

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra jakosti a spolehlivosti strojů



Bakalářská práce

Tribodiagnostika

Autor práce: Adam Bureš

Obor studia: Technika a technologie zpracování odpadů

Vedoucí práce: doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.

© 2020 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Adam Bureš

Procesní inženýrství

Technika a technologie zpracování odpadů

Název práce

Tribodiagnostika

Název anglicky

Tribodiagnostics

Cíle práce

Cílem práce je popsat současné metody analýzy olejů pro různá strojní zařízení. Práce bude zaměřena na popis faktorů, které mohou kvalitu oleje ovlivnit. Na vybraných vzorcích bude realizována ukázka tribodiagnostiky s vyhodnocením a doporučením pro praxi.

Metodika

- 1) Úvod
- 2) Cíl a metodika práce
- 3) Definice tribodiagnostiky a podstata zkoušení (tribologie, tribotechnika, tribodiagnostika, technický stav stroje a oleje)
- 4) Nečistoty a možnosti jejich stanovení (druhy nečistot, možnosti stanovení atd.)
- 5) Praktická ukázka vybraných vzorků (analýza vybraných vzorků, vyhodnocení, možnosti zlepšení atd.)
- 6) Závěr

Doporučený rozsah práce

30-40

Klíčová slova

olej, stroj, diagnostika, tribologie

Doporučené zdroje informací

BHUSHAN, B. – GUPTA, B K. *Handbook of tribology : Materials, coatings, and surface treatments*. New York: Osborne-McGraw-Hill, 1991. ISBN 0-07-005249-2.

Předpisy, normy a periodika.

SEJKOROVÁ, M. *Metody tribotechnické diagnostiky*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Univerzita Pardubice, 2013, ISBN 978-80-248-3280-7.

SOCIETY OF TRIBOLOGISTS AND LUBRICATION ENGINEERS, – EBRARY (FIRMA), – GRESHAM, R M. – TOTTEN, G E. *Lubrication and maintenance of industrial machinery [elektronický zdroj] : best practices and reliability*. Boca Raton: CRC Press, 2008. ISBN 1420089358.

ZIEGLER, J. – HELEBRANT, F. – MARASOVÁ, D. *Technická diagnostika a spolehlivost, Díl I. Tribodiagnostika*. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Ostrava 2004, ISBN 80-7078-883-6.

Předběžný termín obhajoby

2019/2020 LS – TF

Vedoucí práce

doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra jakosti a spolehlivosti strojů

Elektronicky schváleno dne 18. 12. 2018

doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 15. 2. 2019

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

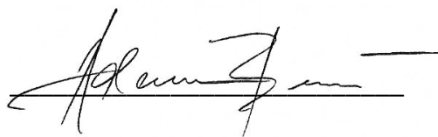
Děkan

V Praze dne 27. 02. 2020

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Tribodiagnostika" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 27.3.2020

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Adam Zeman", written over a horizontal line.

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval doc. Ing. Martinu Pexovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, za vstřícnost při konzultacích a věnovaný čas při měření a celkové pomoci při psaní mé práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Michalu Holúbkovi za pomoc při měření a poskytnutí informací o měření a měřicích aparaturách. Děkuji také firmě Benteler ČR s.r.o., a to konkrétně panu Vilému Novákovi, mistru údržby za poskytnutí vzorků oleje. V neposlední řadě chci poděkovat rodině za veškerou podporu během studia.

Abstrakt: Tato bakalářská práce se zabývá bezdemontážní technickou diagnostikou maziv ve strojních zařízeních. V úvodu teoretické části jsou vysvětleny základní tribotechnické pojmy a popsána podstata a význam tribodiagnostiky. Ve druhé části rešerše jsou představeny nejdůležitější faktory ovlivňující kvalitu oleje a možnosti jejich stanovení s uplatněním v praxi. Ve třetí části práce jsou předchozí teoretické poznatky uplatněny na praktickém příkladu. Praktický význam tribodiagnostiky je předveden na vzorcích hydraulického oleje z automotive firmy, zabývající se výrobou kovových součástí do aut. V samotném závěru jsou shrnuty především výsledky měření a význam tribodiagnostiky v průmyslové výrobě.

