie sa referenčného základového oleja pri rôznych teplotách [8]

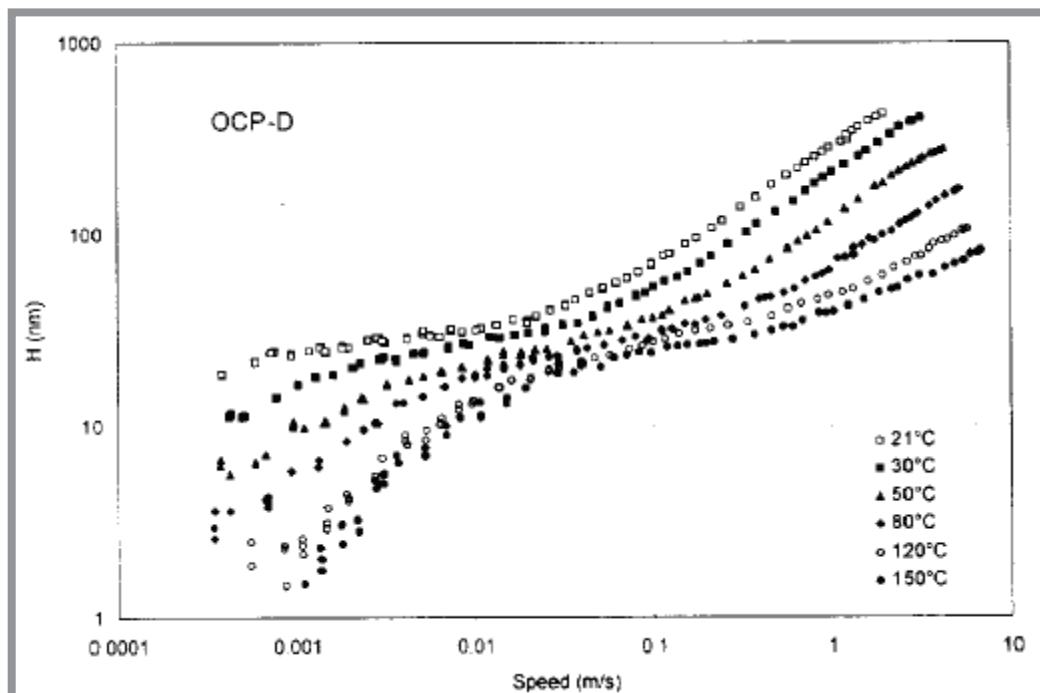
V nasledujúcom obrázku (obr. 4) je zachytené správanie sa jednotlivých polymérnych modifikátorov viskozity zahrnutých v teste pri rôznych teplotách. Plná čiara v grafoch vyjadruje referenčný minerálny základový olej. Jednotlivé polymérne modifikátory viskozity sú v tomto prípade použité v nižších koncentráciách podľa vyššie uvedenej tabuľky (tj. väčšinou 6%). Ako je z grafov vidno, podstatná časť týchto modifikátorov zabezpečuje iba nepatrné zvýšenie hrúbky mazacieho filmu, dokonca niektoré so zvyšujúcou sa teplotou zapríčiňujú jeho redukciu. Toto je veľmi nežiaduci jav z hľadiska tribológie. Avšak tri polymérne modifikátory zabezpečujú podstatný nárast hrúbky mazacieho filmu pri nízkych rýchlostiach. Konkrétne sú to OCP-D, PMA, PMA-O. Tento jav je spôsobený rôznou úrovňou polaritu jednotlivých modifikátorov viskozity, ktorá je zabezpečovaná prevažne funkčnými skupinami naviazanými na hlavný reťazec polyméru. Vo vyšších rýchlostiach sa hrúbka mazacieho filmu blíži k správaniu sa minerálneho základového oleja, čo korešponduje tak isto s teóriou elasto-hydrodynamického mazania a smernicou tejto závislosti na hodnote okolo 0,67.

Ďalší graf (obr. 5) zachytáva správanie sa jedného vybraného polymérneho modifikátoru viskozity, konkrétne OCP-D pri jednotlivých teplotách v koncentrácii 10%. Z výsledkov je zrejmé, že hrúbka mazacieho filmu s klesajúcou teplotou narastá, čo je spôsobené jednak zvyšujúcou sa celkovou viskozitou maziva s teplotou, ale taktiež správaním sa polymérneho modifikátoru v mieste kontaktu. Tento jav vyjadruje stálosť a odolnosť konkrétneho druhu polyméru v závislosti na teplote. Tento jav dokazuje, že mazivostné prísady (polymérne modifikátory viskozity) pracujúce na báze adsorbpcie sa stávajú neefektívnymi pri teplotách nad 150°C, kedy začína prebiehať proces desorbpcie a rozpúšťania (porušovanie väzieb). Táto závislosť však nie je rovnaká pre všetky polymérne modifikátory, a tak sú niektoré odolnejšie ako druhé. Závisí to predovšetkým na zložení samotného

modifikátoru, jeho funkčných skupín a samotnej molekulovej hmotnosti polyméru. Vo všeobecnosti však neplatí tvrdenie, že čím molekulová hmotnosť polymérneho reťazca vyššia, tým je účinok polymérneho modifikátoru viskozity pri nižších teplotách vyšší a naopak. Ako z experimentu vyplýva, je to veľmi individuálne.



Obr. 4 Správanie sa jednotlivých polymérnych modifikátorov viskozity pri rôznych teplotách [8]



Obr. 5 Mazivostná prísada OCP-D (10% koncentrácia) a jej správanie sa pri rôznych teplotách [8]

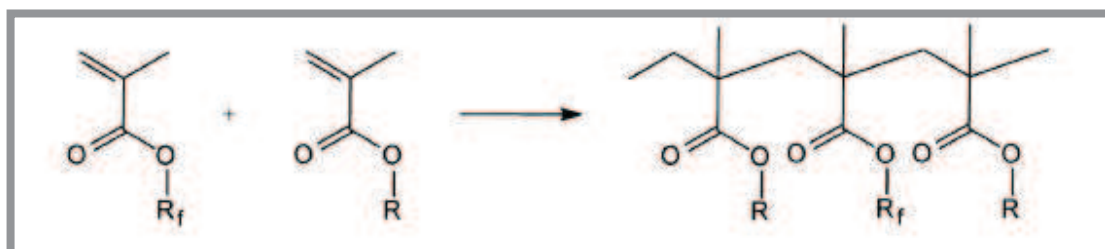
1.4.2 The Design of Boundary Film-Forming PMA Viscosity Modifiers [9]

1.4.2

Táto experimentálna štúdia polymérnych modifikátorov viskozity (PMA) bola publikovaná v roku 2006 skupinou vedcov (M. Mullera, K. Topolovec-Miklozic, A. Dardin a A. A. Spikesa). Práca pojednáva o fenoméne pôsobenia polymérnych modifikátorov viskozity na základe rôznej povahy chemického zloženia týchto aditív založených na chemickej skupine polymethacrylátu (PMA). Zameriava sa hlavne na rozdielny vplyv rôznych funkčných skupín, ich spôsobe rozmiestnenia v makromolekule polyméru (rôzna architektúra polymérov je docielená procesom kontrolovanej techniky polymerizácie) a molekulárnej hmotnosti. Vplyv každého z týchto javov bol preukázaný pomocou metódy optickej interferometrie a sledovaním súčiniteľa trenia. Na základe toho je v práci obsiahnutých niekoľko polymérnych modifikátorov viskozity líšiacich sa v jednotlivých charakteristikách spomenutých vyššie (rozdielna architektúra polymérov, ich funkčných skupín, molekulovej hmotnosti, ...). Skupina polymethacrylátov bola pre tento experiment zvolená z toho dôvodu, že monomér methacrylátu je pomocou technológie kontrolovanej polymerizácie jednoducho funkčne upraviteľný počas celej doby trvania procesu polymerizácie.

V experimente boli použité 2 druhy základového oleja. Základový olej skupiny 1 pod označením SN150 je minerálny olej, slúžiaci ako základový olej pre jednotlivé polymérne modifikátory viskozity založené na PMA skupine. Olej skupiny 2 pod označením SN600 bol používaný ako referenčný olej, pričom sa dbalo na to, aby jeho kinetická viskozita bola pri teplote 120°C porovnateľná s olejom skupiny 1 aditívaným jednotlivými aditívami v experimente pri rovnakej teplote. Zredukovalo sa tak ovplyvnenie výsledkov rôznymi viskozitami jednotlivých mazív.

Do experimentu boli zahrnuté jednak aditíva používané v predchádzajúcom experimente (PAMA, OCP, PIB) slúžiace na porovnanie výsledkov, ale predovšetkým celý rad aditív líšiacich sa svojím zložením funkčných skupín, architektúrou a molekulovou hmotnosťou. Ich hlavná štruktúra je zachytená na obrázku (obr. 6), kde R predstavuje alkylovú skupinu a R_f predstavuje funkčnú skupinu. Bolo skúmané široké spektrum funkčných skupín, z ktorých pár je zachytených na obrázku (obr. 7).

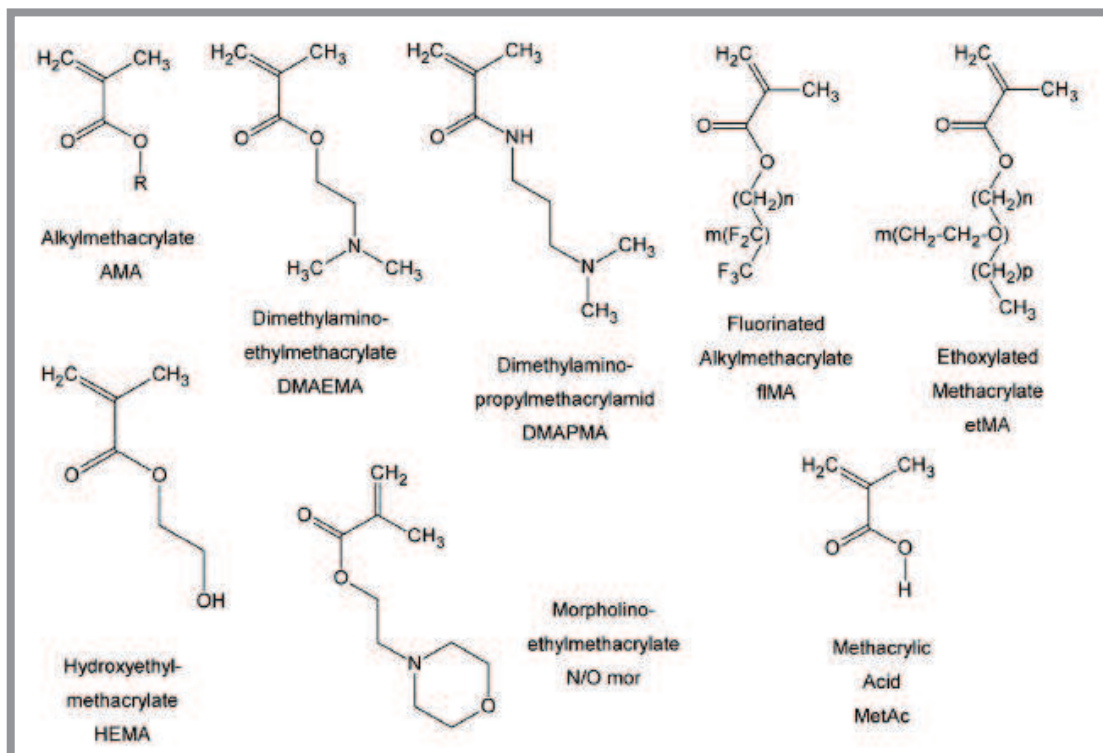


Obr. 6 Štruktúra a rozmiestnenie funkčných skupín funkčne modifikovaného PMA kopolyméru [9]

Objem použitých funkčných skupín v samotnej zlúčenine polyméru predstavoval vždy približne 10% (molárnych). Skúmané polymérne modifikátory viskozity boli rozdelené do dvoch skupín podľa molekulovej hmotnosti na polymérne modifikátory viskozity s nízkou molekulovou hmotnosťou ($M_w \leq 30\,000$) a na polymérne modifikátory viskozity s vysokou molekulárnou hmotnosťou ($M_w \geq 50\,000$). Toto rozdelenie bolo nevyhnutné z hľadiska pozorovania vplyvu molekulovej hmotnosti polymérnych modifikátorov viskozity na ich mazacie vlastnosti. Posledná diferenciácia polymérnych modifikátorov viskozity bola na základe ich rozloženia funkčných skupín v samotnej štruktúre polyméru podľa nasledujúcich spôsobov:

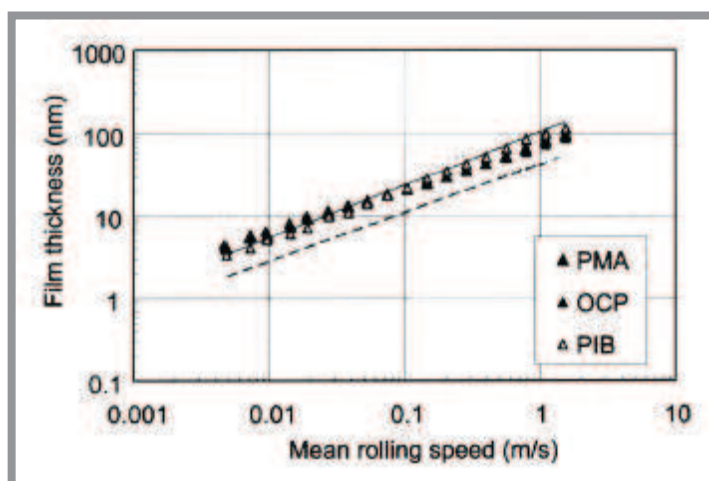
- funkčné skupiny sú v makromolekule polyméru štatisticky rovnomerne rozmiestnené
- funkčné skupiny sú v makromolekule polyméru nerovnomerne rozmiestnené v tzv. zhlukoch

Úplný zoznam použitých modifikátorov viskozity, ich použitých koncentrácií a hodnôt ich kinetických viskozít pri jednotlivých teplotách sa nachádza na nasledujúcom obrázku (obr. 8).