Klíčová slova: olej, stroj, diagnostika, tribologie, údržba

Abstract: This bachelor thesis deals with non-dismantling diagnostics of lubricants in machinery. The introduction of the theoretical part explains the basic tribotechnical concepts and describes the nature and importance of tribodiagnostics. The second part of the research presents the most important factors influencing the oil quality and the possibilities of their determination in practice. In the second part of this thesis the previous theoretical knowledge is applied on a practical example. The practical importance of tribodiagnostics is demonstrated on samples of hydraulic oil from an automotive company engaged in the production of metal parts for cars. The conclusion summarizes the results of the measurement and the importance of tribodiagnostics in industrial production.

Keywords: oil, machine, diagnostics, tribology, maintenance

Obsah

1. Úvod	1
2. Cíl a metodika práce	2
3. Definice tribodiagnostiky a podstata zkoušení	4
3.1 Tribologie.....	4
3.1.1 Tribologický systém.....	5
3.1.2 Tření	5
3.1.2.1 Kluzné tření	6
3.1.2.2 Valivé tření	8
3.2 Tribotechnika	9
3.3 Tribodiagnostika.....	9
3.4 Opotřebení	10
3.4.1 Adhezivní opotřebení.....	11
3.4.2 Abrazivní opotřebení.....	12
3.4.3 Erozivní opotřebení	12
3.4.4 Kavitační opotřebení	13
3.4.5 Únavové opotřebení.....	14
3.4.6 Korozivní a oxidační opotřebení.....	15
4. Nečistoty a možnosti jejich stanovení	16
4.1 Druhy nečistot.....	16
4.2 Možnosti stanovení degradace maziva	18
4.2.1 Viskozita	18
4.2.1.1 Dynamická viskozita	20
4.2.1.2 Kinematická viskozita	21
4.2.1.3 Vztah mezi viskozitou a teplotou	22
4.2.1.4 Viskozitní index.....	23
4.2.1.5 Vztah mezi viskozitou a tlakem	24
4.2.2 Hustota a relativní hustota.....	25
4.2.3 Bod vzplanutí a bod hoření	26
4.2.4 Oxidační stabilita	26
4.2.5 Bod tuhnutí a bod zákalu	27
4.2.6 Obsah vody.....	28
4.2.7 Stanovení popela.....	29
4.2.8 Neutralizační číslo a číslo celkové kyselosti a alkality	30

4.2.9 Karbonizační zbytek.....	30
5. Praktická ukázka vybraných vzorků	31
5.1 Měření hustoty a viskozity	33
5.2 Stanovení viskozitního indexu	37
5.3 Celkové znečištění	38
5.4 Kód čistoty (NAS 1638).....	39
6. Závěr	43
7. Seznam použitých zdrojů.....	45
8. Seznam obrázků.....	49
9. Seznam tabulek	50

1. Úvod

Již v pravěku při vynálezu kola a vozíku lidé velmi rychle pochopili důležitost mazacích prostředků, a to když začala dřevěná kola v důsledku intenzivního tření o náboj hořet. Egypťané takto zahřátá kola chladili různými médii. Při použití olivového oleje nebo tuku však zjistili, že toto mazivo nejenom že dobře odvádí teplo, ale také že se kola mnohem snadněji otáčí. [1] O několik tisíc let později maziva hrají stále důležitější roli, uplatňují se v hydraulických systémech, v motorech, v převodovkách, ložiscích při přenosu točivého momentu apod. Jsou součástí velmi drahých zařízení, které jsou neustále v provozu. Správnou údržbou mazacích prostředků tak můžeme prodloužit životnost různých strojních součástí o několik let provozu a ušetřit tak značné prostředky, což je v dnešním globalizovaném trhu a obrovské konkurenci zásadní pro každý provoz.