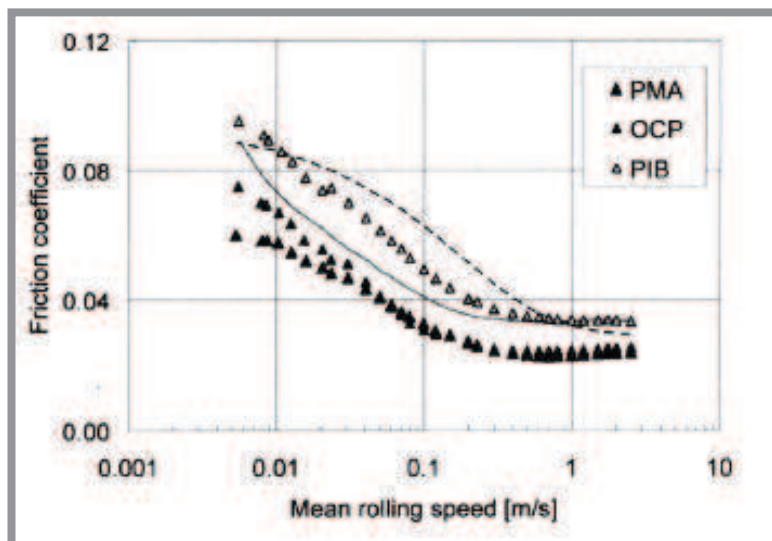


Obr. 7 Príklady funkčne upravených PMA monomérov obsiahnutých v experimente [9]

Polymérne modifikátory viskozity (PMA, OCP, PIB), ktoré boli obsiahnuté aj v predchádzajúcom experimente spomenutom vyššie, vykazovali rovnaké správanie (obr. 8). Ich výsledky však boli doplnené o meranie priebehu súčiniteľu trenia v závislosti na rýchlosti (obr. 9). Tieto merania prebiehali zhodne pri teplote 120°C.



Obr. 8 Priebeh hrúbky mazacieho filmu v závislosti na rýchlosti, polymérne modifikátory viskozity bez funkčnej skupiny (120°C) [9]

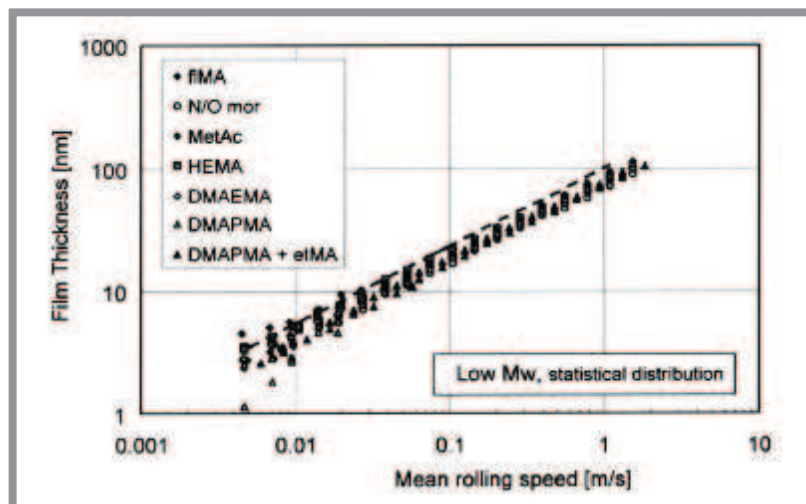


Obr. 9 Súčiniteľ trenia v závislosti na rýchlosti vzájomného pohybu trecích povrchov, polymérne modifikátory viskozity bez funkčnej skupiny (120°C) [9]

Plná čiara pritom predstavuje charakteristiku referenčného minerálneho oleja (SN600) a čiarkovaná charakteristiku čistého základového oleja (SN150). Charakteristiky polymérnych modifikátorov viskozity bez funkčnej skupiny (PMA, OCP, PIB) pritom ležia medzi týmito charakteristikami referenčného a základového oleja, pričom ich správanie zodpovedá zisteniam vyplývajúcich z predchádzajúceho experimentu. Zistenia týkajúce sa súčiniteľa trenia sú mierne odlišné. Polymérny modifikátore viskozity PIB vykazuje približne rovnaký koeficient súčiniteľa trenia ako čistý základový olej čo je spôsobené tým, že polymér PIB obsahuje veľa krátkych bočných reťazcov. Oproti tomu polymérne modifikátory viskozity PMA a OCP sú tvorené lineárnymi makromolekulami polyméru, ktoré sú flexibilné. Tento jav výrazne vplýva na zníženie súčiniteľa trenia v nižších rýchlostiach vzájomného pohybu trecích povrchov.

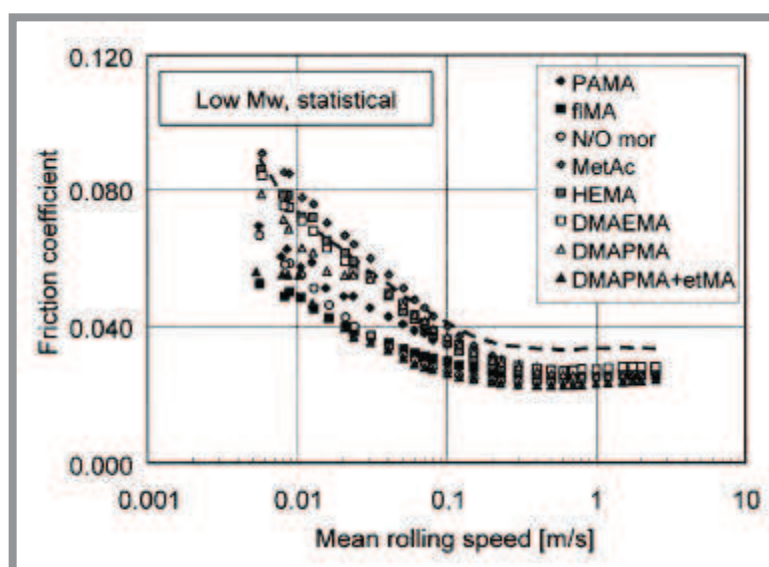
Vplyv funkčných skupín

V tejto časti experimentu boli obsiahnuté polymérne modifikátory viskozity obsahujúce štatisticky rovnomerne rozmiestnené funkčné skupiny s nízkou molekulovou hmotnosťou ($M_w \leq 30\,000$). Tak isto ako polymérne modifikátory viskozity bez funkčnej skupiny tvoria vo vyšších rýchlostiach vzájomného pohybu tenší mazací film ako referenčný minerálny olej (SN600). V nižších rýchlostiach sa prejavila schopnosť týchto aditív utvárať medzný mazací film, ktorá sa prejavila čiastočným nárastom hrúbky mazacej vrstvy (obr. 10).



Obr. 10 Hrúbka mazacieho filmu v závislosti na rýchlosti vzájomného pohybu trecích povrchov, polymérne modifikátory viskozity s funkčnou skupinou (120°C) [9]

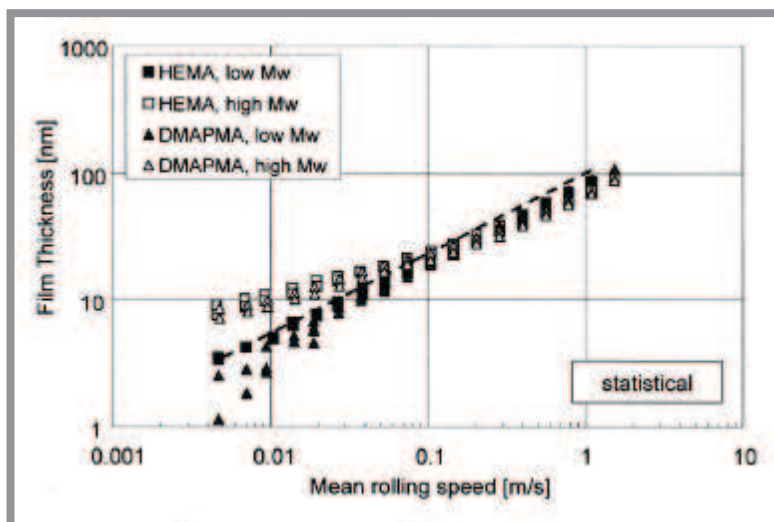
Hodnoty súčiniteľa trenia majú pri vyšších rýchlostiach vzájomného pohybu trecích povrchov rovnakú charakteristiku s približne rovnakými hodnotami súčiniteľa trenia, ktoré sú nižšie oproti súčiniteľu trenia referenčného minerálneho oleju (SN600). V nižších rýchlostiach vzájomného pohybu trecích povrchov sa však vyskytujú určité odlišnosti v správaní sa jednotlivých polymérnych modifikátorov viskozity obsahujúcich funkčnú skupinu. Niektoré dosahujú nižší a iné vyšší súčiniteľ trenia ako je referenčná hodnota súčiniteľa trenia polyméru PAMA. Avšak žiadny z použitých modifikátorov viskozity nedosiahol výrazné zníženie súčiniteľa trenia oproti referenčnému základovému oleju (SN600).



Obr. 11 Hodnoty súčiniteľa trenia vybraných polymérnych modifikátorov viskozity obsahujúcich funkčnú skupinu v závislosti na rýchlosti vzájomného pohybu trecích povrchov (120°C) [9]

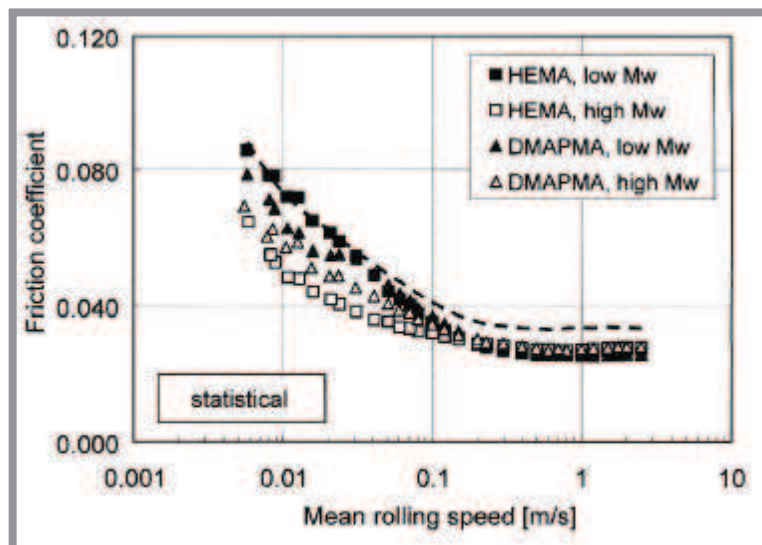
Vplyv molekulovej hmotnosti

Molekulová hmotnosť polymérneho reťazca preukázala zásadný vplyv ako na hrúbku mazacieho filmu tak na hodnotu súčiniteľa trenia. Ako je možné pozorovať z grafov priebehu hrúbky mazacieho filmu v závislosti na rýchlosti vzájomného pohybu trecích povrchov, polymérne modifikátory viskozity s vyššou molekulovou hmotnosťou preukazujú podstatný nárast hrúbky mazacieho filmu pri nižších rýchlostiach vzájomného pohybu trecích povrchov (utváranie medzného mazacieho filmu). Avšak hrúbka mazacieho filmu bola pri polyméroch s vyššou molekulovou hmotnosťou vo vyšších rýchlostiach preukázateľne nižšia, ako pri polyméroch s nižšou molekulovou hmotnosťou. Tento jav je spôsobený nižšími strihovými napätiami pôsobiacimi na polymérne modifikátory viskozity s nižšou molekulovou hmotnosťou (obr. 12).



Obr. 12 Vplyv molekulovej hmotnosti na hodnoty hrúbky mazacieho filmu v závislosti na rýchlosti (120°C) [9]

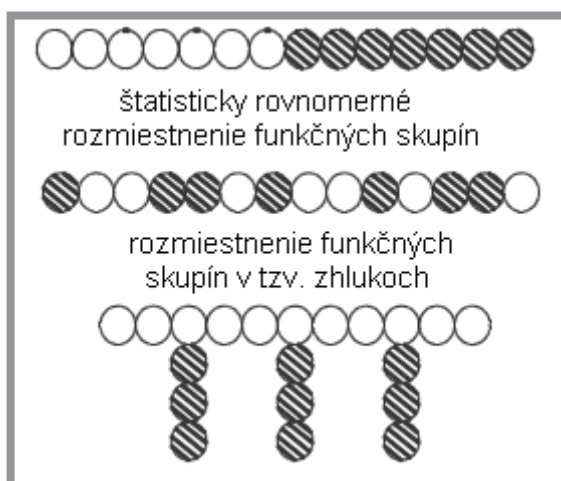
Vplyv molekulovej hmotnosti polymérnych modifikátorov viskozity na hodnotu súčiniteľa trenia má podobný priebeh. Polyméry v vyššou molekulovou hmotnosťou dosahujú podstatné zníženie hodnoty súčiniteľa trenia oproti polymérnym modifikátorom viskozity s nižšou molekulovou hmotnosťou (obr. 13). Tento jav je spôsobený skutočnosťou, že medzný film tvorený adsorbovanými polymérnymi modifikátormi viskozity má hrúbku približne ekvivalentnú polomeru makromolekuly polyméru. Hodnota polomeru makromolekulárneho polymérneho reťazca je pritom závislá na jeho dĺžke, ktorá narastá so vzrastajúcou molekulovou hmotnosťou [10].



Obr. 13 Vplyv molekulevej hmotnosti na hodnoty súčiniteľa trenia v závislosti na rýchlosti vzájomného pohybu trecích povrchov (120°C) [9]

Vplyv štruktúry polyméru (Polymer Architecture)

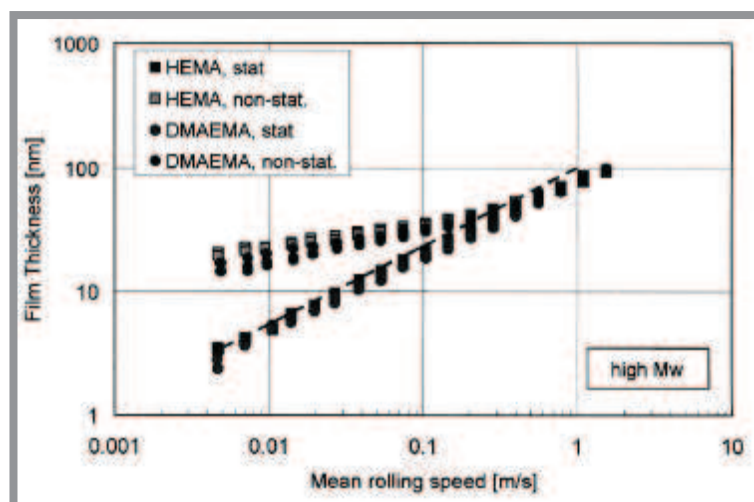
Táto časť experimentu bola zameraná na kopolyméry, ktorých funkčné monomérmé skupiny nie sú rozmiestnené štatisticky rovnomerne medzi jednotlivými lineárnymi reťazcami, ale sú sústredené do tzv. zhlukov skupín funkčných monomérov s vysokou hustotou umiestnených medzi hlavné reťazce alebo po stranách hlavného reťazcu (obr. 14).



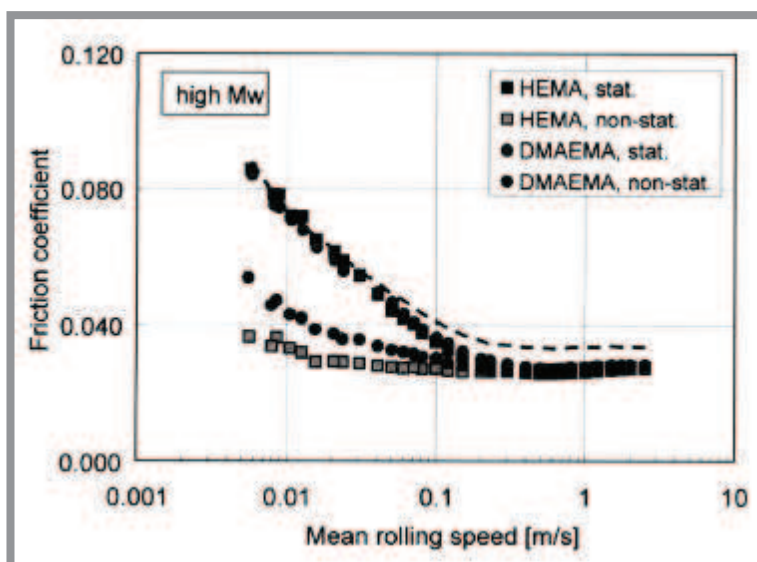
Obr. 14 Štruktúra rozmiestnenia tzv. zhlukov funkčných skupín [9]

Vplyv rozmiestnenia funkčných skupín v štruktúre polymérnych modifikátorov viskozity hrá podstatnú rolu v utváraní medzného mazacieho filmu (obr. 14).

V grafoch je zachytené pôsobenie rozdielne rozmiestnených funkčných skupín v architektúre rovnakých druhov polymérnych modifikátorov viskozity s vysokou molekulovou hmotnosťou. Ako je možné pozorovať v príslušnom grafe (obr. 15) polymérne modifikátory viskozity, ktoré majú funkčné skupiny rozmiestnené v tzv. zhlukoch zabezpečujú podstatný nárast hrúbky mazacieho filmu v závislosti na rýchlosti vzájomného pohybu trecích povrchov oproti polymérnym modifikátorom viskozity so štatisticky rovnomerne rozmiestnenými funkčnými skupinami. Tento jav taktiež spôsobuje podstatné zníženie súčiniteľa trenia v kontakte v závislosti na rýchlosti vzájomného pohybu trecích povrchov (obr. 16).



Obr. 15 Vplyv rôznej architektúry polymérnych modifikátorov viskozity na hrúbku mazacieho filmu v závislosti na rýchlosti vzájomne sa pohybujúcich trecích povrchov (120°C) [9]



Obr. 16 Vplyv rôznej architektúry polymérnych modifikátorov viskozity na súčiniteľ trenia v závislosti na rýchlosti vzájomného pohybu trecích povrchov [9]

Tieto dôsledky sú spôsobené javom, kedy tenký medzný film adsorbovaný na povrchu trecích povrchov musí „ustáť“ pôsobenie vysokého tlaku pôsobiaceho v tribologickom kontakte. Z toho to dôvodu je lepšie, keď sú funkčné skupiny polymérnych modifikátorov viskozity, ktoré zabezpečujú ich adsorbciu na kovových trecích povrchoch, koncentrované v tzv. zhlukoch s vysokou koncentráciou. Tento záver potvrdila aj počítačová simulácia založená na metóde Monte Carlo a dokázala [11], že polymérne modifikátory viskozity dokážu pevnejšie adsorbovať na trecie povrchy ak nie sú rozmiestnené štatisticky rovnomerne v polymérnych reťazcoch, ale sú sústredené v zhlukoch s ich vysokou koncentráciou.

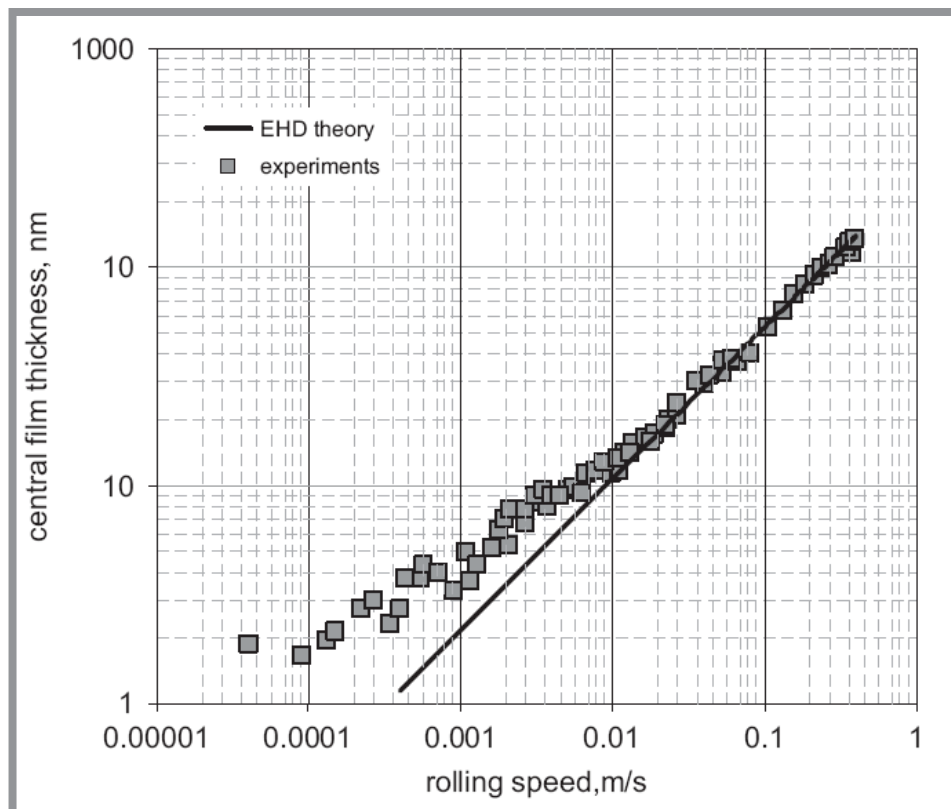
1.4.3 The influence of thin boundary films on real surface roughness in thin film, mixed EHD contact [12]

1.4.3

Táto práca ako jedna z prvých pojednáva o vplyve polymérnych modifikátorov viskozity v reálnych kontaktoch. Preto boli pri experimente na rozdiel od predchádzajúcich prác použité trecie povrchy so štruktúrou a drsnosťou veľmi blízke podmienkam vyskytujúcim sa v reálnych kontaktoch a nie iba v laboratórnych podmienkach (takmer dokonale hladké trecie povrchy). Experimentálna práca, ktorú realizovali Křupka a Hartl sa zameriava na možnosti ovplyvnenia trenia a opotrebenia reálnych trecích povrchov použitím polymérnych modifikátorov viskozity (konkrétne modifikátoru viskozity typu PAMA neobsahujúceho funkčné skupiny). Samotné experimentálne merania boli prevádzané na dvoch typoch oceľových guľičiek z materiálu AISI 52100, pričom drsnosť povrchu jednej z nich dosahovala 5nm (predstavovala ideálne laboratórne podmienky) a druhej približne 18nm (predstavovala reálne trecie povrchy). Vplyv pôsobenia aditívneho polymérneho modifikátoru viskozity typu PAMA spočíval v porovnávaní výsledkov získaných pri rovnakých podmienkach referenčného základového oleja a toho istého základového oleja obsahujúceho 1% (objemové) polymérneho modifikátoru viskozity PAMA. Merania prebiehali pri teplote 40°C a boli prevádzané pomocou optickej interferometrie.

Z výsledkov vyplynulo, že tak ako sa zistilo v predchádzajúcich štúdiách, polymérne modifikátory viskozity neobsahujúce funkčnú skupinu zabezpečujú mierny nárast medznej mazacej vrstvy v oblasti nízkych vzájomných rýchlostí pohybu trecích povrchov. Tento jav je možné sledovať aj na nasledujúcom obrázku (obr. 17), kde plná čiara predstavuje správanie sa referenčného minerálneho základového oleja v porovnaní s jednotlivými hodnotami správania sa tohto základového oleja aditívovaného 1% polymérneho modifikátoru viskozity PAMA. Táto závislosť prislúcha experimentálnej guľičke s drsnosťou povrchu 5nm.

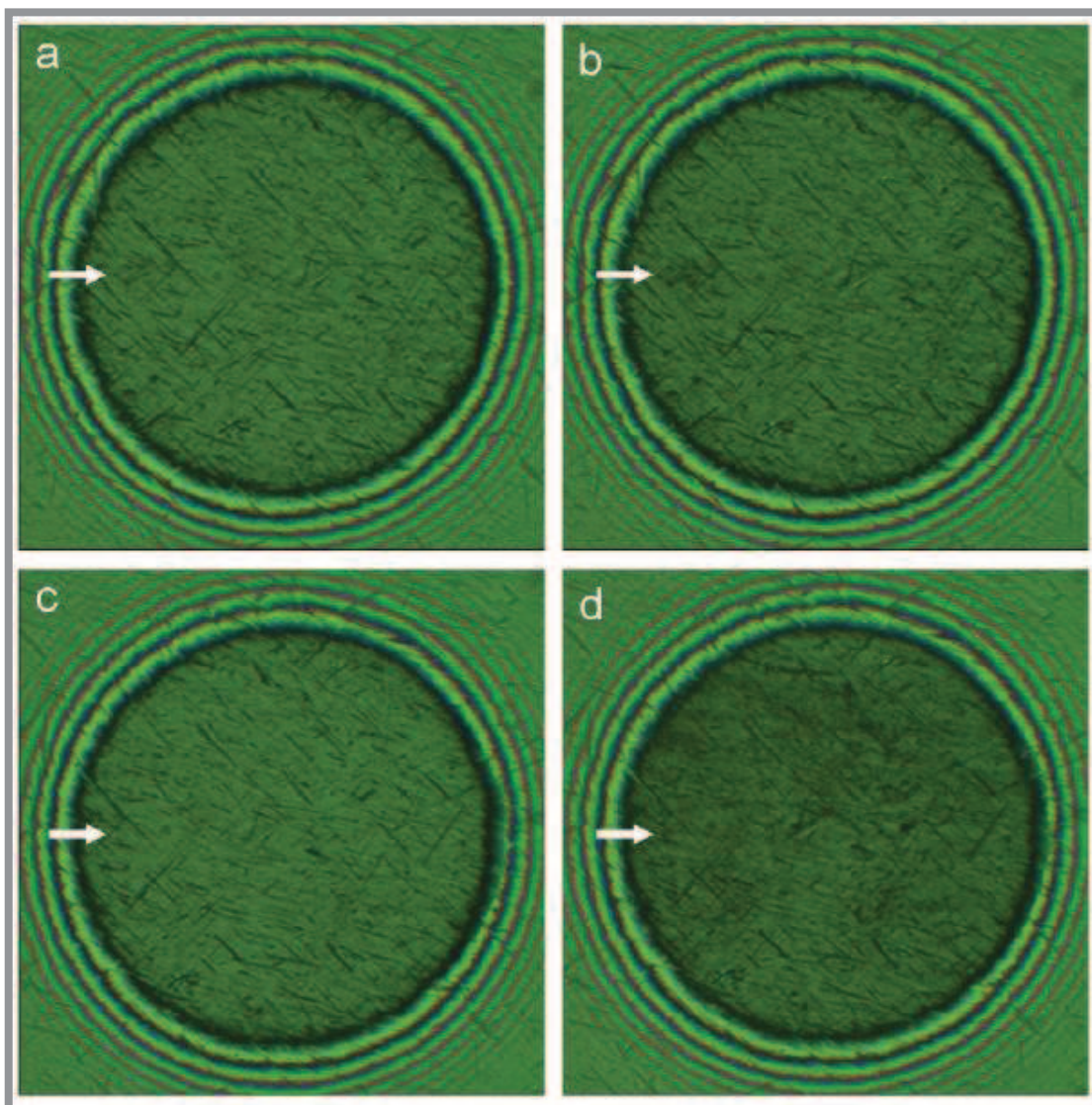
Zároveň bol v experimente prevádzaný test opotrebenia ako pri čistom valení (slide-to-roll ratio = 0) tak pri hodnote slide-to-roll ratio 0,1. Stav povrchovej vrstvy chrómu na experimentálnom sklenenom disku bol zachytený na začiatku experimentu a následne po 30 minútach testu. Povrchová vrstva chrómu pri použití minerálneho základového oleja aditívovaného 1% polymérneho modifikátoru viskozity PAMA ani po 30-tich minútach nevykazoval žiadne podstatné zmeny týkajúce sa opotrebenia. Naopak, pri tom istom teste a použití referenčného minerálneho základového oleja, povrchová vrstva chrómu už po 10-tich minútach testu vykazovala známky opotrebenia podporené výskytom častíc chrómu v samotnom základovom oleji, čo dokazujú aj nasledujúce snímky (obr. 18).



Obr. 17 Závislosť centrálnej hrúbky mazacieho filmu minerálneho oleja s 1% PAMA v závislosti na rýchlosti vzájomného pohybu trecích povrchov [12]

Tento test dokazuje, že aj veľmi tenký medzný mazací film dokáže značne znížiť množstvo vzájomných kontaktov nerovností vzájomných trecích povrchov a tak aspoň čiastočnú ochranu týchto povrchov v podmienkach medzného mazania. Tento jav má rozhodujúci vplyv na zníženie trenia a opotrebenia samotných trecích povrchov, čo sekundárne vplyva na zvýšenie efektivity prevádzky a zníženie jej nákladov.

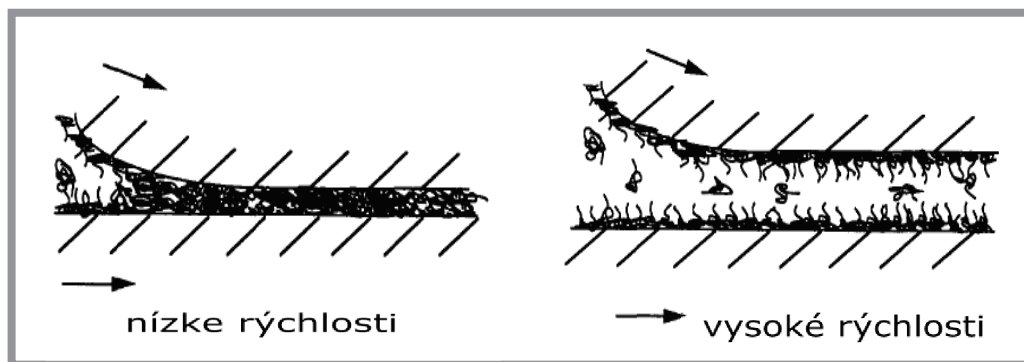
Skúmaním vplyvu polymérnych modifikátorov viskozity na trecie povrchy z reálnou štruktúrou a drsnosťou povrchu prislúchajúcou reálnym tribologickým súčiastkam sa taktiež zaoberala experimentálna práca pod vedením Glovneu [13] v roku 2005.