Dnes je tedy již běžné, že má většina průmyslových provozů technika údržby, který se zaměřuje právě na diagnostiku funkce maziv ve strojních zařízeních. Právě touto diagnostikou se zabývá tribodiagnostika a je dnes již nedílnou součástí každého provozu. Díky široké škále moderních měřících zařízení je možné dostat velmi přesné hodnoty, které slouží jako indikátor degradace maziva. Tribodiagnostika má i druhý význam, a to že skrze kvalitu oleje je možné sledovat i opotřebení strojních zařízení.

V této bakalářské práci budou vysvětleny základní tribologické pojmy a definována tribodiagnostika. Budou popsány základní druhy opotřebení a jednotlivé druhy zkoušek, které se v praxi používají. Budou popsány typické měřící zařízení a v samotném závěru proběhne praktická ukázka vybraných vzorků, na které bude lépe znázorněny principy a uplatnění konkrétních měření.

2. Cíl a metodika práce

Cílem této bakalářské práce je popsat současné metody analýzy olejů pro různá strojní zařízení a popsat nejdůležitější faktory, které mohou ovlivnit jejich kvalitu. Kromě úvodu do problematiky, definování základních pojmů a rešerše tribodiagnostických metod, je cílem bakalářské práce i praktická ukázka vybraných vzorků oleje, na kterých bude ukázáno využití tribodiagnostiky v praxi.

První a druhá část bakalářské práce jsou teoretické a jsou zaměřeny na definici základních pojmů souvisejících s tribodiagnostikou. V první části jsou vysvětleny pomocí české i zahraniční literatury základní pojmy jako jsou tření, opotřebení a podstata tribodiagnostiky. V druhé části jsou již popsány faktory, ovlivňující kvalitu maziva a stručně vysvětleny základní zkoušky. Poznatky jsou shrnuty v literární rešerši a jejich obsah je i teoretickým podkladem pro třetí část bakalářské práce.

Třetí část bakalářské práce je zaměřena na analýzu vzorků, které poskytla firma Benteler ČR s.r.o. Měření bylo provedeno v laboratoři tribotechniky Technické fakulty České zemědělské univerzity v Praze. Měření bylo provedeno na Stabingerově viskozimetru Anton Paar SVM 3000 (obr. 1) a na přístroji LNF-C.

Obrázek 1 Stabingerův viskozimetr Anton Paar SVM 3000 v laboratoři tribotechniky Technické fakulty ČZU v Praze



Pomocí Stabingerova viskozimetru SVM 3000 byla u vzorků měřena hustota a jak kinematická, tak dynamická viskozita. Vzorky byly před měřením nejprve důkladně promíchány, aby došlo k jejich homogenizaci a případné nečistoty nezůstaly usazené na dně, což by mohlo vést k nepřesnému měření. Viskozimetr byl nejdříve pročištěn technickým benzínem a následně do něho byl vložen pomocí stříkačky (obr. 1) vzorek testovaného oleje, který musel projít celým vnitřním okruhem viskozimetru, aby bylo měření provedeno správně. Odpadní olej poté odchází do přiložené nádoby (obr. 1) a je posléze skladován, než je připraven k likvidaci. Měření jednoho vzorku trvá přibližně minutu a při každém měření je třeba vnitřní okruh pročistit technickým benzínem. Pomocí laserového přístroje LNF-C bylo provedeno měření znečišťujících částic. Postup měření byl podobný jako u Stabingerova viskozimetru. Nejprve byly vzorky mechanicky promíchány, aby došlo k jejich homogenizaci. Následně byl technickým benzínem pročištěn a kalibrován přístroj LNF-C. Přístroj byl připojen pomocí USB do počítače, kde se v příslušné aplikaci ve formě grafů a tabulek zobrazovaly výsledky jednotlivých měření. Byly použity technické parametry oleje od výrobce oleje a nároky na kvalitu oleje od výrobce lisu. S těmito parametry byla porovnána získaná data z vlastního měření a posouzena validita harmonogramu údržby ve firmě Benteler ČR s.r.o.. Data byla zpracována v programu Microsoft Excel a ve formě tabulek a grafů jsou prezentována v samotné práci.

3. Definice tribodiagnostiky a podstata zkoušení

Tribotechnická diagnostika neboli tribodiagnostika je bezdemontážní diagnostika třecích částí strojních mechanismů, kde hlavním faktorem určujícím opotřebení je mazivo, které je mezi nimi umístěno. Jako kdekoliv jinde, tak i zde se musí hledat za zavedením tribodiagnostiky (např. v průmyslových podnicích) primárně ekonomické hledisko. Jsou to právě především možné ztráty zaviněné nedostatečným technickým stavem strojních zařízení, které by mohly vést k přerušení výroby, co vede k používání tribotechnické diagnostiky v praxi. „*Je odhadováno, že ztráty způsobené nesprávnou aplikací tribologických zásad jsou okolo 30 % vyrobené energie, že 80-90 % strojů je vyřazováno v důsledku škod z opotřebení tenkých povrchových vrstev, že podíl ložisek na ztrátách je 38 – 50% atd.*“ (Helebrant, 2013, s. 9). Krom ekonomického hlediska je zde i hledisko ekologické, většina olejů je ve vyhlášce Ministerstva životního prostředí č.93/2016 Sb. o katalogu odpadů vedena jako nebezpečný odpad, a tak je lepší vzniku tohoto odpadu předcházet. I zde je vhodná pravidelná aplikace tribotechnické diagnostiky, ideálně doplněná i o čištění oleje, které zamezí vzniku odpadu. [2]

3.1 Tribologie

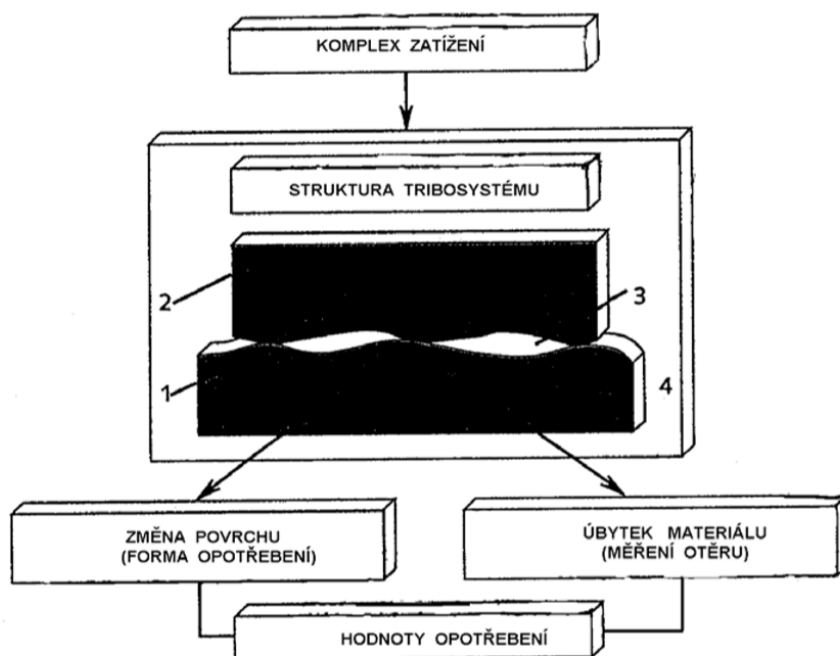
Studium tribologie má dlouhou historii, má se za to, že mnoho ze základních zákonů tření jako vztah mezi normálovou a třecí silou, nadefinoval koncem 15. století již Leonardo da Vinci. Na rozdíl od termomechaniky, kde byly mylné představy jako třeba Flogistonová teorie brzy vyvráceny vědci, jako byl Lavoisier, v oboru tribologie moc znalostí zatím publikováno nebylo. To se změnilo až v roce 1886, kdy Osborne Reynolds vydal článek o hydrodynamickém mazání. Opotřebení a základy tření jsou mnohem komplexnější oblast, k jejímuž výzkumu je zapotřebí moderní a přesná technika jako jsou elektronové mikroskopy nebo mikroskopie atomárních sil. Proto bylo možné tyto procesy studovat na mikroskopické úrovni, kde je možné skutečně pochopit jejich povahu až v poslední době. Tribologie je tedy poměrně nový vědní obor, kde většina znalostí byla objevena až po druhé světové válce. [3]