Obr. 18 Chromatické interferogramy zachytené na začiatku a na konci testu opotrebenia pre minerálny olej s 1% PAMA (a, b) a pre referenčný minerálny základový olej (c, d) [12]

2 FORMULÁCIA RIEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO ANALÝZA

Výsledky predchádzajúcich štúdií ukázali, že niektoré druhy mazivostných prísad je možné využiť na elimináciu nežiadúcich tribologických javov prebiehajúcich v stojných zariadeniach behom jednotlivých fáz ich prevádzky. Takýmto kritickým prípadom mazania je z hľadiska tribológie oblasť medzného mazania, pri ktorom sa trecie povrchy nachádzajú v bezprostrednej blízkosti. To zapríčiňuje, že dochádza k vzájomnej interakcii medzi povrchovými nerovnosťami a zaťaženie nie je prenášané prostredníctvom hydrodynamického pôsobenia mazacieho filmu, ale prostredníctvom veľmi tenkého medzného filmu. Štruktúra a vlastnosti takéhoto filmu sú odlišné od štruktúry a vlastností samotného maziva a trecích povrchov. Tento jav nastáva spravidla pri nízkych rýchlostiach vzájomného pohybu trecích povrchov, kedy mazivo nie je dostatočne vťahované prirodzeným vzájomným pohybom trecích povrchov do miesta tribologického kontaktu (obr. 19). Elimináciu tohto nežiadúceho javu je možné uplatniť aplikáciou mazivostných prísad nazývaných polymérne modifikátory viskozity (VISCOSITY INDEX IMPROVERS).



Obr. 19 Utváranie medzného mazacieho filmu [9]

Touto problematikou sa už v minulosti zaoberali viaceré experimentálne práce spomínané v predchádzajúcej časti textu. Samotná experimentálna časť tejto práce nadväzuje na poznatky predchádzajúcich prác a zaoberá sa účinnosťou konkrétnych druhov polymérnych modifikátorov viskozity na elimináciu nežiadúceho javu vznikajúceho pri nízkych rýchlostiach vzájomného pohybu trecích povrchov. Pozorovanie je však na rozdiel od všetkých predchádzajúcich prác zamerané na skúmanie javov v oblasti medzného mazania v eliptickom kontakte. Eliptický tribologický kontakt sa nachádza vo väčšine reálnych aplikácií mazania strojných súčastí. Cieľom práce tak je podmienka priblížiť sa reálnym podmienkam a objasniť tak prínos polymérnych modifikátorov viskozity v konkrétnych reálnych podmienkach a aplikáciách. Do experimentálnej časti práce boli zahrnuté jednotlivé komerčne dostupné polymérne modifikátory viskozity, ktoré taktiež tvoria obsah niektorých mazív dostupných na trhu. Jedná sa konkrétne o chemické zlúčeniny na báze polymérov neobsahujúce funkčnú skupinu (nefunkcionalizované). K dosiahnutiu hodnoverných výsledkov bola použitá metóda optickej interferometrie, zabezpečujúca dostatočnú presnosť merania hrúbky mazacieho filmu v závislosti na rýchlosti vzájomného pohybu trecích povrchov.

3 VYMEDZENIE CIEĽOV PRÁČE

3

Cieľom práce ako aj samotného experimentu je overenie vplyvu konkrétnych druhov polymérnych modifikátorov viskozity na podmienky mazania tribologických skupín v laboratórnych podmienkach. Práca sa zaoberá správaním sa medzných mazacích filmov vznikajúcich pôsobením polymérnych modifikátorov viskozity v eliptickom tribologickom kontakte za určitých špecifických podmienok, akými je nízka rýchlosť vzájomného pohybu trecích povrchov, kedy mazivo nie je dostatočne vtáňované do tribologického kontaktu. Pre tento účel sa ako vhodné kritérium zvolilo pozorovanie eliptického tribologického kontaktu pomocou metódy optickej interferometrie v oblasti čistého valenia (slide-to-roll ratio = 0). Výsledným cieľom je pritom pozorovanie vplyvu jednotlivých aditív na utváranie medzného mazacieho filmu pri nízkych rýchlostiach vzájomného pohybu trecích povrchov v podmienkach čistého valenia v eliptickom kontakte a taktiež vplyv koncentrácie týchto mazivostných prísad na tento jav.

4 NÁVRH METODICKÉHO PRÍSTUPU K RIEŠENIU

Samotná experimentálna časť pozostáva zo zhromaždenia všetkých poznatkov z oblasti metodiky merania veľmi tenkých mazacích filmov v laboratórnych podmienkach a následného výberu konkrétnych vhodných polymérnych modifikátorov viskozity. K vyhodnoteniu výsledkov je taktiež potrebné prevedenie vedľajších meraní, a to konkrétne zmerania viskozity jednotlivých mazív použitých v experimente a ich indexu lomu pri rovnakých fyzikálnych podmienkach (teplota). Následne je možné realizovať nosnú časť metodického merania experimentálnej časti, ktorá pozostáva z merania hrúbky mazacieho filmu konkrétnych druhov polymérnych modifikátorov viskozity obsiahnutých v teste v závislosti na rýchlosti vzájomného pohybu trecích povrchov v eliptickom kontakte pri podmienkach čistého valenia. Pre jednotlivé merania sú podstatné rovnaké podmienky, pri ktorých sú merania samotné prevádzané a tie sú nasledujúce:

- teplota
- slide-to-roll ratio
- eliptický kontakt
- zaťaženie kontaktu
- koncentrácia polymérnych modifikátorov viskozity v mazive
- rozsah pozorovaných rýchlostí vzájomného pohybu trecích povrchov

Teplota mazív v jednotlivých meraniach bola závislá na teplote okolia. Teda všetky merania prebiehali pri izbovej teplote, ktorej hodnota počas merania kolísala v rozmedzí 21,5°C – 23,5°C. Preto môžeme namerané výsledky brať ako čiastočne identické, avšak odchýlku teploty merania je nutné zahrnúť pri vyhodnotení výsledkov. Keďže bolo podmienkou experimentu prevádzať jednotlivé merania v podmienkach čistého valenia, hodnota parametru slide-to-roll ratio je pri všetkých meraniach rovná 0. Táto podmienka bola zabezpečená tým, že bolo hnané iba jedno trecie teleso, konkrétne eliptický súdoček a trecie teleso skleneného disku bolo voľne unášané. Ako referenčné hnané teleso bol zvolený eliptický súdoček s vysoko lešteným povrchom a drsnosťou okolo 5nm. Elipticita jeho povrchu v smere kolmom na smer valenia pritom dosahovala hodnotu 2,9469. Táto hodnota bola zistená už zo samotného kontaktu a spočítaná pomocou pixelového obrazcu pomerom jednotlivých strán eliptického kontaktu v programe ACHILLES. Zaťaženie sa prevádzalo sadou závaží, ktoré pomocou pákového mechanizmu vytvárali tlak v samotnom tribologickom kontakte. Jeho konkrétna hodnota sa prepočítavala pomocou tenzometru a pákovej vzdialenosti (vzdialenosť stredu kontaktu od miesta umiestnenia tenzometru). Hodnota zaťaženia kontaktu bola striktné dodržaná na hodnote 22,95 N a je identická pre všetky merania nachádzajúce sa v experimente. Koncentrácia aditív v prvej časti experimentu bola identická pre všetky aditíva z dôvodu možnosti ich porovnania a dosahovala hodnotu 1% (objemových percent). V druhej časti experimentu, ktorá sa zaoberá skúmaním vplyvu koncentrácie konkrétnej vybranej mazivostnej prísady, dosahujú jednotlivé koncentrácie hodnoty 1% a 10% (taktiež sa jedná o objemové percentá koncentrácie). Pričom desať percentná koncentrácia bola namiešaná v podmienkach laboratória. Ostané jedno percentné koncentrácie boli dodané od výrobcu už namiešané. Rozsah skúmaných rýchlostí bol zvolený s ohľadom na podmienky pozorovania utvárania medzného mazacieho filmu. Keďže tento jav prebieha pri nízkych rýchlostiach vzájomného

pohybu trecích povrchov, spektrum zvolených rýchlostí pozorovania reflektuje túto skutočnosť. Samotné rýchlosti boli stanovené a riadené otáčkami elektromotoru tribologického laboratórneho zariadenia. Tieto otáčky boli následne prenášané prostredníctvom reduktoru (planétová prevodovka) s prevodovým pomerom 1:180 na teleso eliptického súdočku tvoriace tribologický kontakt so skleneným diskom. Otáčky elektromotoru boli následne aj s kompenzáciou reduktoru prepočítané na obvodovú rýchlosť na povrchu súdočku v mieste kontaktu. Keďže sa jedná o čisté valenie (slide-to-roll ratio = 0), spektrum týchto rýchlostí predstavuje jednotlivé rýchlosti vzájomného pohybu trecích povrchov a ich hodnoty sa pohybujú v rozsahu od 0,00007 do 0,006 m.s⁻¹. Aby boli získané výsledky navzájom porovnateľné, jednotlivé podmienky merania musia byť zachované a totožné s predchádzajúcim súborom meraní.

4.1 Stanovenie postupu experimentu

4.1

Samotná experimentálna časť práce pozostáva z viacerých prípravných, ako aj hlavných meraní, ktoré spolu navzájom súvisia. Pričom výsledky jednotlivých prípravných meraní (napr. elipticita) sa využívajú v ostaných meraniach a taktiež pri samotnom vyhodnocovaní výsledkov. Preto je potrebné stanovenie postupu jednotlivých meraní a prevádzaných operácií. Výsledkom je plán postupu jednotlivých operácií experimentu:

- oboznámenie sa s postupom merania
- zabezpečenie všetkých mazív vrátane ich jednotlivých koncentrácií
- zmeranie indexu lomu jednotlivých mazív
- zmeranie dynamickej viskozity jednotlivých mazív
- príprava laboratórneho tribologického zariadenia
- zoznámenie sa s riadiacim a vyhodnocovacím programom ACHILLES
- zmeranie a výpočet jednotlivých parametrov telies v tribologickom kontakte (elipticita, drsnosť povrchu)
- meranie – 1. časť experimentu: Vplyv jednotlivých druhov mazivostných prísad na utváranie medzného mazacieho filmu
- meranie – 2. Časť experimentu: Vplyv koncentrácie jednotlivých mazivostných prísad v podmienkach medzného mazania
- kalibrácia jednotlivých meraní
- získanie výsledkov z jednotlivých častí experimentu a ich vyhodnotenie
- stanovenie záveru experimentu

Každému meraniu v experimentálnej časti práce predchádzalo dôkladné vyčistenie jednotlivých častí experimentálneho tribologického zariadenia a hlavne eliptického súdočku a skleneného disku, ktoré sa podieľajú plnou mierou na skúmanom tribologickom kontakte. Toto dôkladné vyčistenie bolo prevádzané použitím acetónu, ktorý odstránil všetky zvyšky predchádzajúceho použitého maziva. Táto operácia zabezpečila elimináciu vzájomného vplyvu jednotlivých mazivostných prísad, ktorých zvyšky by mohli spôsobiť skreslenie výsledkov samotného experimentu. Na túto síce v porovnaní s ostatnými operáciami zdanlivo nepodstatnú časť sa preto kládol veľký dôraz.

Po získaní všetkých výsledkov je následne možné pristúpiť k vyhodnoteniu jednotlivých meraní a stanoveniu záveru.

4.2 Testované mazivá

Ako referenčné mazivo bol zvolený minerálny základový olej skupiny II. s dynamickou viskozitou $\mu = 0,0775$ Pa.s. Tento referenčný minerálny základový olej bol taktiež použitý ako základový olej pre jednotlivé mazivostné prísady skúmané v experimente. V prvej časti meraní experimentálnej práce bola koncentrácia jednotlivých mazivostných prísad obsiahnutých v aditívnej zmesi 1% (objemové) pre všetky druhy mazivostných prísad. Keďže jednotlivé aditívované zmesi majú aj po aditívácii približne rovnaké hodnoty dynamickej viskozity aj v porovnaní so samotným minerálnym základovým olejom, ich vzájomné porovnanie nepodlieha nutným korekciám a prepočtom. Táto skutočnosť je podporená aj nízkym percentuálnym obsahom (1%) jednotlivých mazivostných prísad v samotnom minerálnom základovom oleji. Index lomu jednotlivých mazív je pritom navlas rovnaký vo všetkých prípadoch.



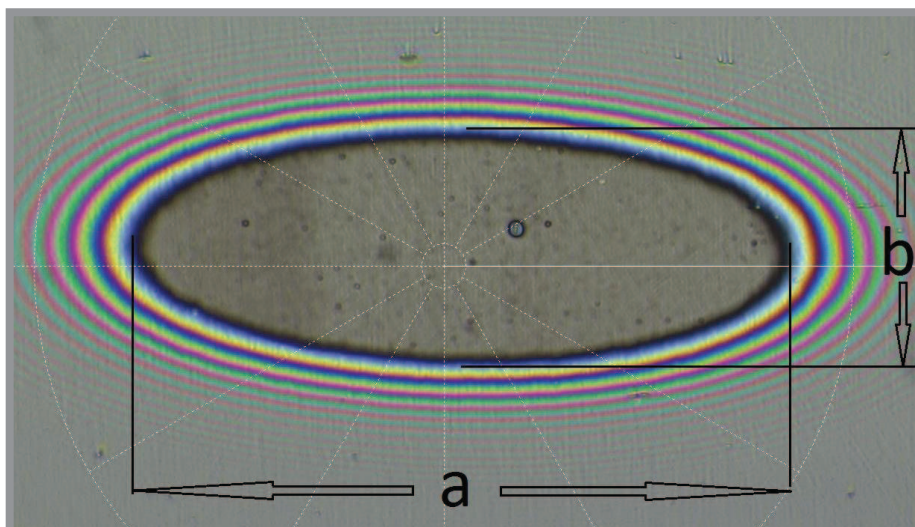
Obr. 20 Jednotlivé mazivá obsiahnuté v experimente: Základový olej skupiny II., PAMA 1%, OCP 1%, styren-isopren 1% (zľava)

4.3 Vedľajšie (prípravné) merania

Tieto merania spadajú do kategórie vedľajších (prípravných) meraní, pretože ich výsledky sú potrebné k vyhodnocovaniu samotných výsledkov hlavných meraní. Význam presnosti ich merania je pritom nesporne veľmi dôležitý a výrazným spôsobom ovplyvňuje presnosť samotných hlavných meraní a záverečných vyhodnotení výsledkov.