Tribologie, zaměřující se na tření, opotřebení a mazání vzájemně interagujících povrchů, které jsou v relativním pohybu, je novou oblastí vědy definovanou v roce 1967 výborem Organizace pro hospodářskou spolupráci a rozvoj (OECD). Název *Tribologie* je odvozen z řeckého slova *tribos*, které znamená tření nebo těž klouzání. Opotřebení je hlavní příčinou ztráty materiálu a mechanické výkonnosti a jakékoli snížení opotřebení může vést ke značným úsporám. Tření je hlavní příčinou opotřebení a ztráty energie. Velmi se dá ušetřit, pokud se daří účinky tření kontrolovat. Mazání je účinný způsob redukce opotřebení a snižování tření. [3]

3.1.1 Tribologický systém

Pojem tribologický systém označuje uspořádání dvou nebo více vzájemně na sebe působících částí, včetně materiálů, z kterých jsou tvořeny, a prostředí, ve kterém dochází ke tření a opotřebení. [6] Tribologický systém má ve své struktuře 4 prvky. Jsou to *základní třecí těleso (1)*, *třecí těleso (2)*, *mezilátka (3)*, které tvoří aktivní prvky systému, a *okolí (4)*, které je pasivním prvkem (obr. 2). Jestliže jeden aktivní prvek chybí, jedná se o redukovaný tribologický systém. Můžou tedy nastat 4 případy: 1) těleso-těleso (např. pneumatika s vozovkou), 2) těleso-kapalina (vodovodní potrubí), 3) těleso-plyn (plynový hořák), 4) těleso-sypký substrát (orba, lopata bagru). V každém tribologickém systému se mění mechanická energie na tepelnou. [4]

Obrázek 2 Schéma tribologického systému [4]



3.1.2 Tření

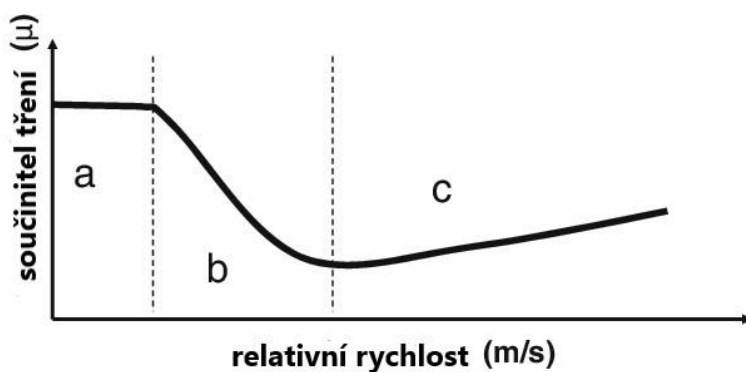
Tření je disipace energie mezi vzájemně se pohybujícími tělesy. Od práce Da Vinciho a Amontona jsou po staletí známé čtyři základní empirické zákony tření:

- *Existuje poměr mezi maximální tangenciální silou před začátkem pohybu a normálovou silou, když je statické těleso vystaveno rostoucímu tangenciálnímu zatížení.*
- *Tangenciální třecí síla je během pohybu úměrná třecí síle.*

- *Třecí síla není závislá na styčné ploše těles.*
- *Třecí síla není závislá na rychlosti posuvu.*