4.3.1 Meranie elipticity trecieho telesa

Výsledky tohto merania sa využívajú pri hlavných častiach merania samotnej hrúbky mazacieho filmu v závislosti na rýchlosti vzájomného pohybu trecích povrchov. Keďže elipticitu samotného súdočku nie je jednoduché zmerať na samotnom telese, jej hodnota sa dá jednoducho stanoviť priamo z kontaktu. Pri tomto meraní je vhodné využiť program ACHILLES a jeho pixelový obrazec kontaktu snímaný kamerou (obr. 21). Postup výpočtu elipticity je pritom jednoduchý a vychádza z pomeru jednotlivých dĺžok osí elipsy, ktorých hodnoty sú stanovené počtom pixelov, ktoré program umožňuje jednoducho odčítať.



Obr. 21 Meranie elipticity v programe ACILLES

Stanovenie výslednej elipticity prebieha zo vzorca:

$$k = a/b$$

V konkrétnom prípade tejto experimentálnej časti práce boli všetky merania prevádzané s telesom eliptického súdočku, ktorého elipticita predstavovala hodnotu $k=2,9469$.

4.3.2 Meranie indexu lomu

Meranie indexu lomu predstavuje ďalšiu z operácií vedľajších meraní. V tejto časti bol index lomu jednotlivých mazív zmeraný pomocou Abbeho refraktometru (obr. 22). Meranie indexu lomu jednotlivých mazív bolo prevádzané pri izbovej teplote (22,5°C) podľa všeobecného postupu. Indexy lomu jednotlivých mazív sú pritom nasledujúce:



Obr. 22 Abbeho refraktometer firmy ZEISS používaný k meraniu indexu lomu jednotlivých mazív

Vlastnosti referenčného minerálneho základového oleja ako aj samotných mazivostných prísad boli zmerané počas experimentu. Jednalo sa predovšetkým o hodnoty dynamickej viskozity a hodnoty indexu lomu. Ako prvý bol zmeraný index lomu jednotlivých mazív pomocou Abbeho refraktometru (obr. 22). Hodnota indexu lomu bola pre všetky mazivá obsiahnuté v experimente rovnaká (spôsobené nízkym stupňom aditívacie – nízka koncentrácia mazivostnej prísady). Takto zmeraný index lomu dosahoval hodnotu 1,4715.

4.3.3 Meranie dynamickej viskozity

Ďalším meraným parametrom bolo meranie dynamickej viskozity jednotlivých mazív. Toto meranie prebiehalo na rotačnom viskozimetri od firmy HAAKE, taktiež pri izbovej teplote (22,5°C). Konkrétne sa jednalo o model HAAKE RotoVisco 1 (RV1) zachytený na obrázku pod textom (obr. 23). Samotné meranie prebiehalo v prostredí programu HAAKE RheoWin Job Manager s verziou firmwareu V1:02.14.000 Sep 25 2007. Ako senzor bol použitý senzor typu DG41Ti.



Obr. 23 Rotačný viskozimeter HAAKE RotoVisco 1

mazivo	Index lomu	Dynamická viskozita [Pa.s]	pri teplote [°C]
Minerálny základový olej (MO)	1,4715	0,077221	22,4
MO + 1% PAMA	1,4715	0,075257	22,9
MO + 1% OCP	1,4715	0,149232	23,4
MO + 1% styren-isopren	1,4715	0,185768	23,5
MO + 10% PAMA	1,4715	-	-

Tab. 3 Tabuľka nameraných hodnôt (dynamická viskozita, index lomu)

4.4 Hlavné merania

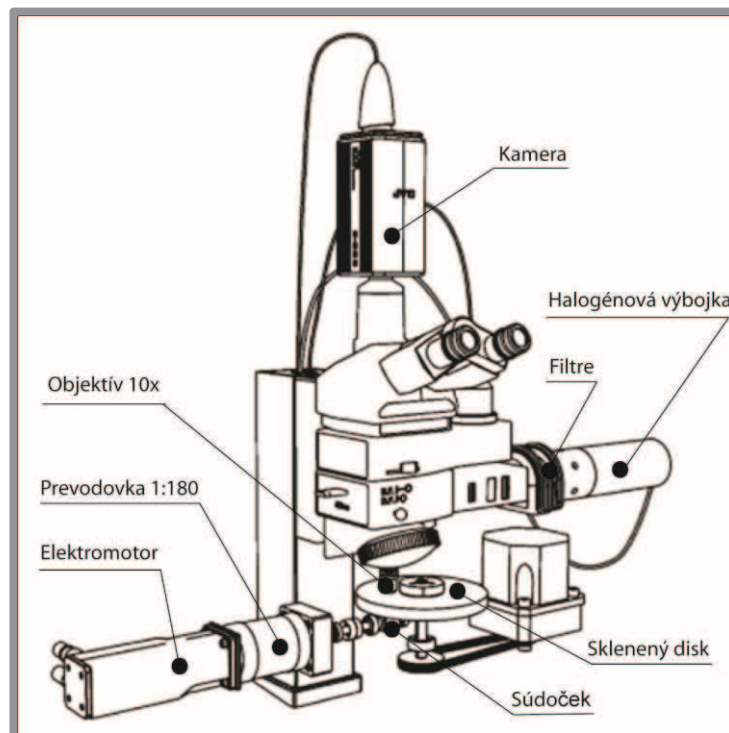
4.4

Experimentálna časť s názvom hlavné merania sa zaoberá samotným meraním výsledných závislostí hrúbky medzného mazacieho filmu v závislosti na rýchlosti vzájomného pohybu trecích povrchov. Táto časť pritom využíva výsledky získané z predchádzajúcich tzv. vedľajších meraní. Nosnou časťou práce je analýza získaných výsledkov pomocou metódy optickej interferometrie, ktorá zabezpečuje dostatočnú presnosť získaných hodnôt, reprezentujúcich závislosť zmeranej hrúbky mazacieho filmu na rýchlosti. Optická interferenčná metóda je v súčasnosti najrozšírenejšou metódou používanou k meraniu hrúbky veľmi tenkých mazacích filmov. Jej podstata spočíva v rozdelení amplitúdy čela svetelnej vlny do dvoch či viacerých rozdielnych vlín pri jej dopade na tenký mazací film zovretý medzi dvoma povrchmi. Pri prekrytí takto vzniknutých vlín dochádza k ich superpozícii, ktorej dôsledkom je vznik interferenčného poľa, ktoré nesie informácie o hrúbke a tvare mazacieho filmu. Aby bol interferenčný obrazec dostatočne kontrastný, musia mať polopriepustné rozhrania obklopujúce mazací film zodpovedajúcu reflektanciu. Tej sa dosiahne použitím sklenenej dosky pokrytej vrstvou chrómu na ktorej je pritláčaná oceľová guľička [14]. Na vrchnej strane skleneného disku sa nachádza polopriepustná vrstva SiO₂ ktorá odráža približne 25% svetla. Ak je takáto interferenčná sústava osvetlená bielym svetlom, ktorého lúče dopadajú pod konštantným uhlom, tak je v prepustenom, respektíve v odrazenom svetle možné pozorovať spojité sa meniace farby, ktoré sú výsledkom superpozície monochromatických interferenčných štruktúr. Po náležitej kalibrácii výsledok pozorovania následne spočíva v kvantitatívnom porovnávaní farieb medzi vyhodnocovaným interferogramom a interferogramom získaným pomocou interferenčnej sústavy so známou geometiou [15]. Na základe tohto pozorovania sú následne stanovené hrúbky mazacieho filmu v jednotlivých častiach kontaktu.

Všetky mazivostné prísady obsiahnuté v experimente spadajú do skupiny polymérnych modifikátorov viskozity s nízkou molekulovou hmotnosťou a nie sú funkcionalizované (neobsahujú funkčné skupiny naviazané na hlavný reťazec makromolekuly polyméru).

Experiment bol prevádzaný na tribometrickej stanici (obr. 24) ekvivalentnej tribometrickým standom, na ktorých boli prevádzané aj predchádzajúce experimentálne práce, zaoberajúce sa trením a opotrebením trecích povrchov, spomenuté vyššie v tejto práci. Meranie hrúbky mazacieho filmu prebieha pomocou

metódy optickej interferometrie, pričom v tomto prípade bola ako svetelný zdroj použitá halogénová výbojka emitujúca biele širokospektrálne svetlo. Vzhľadom na veľkosť oblasti kontaktu bol použitý objektiv s 5-násobným zväčšením.

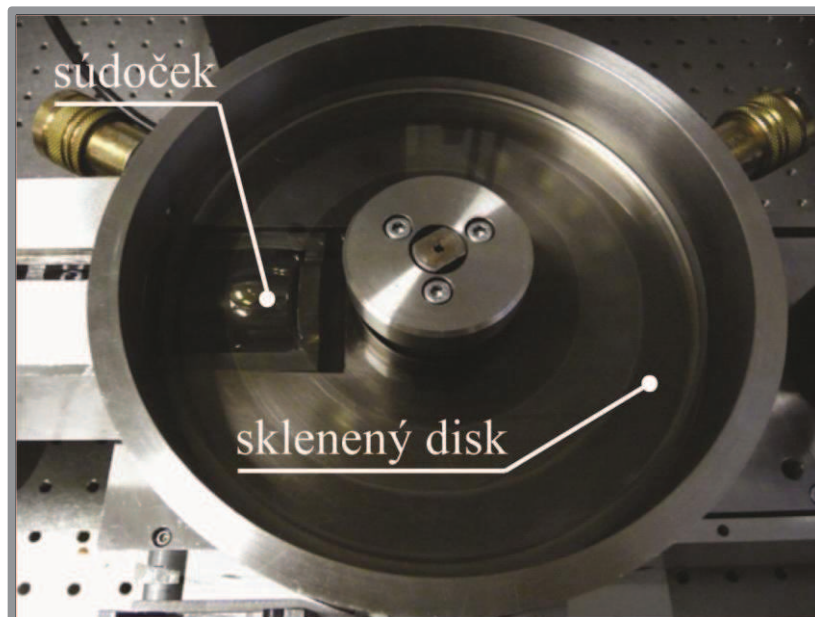


Obr. 24 Schéma tribologickej stanice, na ktorej bol prevádzaná experimentálna štúdia [12]

Zvolené trecie teleso predstavoval „dokonale“ hladký oceľový súdoček z materiálu AISI 52 100 s drsnosťou povrchu okolo 5 nm. Modul pružnosti (E) tohto materiálu je na úrovni 212 GPa a priemer súdočku v smere trajektórie valenia predstavuje hodnotu 25,4 mm (1“). Druhým trecím telesom bol sklenený disk opatrený reflexnou vrstvou chrómu. Hodnota modulu pružnosti tohto skleneného disku je 81 GPa. Samotný tribologický kontakt bol pri každom druhu maziva zaťažený silou 22,95 N, čo predstavuje maximálny Hertzov kontaktný tlak 0,293 GPa. Keďže sa v experimentálnej štúdii uvažuje iba prípad čistého valenia, využíval sa pohon iba jedného elektromotoru, ktorý prostredníctvom reduktoru (planétovej prevodovky) s prevodovým pomerom 1:180 poháňal súdoček.

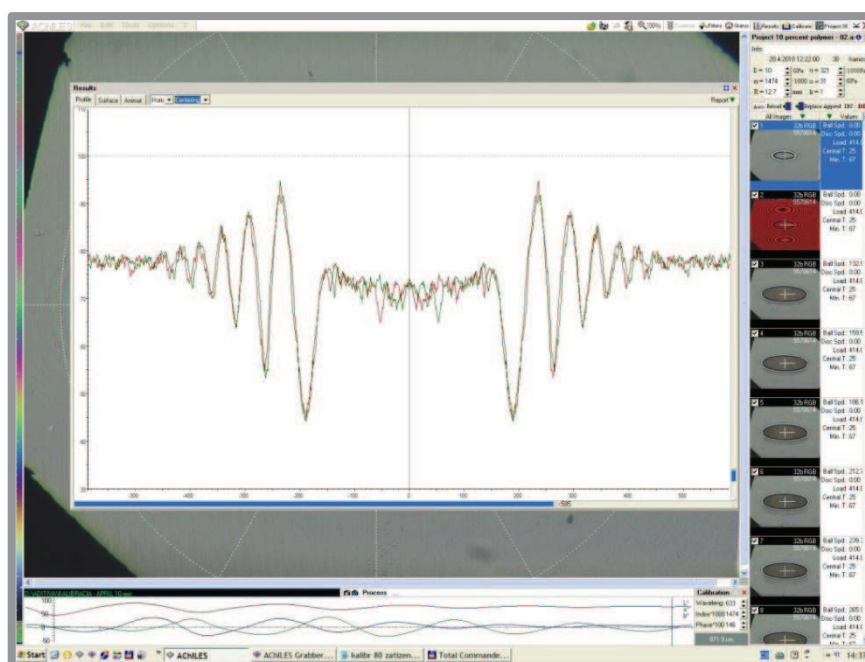
Parametre merania:

- | | |
|------------------------------------|---------------------------------------|
| • zaťaženie kontaktu: | 22,95 N |
| • maximálny kontaktný tlak (Hertz) | 0,293 GPa |
| • teplota merania: | 21,5 – 23,5°C |
| • rozsah rýchlostí: | od 0,00007 do 0,006 m.s ⁻¹ |
| • inkrement rýchlostí: | 0,00015 m.s ⁻¹ |
| • elipticita: | 2,9469 |
| • drsnosť povrchu súdočku: | ≈ 5 nm |
| • priemer skleneného disku: | 150 mm |



Obr. 25 Detailný pohľad na tribologický kontakt v experimentálnom zariadení Ústavu Konstruovani

Meranie, kalibrácia, ale taktiež samotné vyhodnocovanie nameraných výsledkov prebiehali v programe ACHILLES (obr. 26). Samotné meranie spočívalo v zachytení snímok tribologického kontaktu v jednotlivých presne stanovených rýchlostiach vrátane ich statických záberov zachytených v širokospektrálnom ako aj v monochromatickom farebnom podaní. Snímky statického kontaktu boli využité k stanoveniu referenčnej kalibrácie, pomocou ktorej boli následne vyhodnotené zábery snímok tribologického kontaktu v jednotlivých rýchlostiach. Výsledok tohto vyhodnotenia predstavovala hodnota centrálnej hrúbky mazacieho filmu pri danej rýchlosti vzájomného pohybu trecích povrchov.



Obr. 26 Kalibrácia v prostredí programu ACHILLES

Fyzikálne podmienky merania

Všetky merania prebiehali pri zhodných fyzikálnych podmienkach. Maximálny kontaktný tlak bol vo všetkých prípadoch rovnaký a jeho hodnota dosahovala 0,293 GPa (zodpovedá zaťaženiu 22,95 N). Merania prebiehali pri izbovej teplote bez udržiavania konštantnej teploty počas priebehu jedného merania, pričom však bola teplota každého maziva na začiatku merania rovnaká (23 °C – izbová teplota okolitého vzduchu v laboratóriu). Jednotlivé zábery boli snímané pri rovnakých rýchlostiach, ktoré boli v rozsahu 10 ot./min. až 800 ot./min elektromotora s prírastkom 20 ot./min.. To po prepočte podľa rovnice (obr. 30) zodpovedalo rýchlostiam vzájomného pohybu trecích povrchov 0,00007 m.s⁻¹ až 0,006 m.s⁻¹. Koeficient hodnoty slide-to-roll ratio bol rovný 0, čo zodpovedá podmienkam čistého valenia, kedy bolo poháňané iba teleso súdočku (teleso skleneného disku sa voľne pretáčalo).

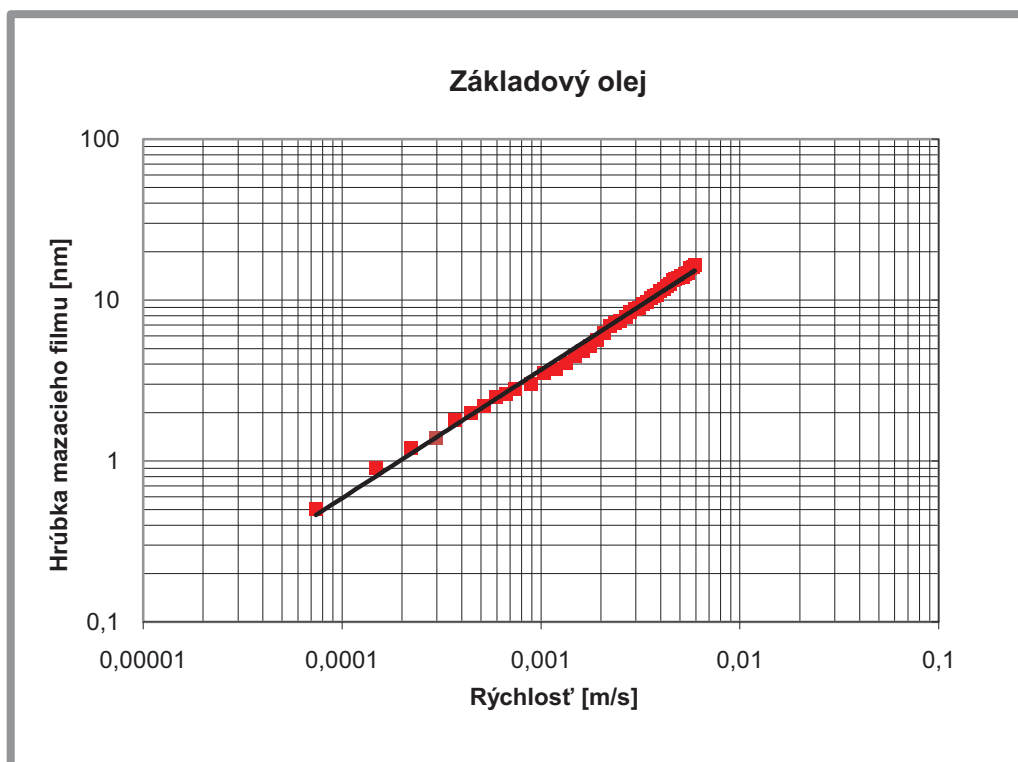
$$v = n \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{0,0127}{60 \cdot 180} \quad [\text{m.s}^{-1}]$$

n – riadené otáčky elektromotoru

5 ANALÝZA A INTERPRETÁCIA ZÍSKANÝCH VÝSLEDKOV

Interpretácia výsledkov v ich grafickej podobe prebiehala v programe ACHILLES a následne v tabuľkovom editore Microsoft® EXCEL.

Prvá časť analýzy sa zaoberá hodnovernosťou získaných výsledkov na základe porovnania teórie s realitou. Experimentálne hodnoty referenčného základového oleja spĺňajú lineárnu závislosť centrálnej hrúbky mazacieho filmu v závislosti na rýchlosti vzájomného pohybu trecích povrchov. Táto závislosť sa riadi teóriou elastohydrodynamického mazania (EHD). Smernica experimentálne získanej lineárnej závislosti dosahuje hodnotu 0,69. Táto hodnota je blízka teoretickej hodnote lineárnej závislosti, ktorá predstavuje hodnotu 0,67.



Obr. 27 Overenie hodnovernosti získaných výsledkov - viskozita 0,007722 [Pa.s]

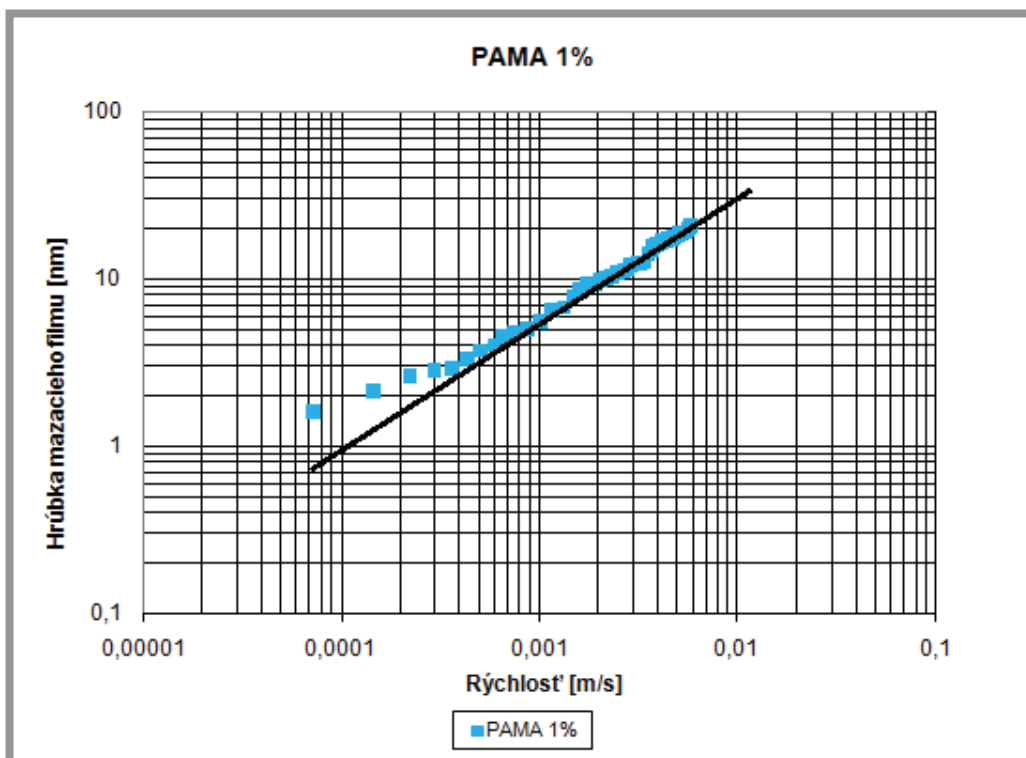
5.1 Vplyv jednotlivých polymérnych modifikátorov viskozity na hrúbku mazacieho filmu

Táto časť analýzy získaných výsledkov sa zaoberá vplyvom jednotlivých konkrétnych druhov polymérnych modifikátorov viskozity na utváranie a vlastnosti medzného mazacieho filmu v mieste mazaného tribologického kontaktu. Kvôli možnosti porovnania získaných výsledkov, všetky mazivostné prísady tvoria 1%-ný koncentrát spolu s referenčným základovým olejom.

5.1.1 PAMA (polyalkylmetacrylate)

Prvá mazivostná prísada obsiahnutá v experimente je polymérna chemická zlúčenina, ktorá nemá na hlavnom reťazci polyméru naviazané funkčné skupiny – nefunkcionalizovaná mazivostná prísada PAMA (polyalkylmetacrylate).

Z grafu (obr. 28) vyplýva, že táto mazivostná prísada zabezpečuje mierny nárast centrálnej hrúbky mazacieho filmu, pričom najmarkantnejší je vplyv tohto nefunkcionalizovaného modifikátoru viskozity v extrémne nízkych rýchlostiach vzájomného pohybu trecích povrchov (pod $0,0005 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). V tejto oblasti rýchlostí dosahuje zvýšenie centrálnej hrúbky mazacieho filmu v priemere hodnotu $1,3 \text{ nm}$ oproti referenčnému základovému oleju znázorneného v grafe plnou čiarou. Dynamická viskozita oboch mazív je pritom rovnaká. Z tohto zistenia vyplýva, že aj napriek nízkej koncentrácii nefunkcionalizovanej mazivostnej prísady typu PAMA, táto mazivostná prísada zabezpečuje mierne zväčšenie centrálnej hrúbky mazacieho filmu pri nízkych rýchlostiach vzájomného pohybu trecích povrchov. Hodnoty zväčšenia centrálnej hrúbky sa však pohybujú veľmi nízko, a tak je reálny prínos tejto mazivostnej prísady z hľadiska zníženia trenia a opotrebenia trecích povrchov zanedbateľný až žiadny.

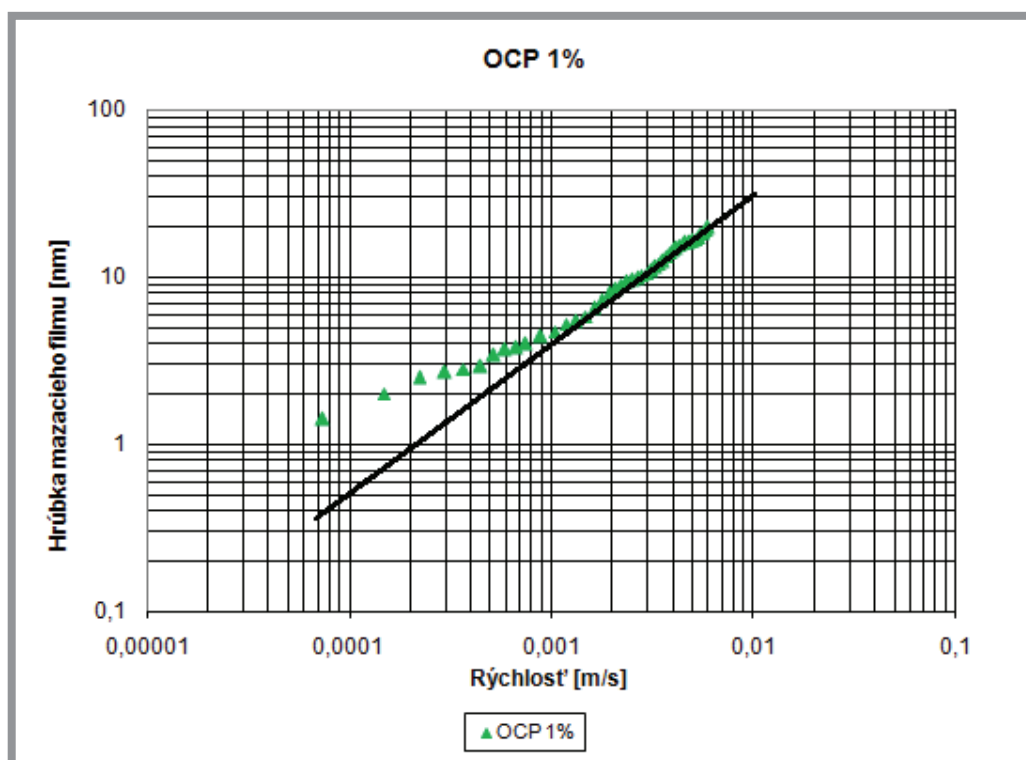


Obr. 28 Hodnoty centrálnej hrúbky mazacieho filmu 1% PAMA (22,6°C)

5.1.2 OCP (olefin copolymer)

Druhou mazivostnou prísadou je taktiež chemická makromolekulová zlúčenina na báze polyméru, ktorá tak isto neobsahuje funkcionalizované skupiny na vedľajších reťazcoch makromolekuly polyméru.

Priebeh centrálnej hrúbky mazacieho filmu v závislosti na rýchlosti vzájomného pohybu trecích povrchov zachytený v grafe (obr. 29) dokazuje taktiež mierny nárast centrálnej hrúbky mazacieho filmu, avšak iba pri veľmi nízkych rýchlostiach. Pásmo rýchlostí, v ktorých dochádza k miernemu nárastu centrálnej hrúbky mazacieho filmu sa nachádza pod hranicou $0,0007 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Nárast centrálnej hrúbky mazacieho filmu v tejto oblasti dosahuje v priemere iba 1 nm, čo predstavuje zanedbateľný výsledok a takmer nulový vplyv na nárast centrálnej hrúbky mazacieho filmu. Toto zistenie dokazuje, že mazivostná prísada typu OCP obsiahnutá v experimente, tak isto ako predchádzajúca mazivostná prísada typu PAMA, z hľadiska reálneho použitia za účelom zníženia trenia a opotrebenia v mazanom tribologickom kontakte neprináša požadovaný nárast hrúbky mazacej vrstvy.