Dva základní druhy tření jsou tření vnitřní a vnější. **Vnější tření** vzniká při dotyku dvou třecích ploch dvou různých těles a **vnitřní tření** vzniká v materiálových vrstvách jednoho tělesa. Tření je možné rozdělit i z hlediska relativního pohybu, a to na **pohybové tření**, **klidové tření** a **nárazové tření**. Další možností je dělit tření podle skupenství. **Tření pevných těles** nastává, pokud jsou dotykové materiály v pevném skupenství a jeho původ je v interakci těchto povrchů a jejich mikronerovností. U mikronerovností může docházet k jejich vzájemnému zachytávání (drsnost), pružné či elastické deformaci nebo adhezi. Tření pevných těles neboli také suché tření se může vyskytovat například na lopatách rýpadel, kde se o sebe tře zemina a povrch lopaty. Pokud má vrstva materiálu, ve které probíhá tření, vlastnosti kapaliny, jedná se o **kapalinové tření**. Velikost tření se odvíjí od viskozity kapaliny a vzniká mezi jednotlivými vrstvami kapaliny. Těmto vrstvám říkáme hydrostatické nebo hydrodynamické vrstvy. Velikost součinitele tření popisuje Stribeckova křivka (obr. 3). Kapalinné tření probíhá například v kluzných ložiskách, či v tvarových vedeních. **Plynové tření** je podobné kapalinovému, ale mezilátka má vlastnosti plynu. **Plazmové tření** je specifikováno tím, že vrstva, ve které probíhá tření, má vlastnosti vysoce ionizovaného plynu – plazmy. Vzhledem k extrémním podmínkám, v kterých se látka v plazmatickém stavu nachází, nebyl tento způsob tření ještě pořádně popsán. [4] [3]

Obrázek 3 Stribeckova křivka; a – oblast suchého tření, b – oblast smíšeného tření, c – oblast hydrodynamického tření [7]



3.1.2.1 Kluzné tření

Koeficient tření μ mezi dvěma pevnými látkami je definován jako F_t / F_n , kde F_t označuje třecí sílu a F_n zatížení nebo sílu kolmou k povrchu (obr. 4). Existuje velmi jednoduchý zákon týkající se μ . Tento zákon uvádí, že koeficient tření je nezávislý na styčné ploše. To znamená, že při

stejném zatížení F_n budou třecí síly pro malý blok stejné jako pro velký. Z toho vyplývá, že třecí síla je přímo úměrná zatížení, stejně tak jako je μ nepřímo úměrný zatížení. Fyzikální vysvětlení je, že plocha skutečného atomového kontaktu mezi dvěma pevnými látkami je obvykle úměrná zatížení. Druhým zajímavým pozorováním je to, že koeficient tření μ je často téměř nezávislý na rychlosti, ledaže je posuvná rychlost velmi nízká, kde je důležitá tepelná aktivace nebo naopak velmi vysoká. Zajímavé také je, že velikost koeficientu tření není téměř vůbec závislá na drsnosti povrchu. Výjimku tvoří pouze velmi hladké nebo velmi drsné povrchy, třecí síly jsou v obou těchto případech mnohem větší než při běžné drsnosti. Ke kluznému tření dochází například v kluzných ložiskách (ať už radiálních či axiálních), v různých kluzných nebo válcových vedeních nebo ve smýkadlech. [8]

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

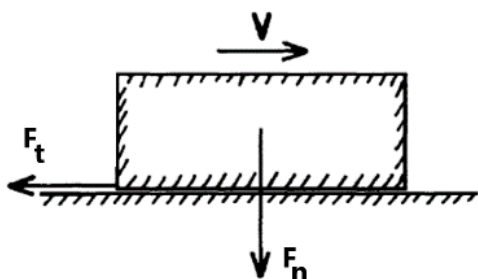
Kde:

μ je koeficient tření;

F_t je třecí síla [N];

F_n je zatížení [N].

Obrázek 4 Kluzné tření [8]



Adhezivní teorie tření: „Přenos síly podle této teorie zabezpečuje adhezivní spojení, které vznikne aktivizovanými molekulárními účinky a vlivem extrémně vysokých lokálních reálných tlaků na vrcholcích kontaktujících se mikronerovností. Součinitel tření zde určuje poměr smykové pevnosti vytvářených mikrosvarů a průměrného tlaku způsobujícího plastickou deformaci materiálu.“ (Helebrant, 2000, s. 21)

Adhezivní tření se vyskytuje například ve valivých ložiskách nebo v ozubených kolech.

Molekulárně – mechanická teorie tření: Podobná jako adhezivní teorie, jen s tím rozdílem že se dotyk třecích těles realizuje v mikroskopických dotykových oblastech. Využívá se Hertzovy teorie kontaktu a síly se přenášejí pomocí adhezivních můstků. Celkový součinitel tření je součet adhezivních a deformačních součinitelů. [4]

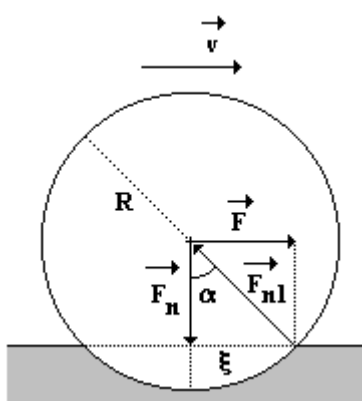
Energetická teorie tření: Podle této teorie se tření skládá z mechanické a molekulární složky. Energie se skládá z deformační složky a adhezní složky. [4]

3.1.2.2 Valivé tření

Valivé tření vzniká při valení tělesa po rovině nebo jiném tělese. Třecí síla při valení představuje zhruba 1/10 až 1/20 hodnoty třecí síly při kluzném tření. Adhezní složka valivého tření rozhoduje především o opotřebení. Deformační složka je dána různými mikroskopickými prokluzy, plastickou deformací apod. Valivé tření vzniká právě v těchto mikroskopických prokluzech. Plastické a pružné deformace tělesa pod valícím tělesem zapříčiňují odpor proti valení. Pojem *valivý odpor* často v literatuře nahrazuje *valivé tření*. Podle Bowdena a Tabora je celkový odpor proti valení dán součtem ztrát pružnou hysterezí při odvalování, prokluzem v důsledku valení a vnitřním třením v mazací látce. [4]

Součinitel valivého tření se spočítá pomocí ramene valivého odporu ζ , o které se posouvá oproti kolmé ose výslednice dotykových napětí. (obr. 5)

Obrázek 5 Rameno valivého odporu [9]



$$f = \frac{F_t}{F_n} = \frac{\zeta}{R} \quad (2)$$

Kde:

f je valivé tření;

F_t je třecí síla [N];

F_n je zatížení [N];

ζ je rameno valivého odporu [m];

R je poloměr [m].

3.2 Tribotechnika

Tribotechnika je vědní obor, který přenáší nauku tribologie do praxe. Jde o technologické a ekonomické dopady tření, opotřebení a mazání na strojní zařízení.

Tribotechnika se zabývá především těmito oblastmi [10]:

- maziva a zkoušení maziv,
- materiály pro třecí dvojice,
- výpočet, konstrukce a optimalizace třecích dvojic,
- způsob mazání a mazací zařízení,
- vědecké základy pro tření a opotřebení,
- měřicí a kontrolní metody pro tribotechnické pochody,
- spolehlivost a diagnostika konstrukčních součástí a skupin,
- speciální technologické postupy vedoucí ke zvýšení odolnosti proti opotřebení,
- organizace techniky mazání v provozu.