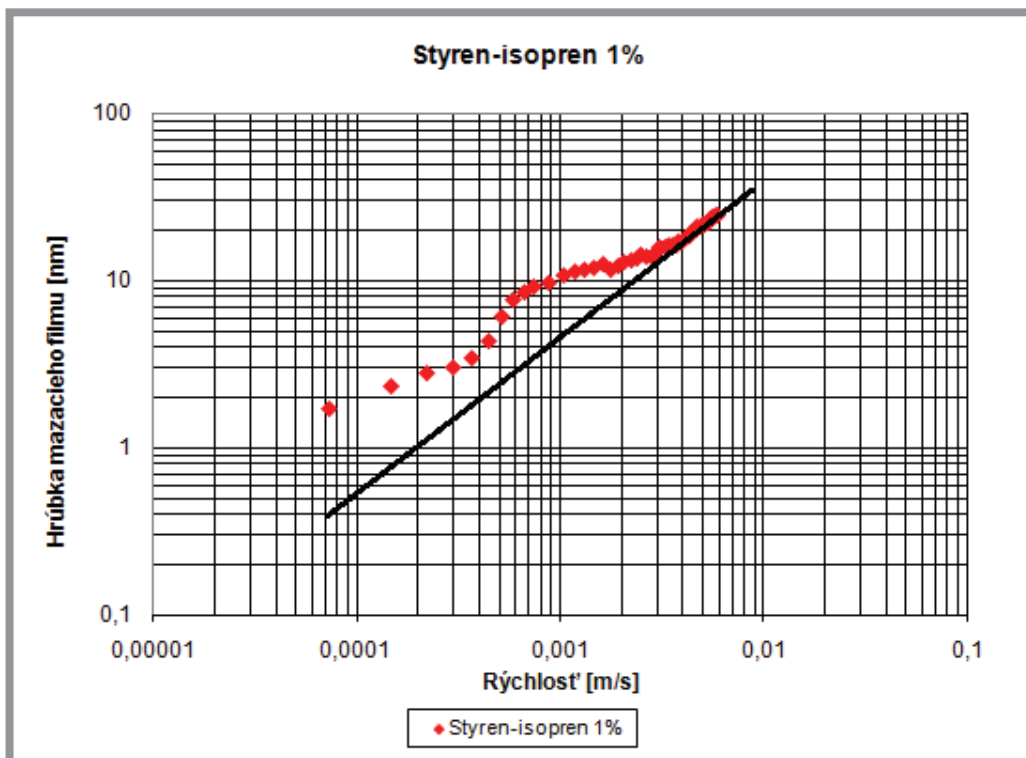


Obr. 29 Hodnoty centrálnej hrúbky mazacieho filmu 1% OCP (23,4°C)

5.1.3 Styren-isopren

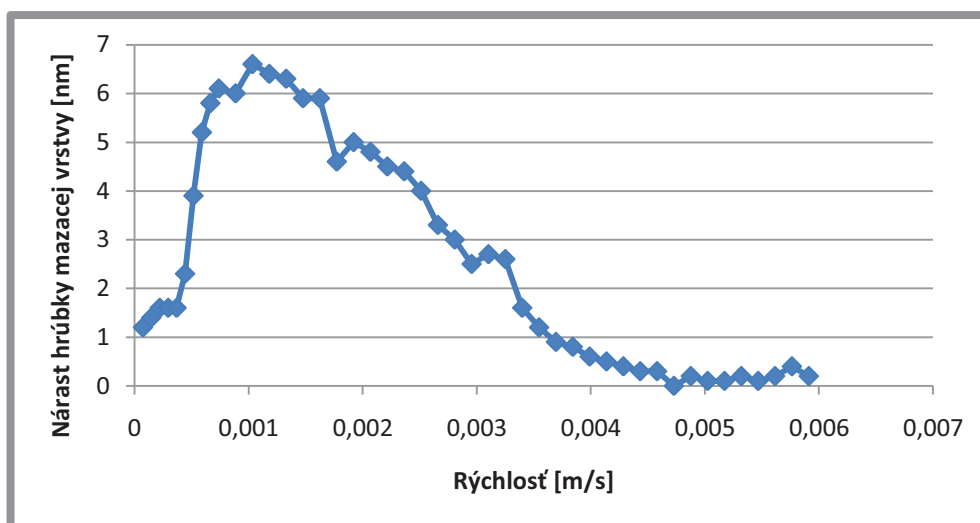
Predstavuje posledný zo skúmaných polymérnych modifikátorov viskozity. Jedná sa taktiež o jeden z nefunkcionalizovaných polymérnych modifikátorov viskozity, avšak jeho vplyv na nárast centrálnej hrúbky mazacieho filmu je spomedzi všetkých mazivostných prísad obsiahnutých v experimente najmarkantnejší. Ako je možné pozorovať v grafe (obr. 30), táto mazivostná prísada spôsobuje nárast centrálnej hrúbky mazacieho filmu v takmer celom spektre pozorovaných rýchlostí, avšak najmarkantnejší je tento jav v pásme rýchlostí pod hranicou $0,004 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Táto oblasť predstavuje schodovitý vzostup v náraste centrálnej hrúbky mazacieho filmu (obr. 31) oproti referenčnému základovému oleju, ktorý je v grafe (obr. 30) zobrazený plnou čiarou. Táto skutočnosť potvrdzuje významný vplyv tejto mazivostnej prísady

na utváranie medzného mazacieho filmu v nízkych rýchlostiach vzájomného pohybu trecích povrchov.



Obr. 30 Hodnoty centrálnej hrúbky mazacieho filmu 1% Styren-isopren (23,5°C)

Nasledujúci graf dokazuje výrazný vplyv mazivostnej prísady styren-isoprenu na utváranie medzného mazacieho filmu v oblasti nízkych rýchlostí vzájomného pohybu trecích povrchov. Hodnota zvýšenia centrálnej hrúbky mazacieho filmu pri niektorých rýchlostiach vzájomného pohybu trecích povrchov prekračuje 6 nm, čo predstavuje podstatný nárast hrúbky mazacieho filmu, ktorý taktiež prináša reálne uplatnenie v oblasti trenia a opotrebenia mazaných strojných súčastí.



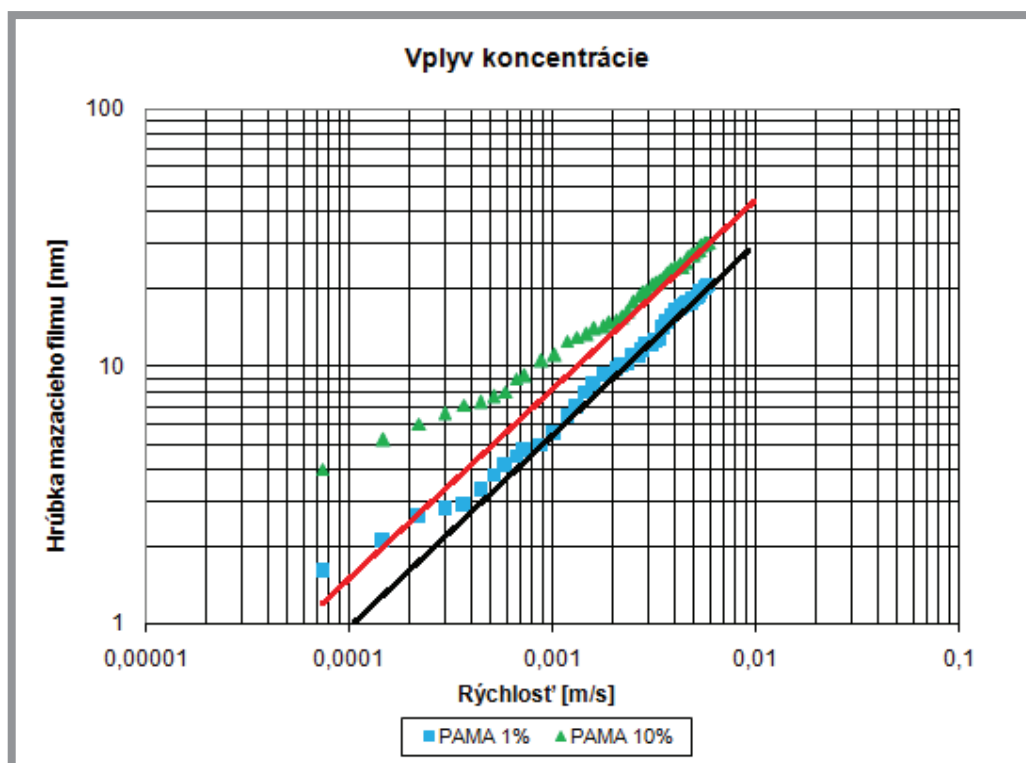
Obr. 31 Nárast centrálnej hrúbky mazacieho filmu v závislosti na rýchlosti - STYREN-ISOPREN

V oblasti nízkych rýchlostí mazivostná prísada typu styren-isopren obsiahnutá v experimente spôsobuje skokový nárast centrálnej hrúbky mazacieho filmu, spôsobený výraznou polaritou makromolekuly styren-isoprenu, a tým spôsobeného utvárania pevnej chemickej väzby medzi touto mazivostnou prísadou a kovovým povrchom súdočku. Priebeh hodnôt nárastu centrálnej hrúbky mazacieho filmu taktiež korešponduje s predpokladaným teoretickým priebehom týchto hodnôt pôsobiaceho polymérneho modifikátoru viskozity v mieste mazaného tribologického kontaktu. Tento teoreticky predpokladaný priebeh uvažuje s postupným zaniknutím vplyvu pôsobenia polymérneho modifikátoru viskozity s narastajúcou rýchlosťou vzájomného pohybu trecích povrchov. Takéto teoretické predpoklady potvrdzuje aj predchádzajúci graf (obr. 31).

5.2 Vplyv koncentrácie mazivostných prísad na hrúbku mazacieho filmu

5.2

Táto časť analýzy sa zaoberá vplyvom zmeny koncentrácie konkrétneho vybraného polymérneho modifikátoru viskozity na utváranie medzného mazacieho filmu. Touto prísadou je makromolekulárna polymérna zlúčenina PAMA, ktorá sa taktiež nachádza aj v predchádzajúcej časti analýzy, kde dosiahla iba čiastočné zväčšenie hrúbky mazacieho filmu. V tejto časti experimentálnej analýzy je však jej koncentrácia zvýšená na hodnotu 10% (objemových). Vplyv zvýšenia koncentrácie tejto mazivostnej prísady je badateľný z nasledujúceho grafu (obr. 32). Zvýšenie koncentrácie spôsobilo podstatný nárast centrálnej hrúbky mazacieho filmu tak oproti referenčnému základovému oleju (v grafe ako plná čierna čiara), ako aj v porovnaní s mazivom s 1%-ným obsahom mazivostnej prísady PAMA.



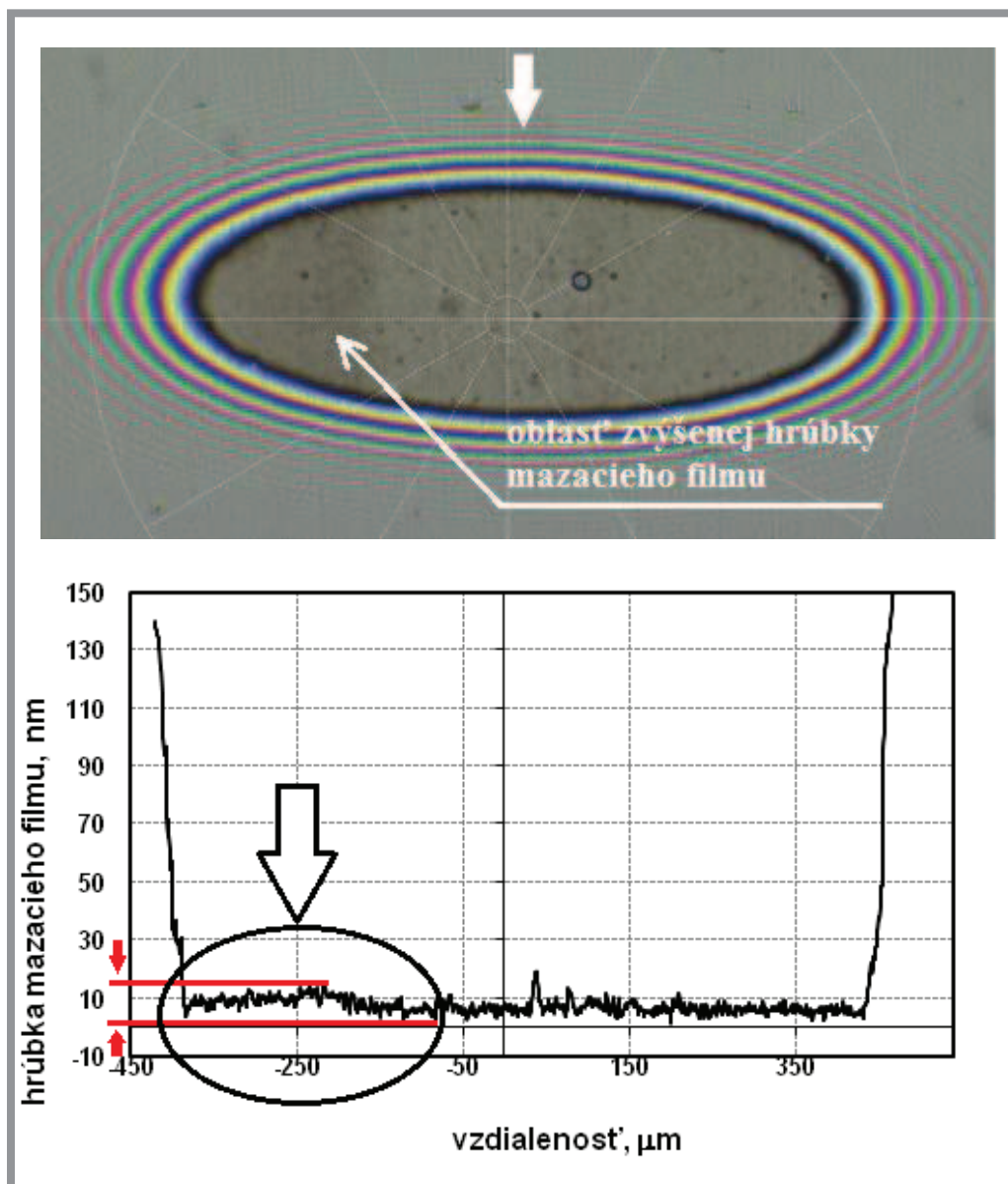
Obr. 32 Vplyv koncentrácie na centrálnu hrúbku mazacieho filmu

Tento nárast hrúbky je však nutné podrobne analyzovať, pretože je spôsobený dvoma činiteľmi. Tým prvým je nárast centrálnej hrúbky mazacieho filmu v dôsledku zvýšenia dynamickej viskozity maziva. Tú spôsobil zvýšený obsah (koncentrácia) viskóznejšej mazivostnej prísady PAMA oproti referenčnému základovému oleju. Tomuto javu je pripisovaná veľkosť prírastku centrálnej hrúbky mazacieho filmu, ktorá sa rovná rozdielu lineárnych závislostí pre mazivá z rôznou viskozitou (v grafe ako červená a čierna plná čiara). Druhú časť zvýšenia centrálnej hrúbky mazacieho filmu spôsobili samotné zväčšenie obsahu (eliminujú vplyv zvýšenia viskozity) nefunkcionalizovaného polymérneho modifikátoru viskozity typu PAMA. Práve táto časť navýšenia mazacieho filmu je podstatná a vyjadruje skutočnú funkcionálnu samotnej mazivostnej prísady. Pre stanovenie prínosu tejto časti navýšenia mazacieho filmu je nutné stanoviť ďalšie referenčné mazivo (v grafe ako plná červená čiara), pomocou ktorého eliminujeme zvýšenie viskozity jednotlivých mazív. Samotné zväčšenie centrálnej hrúbky mazacieho filmu zapríčinené zvýšením koncentrácie polymérneho modifikátoru viskozity PAMA oproti referenčnému základovému oleju (plná čierna čiara) o 0,9 nm, zvýšenie koncentrácie na hodnotu 10% spôsobilo nárast centrálnej hrúbky mazacieho filmu vzhľadom k referenčnému mazivu (plná červená čiara), eliminujúcemu rozdiel dynamických viskozít vzniknutých ďalšou aditíváciou, o takmer 2,7 nm. Prínos zvyšovania koncentrácie polymérneho modifikátoru viskozity PAMA na zvyšovanie centrálnej hrúbky mazacieho filmu je očividný. Vedľajším javom sa však stáva zvýšenie viskozity výsledného maziva vplyvom aditívácie referenčného maziva podstatne viskóznejšou zložkou samotného polymérneho modifikátoru viskozity PAMA.

5.3 Pôsobenie polymérnych modifikátorov viskozity v eliptickom tribologickom kontakte

Už predchádzajúce experimentálne práce sa zaoberali pozorovaním medzného mazacieho filmu v tribologickom kontakte. Väčšinou sa však vždy jednalo o kruhový kontakt simulujúci tribologické podmienky medzi guľičkou a skleneným diskom. Táto práca sa na rozdiel od tých predchádzajúcich zaoberá eliptickým tribologickým kontaktom, ktorý sa väčšinou nachádza aj v reálnych podmienkach mazania strojných zariadení. Výsledkom zistení experimentálnej časti práce sú niektoré špecifiká, ktoré vznikajú práve v prostredí eliptického tribologického kontaktu. V oblasti eliptického kontaktu môžu vzniknúť miesta s nárastom hrúbky mazacieho filmu. Tieto miesta však nemusia prechádzať celou oblasťou kontaktu, ale môžu byť sústredené iba v jeho časti. Takýmto miestom so skokovo zvýšenou hrúbkou mazacieho filmu sa v obrázkoch zachytených pomocou optickej interferometrie (obr. 33) javia ako miesta tmavšej farby, ktorá identifikuje nárast hrúbky mazacieho filmu. Tmavé miesto zvýšenej hrúbky mazacieho filmu nie je symetricky rozmiestnené v oblasti kontaktu. Preto je možné predpokladať, že tento jav vzniká zvýšenou koncentráciou mazivostnej prísady v danom mieste, ktorá zabezpečuje následné zvýšenie hrúbky mazacieho filmu. Toto tvrdenie potvrdzuje aj profilový obrázok priebehu hrúbky mazacieho filmu umiestnený pod obrázkom kontaktu (obr. 33). Javy

tohto rázu však pri kruhovom kontakte zatiaľ neboli pozorované, takže je možné predpokladať, že sa jedná o špecifický jav prebiehajúci v eliptických kontaktoch mazaných mazivami aditívanými polymérnymi modifikátormi viskozity.



Obr. 33 Zvýšenie hrúbky mazacieho filmu v určitej oblasti eliptického kontaktu

6 ZÁVER

Na oblasť tribológie a mazania je v poslednej dobe vyvíjaný čoraz väčší tlak spôsobený zavádzaním nových prísnejších ekologických predpisov. Jednou z ciest, ako dosiahnuť ciele týchto predpisov je práve zlepšenie parametrov samotných mazív, čo sekundárne vplýva na zvýšenie efektívnosti a taktiež životnosti strojných súčastí. K dosiahnutiu týchto požiadaviek sa využívajú rôzne mazivostné prísady tvoriace neoddeliteľnú súčasť dnešných moderných mazív. Takýmito mazivostnými prísadami sú aj polymérne modifikátory viskozity, ktorých vlastnosti sú podrobne opísané v tejto práci.

Efektívne uplatnenie týchto mazivostných prísad je v oblasti medzného mazania, ku ktorému dochádza pri nízkej rýchlosti vzájomného pohybu trecích povrchov. V tomto prípade mazivo nie je dostatočne vťahované do kontaktu vplyvom dostatočne rýchleho pohybu trecích povrchov. Preto je táto oblasť mazania závislá na aplikácii mazivostných prísad, ktoré sú schopné vytvárania pevného medzného mazacieho filmu, umožňujúceho aj pri týchto kritických podmienkach mazania oddeliť povrchy trecích súčastí, a zabrániť tak ich nadmernému opotrebeniu. Experimentálna časť práce je zameraná na skúmanie vplyvu jednotlivých konkrétnych druhov polymérnych modifikátorov viskozity a taktiež vplyvu koncentrácie týchto mazivostných prísad na zvyšovanie centrálnej hrúbky mazacieho filmu v tribologickom kontakte. Už predchádzajúce experimentálne práce zaoberajúce sa touto problematikou zistili výrazný vplyv niektorých druhov polymérnych modifikátorov viskozity na zvyšovanie centrálnej hrúbky mazacieho filmu. Avšak táto práca sa na rozdiel od spomínaných prác zaoberá skúmaním tohto javu v eliptickom tribologickom kontakte, ktorý sa nachádza v prevažnej väčšine reálnych strojných súčastí. Výsledky experimentálnej práce sa preto približujú k realite.

Z výsledkov experimentu vyplýva, že nie všetky mazivostné prísady zabezpečujú žiadané zvýšenie centrálnej hrúbky mazacej vrstvy (PAMA, OCP). Avšak polymérny modifikátor viskozity typu styren-isopren dosiahol v testoch výborné výsledky a potvrdil, že aj komerčne dostupné nefunkcionalizované polymérne modifikátory viskozity môžu zabezpečiť potrebný nárast centrálnej hrúbky mazacieho filmu a tým zabrániť stretu nerovností trecích povrchov pri ich nízkych vzájomných rýchlostiach. To sekundárne vedie k zníženiu súčiniteľa trenia a taktiež opotrebenia trecích povrchov. Z výsledkov taktiež vyplynulo, že zvyšujúca sa koncentrácia týchto mazivostných prísad má priaznivý vplyv na nárast hrúbky mazacieho filmu. Avšak sekundárnym javom aditívacie vyšších koncentrácií týchto mazivostných prísad je zvyšovanie viskozity výsledného maziva. Overením tohto pozorovania sa ciele práce podarilo úspešne naplniť. Z pozorovaní správania sa eliptického tribologického kontaktu taktiež vyplynuli určité špecifiká, ktoré zatiaľ neboli pri kruhovom kontakte pozorované. Je nimi výskyt miest so skokovým nárastom hrúbky mazacieho filmu v oblasti kontaktu. Tieto miesta však nemusia prechádzať celou oblasťou kontaktu, ale môžu byť sústredené iba v jeho časti, pričom ich rozmiestnenie nepodlieha symetrii kontaktu. Mohlo by sa jednať o zvýšenie koncentrácie mazivostnej prísady v danom mieste kontaktu, následkom čoho by došlo k zvýšeniu hrúbky mazacieho filmu. Potvrdenie tohto pozorovania by ale vyžadovalo ďalšie štúdium pozorovania, na ktoré v tejto práci ale nebol priestor.

Zoznam Použitých Zdrojov

- [1] *OLEJE.cz* [online]. 2005 - 2009 [cit. 2010-04-11]. Motorové oleje. Dostupné z WWW: <<http://www.oleje.cz/>>. (16)
- [2] *MJauto* [online]. 1998 - 2009 [cit. 2010-04-11]. Oleje. Dostupné z WWW: <<http://www.mjauto.cz/>>. (17)
- [3] *Performance Oil Technology, L.L.C.* [online]. 2010 [cit. 2010-04-11]. Motor Oil Additives Blended In During The Manufacturing Process. Dostupné z WWW: <<http://www.performanceoiltechnology.com/>>.
- [4] *WIKIPÉDIA* [online]. 2010 [cit. 2010-04-11]. Chemická väzba. Dostupné z WWW: <http://sk.wikipedia.org/wiki/Chemick%C3%A1_v%C3%A4zba>.
- [5] *CS-Marketing s.r.o.* [online]. 2000 [cit. 2010-04-11]. Viskozita oleja. Dostupné z WWW: <<http://www.csmarketing.cz/>>.
- [6] Taylor, R.I. *Lubrication, Tribology & Motorsport*, Shell Global Solutions (UK), 2002 s. 1-13. (1)
- [7] Pavel Chalupa, Současný stav a vývojové tendence v konstrukci mazání motorů, BP, ÚADI, 2007, str. 21, obr. 23. (24)
- [8] Smeeth, M.-Spikes, H. A.-Gunsel, S.: The Formation of Viscous Surface Films by Polymer Solutions: Boundary or Elastohydrodynamic Lubrication. *Tribology Transactions*, 39, 1996, s. 720-725.
- [9] Müller, M., Topolovec-Miklozic, K., Dardin, A., Spikes, H. A., The Design of Boundary Film-Forming PMA Viscosity Modifiers, *Tribology Transactions*; Apr-Jun 2006; 49, 2; ProQuest Science Journals, pg. 225
- [10] Cann, P.M. and Spikes, H. A. (1994), "The Behavior of Polymer Solutions in Concentrated Contacts: Immobile Surface Layer Formation." *Trib. Trans.* 37, pp. 580-586
- [11] Balazs, A. C., Gempe, M. And Lantman, C. W. (1991), "Effect of Molecular Architecture of the Adsorption of Copolymers" *Macromolecules* 24, pp. 168-176
- [12] Křupka I, Hartl M The influence of thin boundary films on real surface roughness in thin film, mixed EHD contact. *Tribology International* (2006), doi:10.1016/j.triboint.2006.10.008
- [13] Glovnea RP, Olver AV, Spikes HA. Lubrication of rough surfaces by a boundary film-forming viscosity modifier additive. *Trans ASME, J Tribol* 2005;127(2):223-9
- [14] Johnston, G. J.-Wayte, R.-Spikes, H. A.: The Measurement and Study of Very Thin Lubricant Films in Concentrated Contacts. *Tribology Transactions*, 34, 1991, s. 187-194.
- [15] Cann, P. M.-Spikes, H. A.-Hutchinson, J.: The Development of a Spacer Layer Imaging Method (SLIM) for Mapping Elastohydrodynamic Contacts. *Tribology Transactions*, 39, 1996, s. 915-921.

ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV

Obr. 1 Zmena viskozity v závislosti na teplote a veľkosti strižných síl [6]	19
Obr. 2 Približné teploty v jednotlivých častiach spaľovacieho motoru [7]	20
Obr. 3 Správanie sa referenčného základového oleja pri rôznych teplotách [8]	23
Obr. 4 Správanie sa jednotlivých polymérnych modifikátorov viskozity pri rôznych teplotách [8]	24
Obr. 5 Mazivostná prísada OCP-D (10% koncentrácia) a jej správanie sa pri rôznych teplotách [8]	25
Obr. 6 Štruktúra a rozmiestnenie funkčných skupín funkčne modifikovaného PMA kopolyméru [9]	26
Obr. 7 Príklady funkčne upravených PMA monomérov obsiahnutých v experimente [9]	27
Obr. 8 Priebeh hrúbky mazacieho filmu v závislosti na rýchlosti, polymérne modifikátory viskozity bez funkčnej skupiny (120°C) [9]	27
Obr. 9 Súčiniteľ trenia v závislosti na rýchlosti vzájomného pohybu trecích povrchov, polymérne modifikátory viskozity bez funkčnej skupiny (120°C) [9]	28
Obr. 10 Hrúbka mazacieho filmu v závislosti na rýchlosti vzájomného pohybu trecích povrchov, polymérne modifikátory viskozity s funkčnou skupinou (120°C) [9]	29
Obr. 11 Hodnoty súčiniteľa trenia vybraných polymérnych modifikátorov viskozity obsahujúcich funkčnú skupinu v závislosti na rýchlosti vzájomného pohybu trecích povrchov (120°C) [9]	29
Obr. 12 Vplyv molekulovej hmotnosti na hodnoty hrúbky mazacieho filmu v závislosti na rýchlosti (120°C) [9]	30
Obr. 13 Vplyv molekulovej hmotnosti na hodnoty súčiniteľa trenia v závislosti na rýchlosti vzájomného pohybu trecích povrchov (120°C) [9]	31
Obr. 14 Štruktúra rozmiestnenia tzv. zhlukov funkčných skupín [9]	31
Obr. 15 Vplyv rôznej architektúry polymérnych modifikátorov viskozity na hrúbku mazacieho filmu v závislosti na rýchlosti vzájomne sa pohybujúcich trecích povrchov (120°C) [9]	32
Obr. 16 Vplyv rôznej architektúry polymérnych modifikátorov viskozity na súčiniteľ trenia v závislosti na rýchlosti vzájomného pohybu trecích povrchov [9]	32
Obr. 17 Závislosť centrálnej hrúbky mazacieho filmu minerálneho oleja s 1% PAMA v závislosti na rýchlosti vzájomného pohybu trecích povrchov [12]	34
Obr. 18 Chromatické interferogramy zachytené na začiatku a na konci testu opotrebenia pre minerálny olej s 1% PAMA (a, b) a pre referenčný minerálny základový olej (c, d) [12]	35
Obr. 19 Utváranie medzného mazacieho filmu [9]	36
Obr. 20 Jednotlivé mazivá obsiahnuté v experimente: Základový olej skupiny II., PAMA 1%, OCP 1%, styren-isopren 1% (zľava)	40
Obr. 21 Meranie elipticity v programe ACILLES	41
Obr. 22 Abbeho refraktometer firmy ZEISS používaný k meraniu indexu lomu jednotlivých mazív	42
Obr. 23 Rotačný viskozimeter HAAKE RotoVisco 1	42
Obr. 24 Schéma tribologickej stanice, na ktorej bol prevádzaná experimentálna štúdia [12]	44

Obr. 25 Detailný pohľad na tribologický kontakt v experimentálnom zariadení Ústavu Konstruování	45
Obr. 26 Kalibrácia v prostredí programu ACHILLES	45
Obr. 27 Overenie hodnovernosti získaných výsledkov - viskozita 0,007722 [Pa.s]	47
Obr. 28 Hodnoty centrálnej hrúbky mazacieho filmu 1% PAMA (22,6°C)	48
Obr. 29 Hodnoty centrálnej hrúbky mazacieho filmu 1% OCP (23,4°C)	49
Obr. 30 Hodnoty centrálnej hrúbky mazacieho filmu 1% Styren-isopren (23,5°C)	50
Obr. 31 Nárast centrálnej hrúbky mazacieho filmu v závislosti na rýchlosti-STYREN-ISOPREN ..	50
Obr. 32 Vplyv koncentrácie na centrálnu hrúbku mazacieho filmu	51
Obr. 33 Zvýšenie hrúbky mazacieho filmu v určitej oblasti eliptického kontaktu	53

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1 Polymérne modifikátory viskozity zahrnuté v experimente spolu s ich molekulovými hmotnosťami [8].....	22
Tab. 2 Jednotlivé koncentrácie polymérnych modifikátorov viskozity	22
Tab. 3 Tabuľka nameraných hodnôt (dynamická viskozita, index lomu)	43