Tribotechnika kombinuje několik vědních disciplín – fyziku, chemii, konstrukční techniku, materiálovou techniku, techniku maziv, ekonomii. Význam tribotechniky spočívá ve zlepšení kvality a spolehlivosti třecích dvojic, a tedy ve snížení nákladů na údržbu a energie, zvýšení provozuschopnosti a životnosti strojních zařízení. Až 90 % všech poruch mechanických součástí je zapříčiněno právě chybami a nedostatky v tribotechnických výpočtech a v konstrukci. [11]

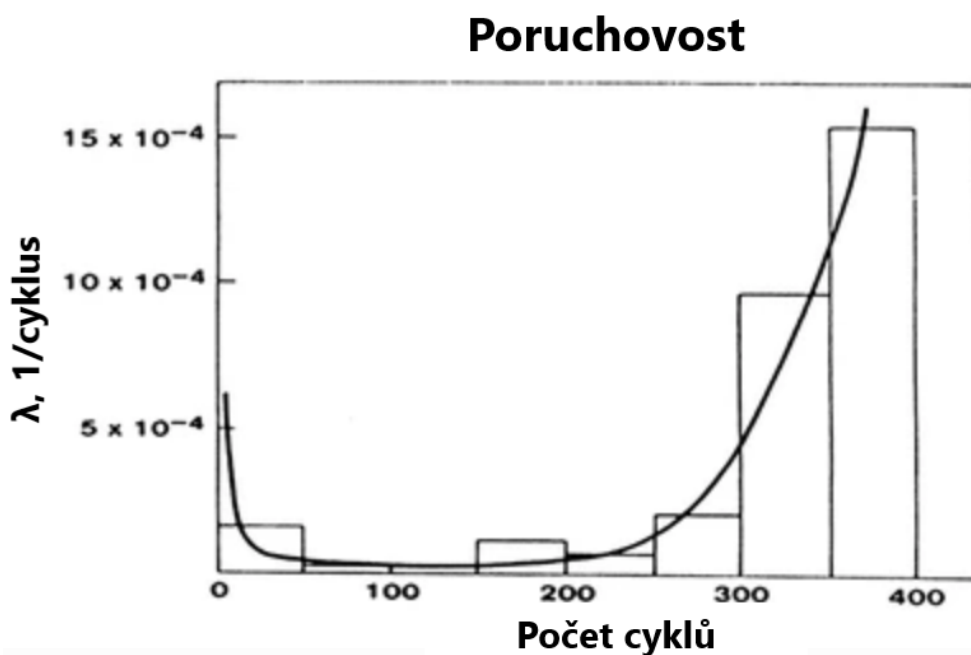
3.3 Tribodiagnostika

Při provozu dochází ve strojních zařízeních v jednotlivých tribologických systémech k opotřebení. K identifikaci tohoto opotřebení slouží právě maziva a jejich stav. Pokud například došlo k opotřebení povrchů, uvolní se do oleje částice kovů nebo jejich sloučeniny. Tyto částice tedy neustále kolují v mazivu a se vzrůstajícím opotřebením stoupá i jejich koncentrace. Nejdůležitější formy projevu opotřebení jsou změny tvaru a vzhledu namáhaných třecích členů, změny krystalinické povahy ploch třecích členů, změny výkonu tření a teploty nebo změny chemických a fyzikálních vlastností maziva. Hlavní příčinou vzniku opotřebení je tření mezi plochami dvou těles v tribotechnickém systému. [12] Tribotechnická diagnostika neboli tribodiagnostika je bezdemontážní technická diagnostika, která používá právě maziva ke zhodnocení opotřebení a jakosti technických systémů. Pomocí jednotlivých parametrů oleje (kinematická viskozita, bod vzplanutí, bod tuhnutí, obsah vody, hustota, obsah nerozpustných

látek, odolnost proti pění apod.) lze pravidelnou kontrolou určit jeho životnost, a tak i interval výměny oleje. Tribodiagnostikou lze tedy sledovat jak stav opotřebených jednotlivých zařízení, tak i kvalitu samotného oleje. Pravidelná analýza tedy pomáhá odhalit čas do další nutné výměny maziva, tak zvanou zbytkovou životnost. Tato funkce maziva se přenáší do grafu jako závislost množství otěrových částic na čase a je známá pod označením Vanová křivka. (obr. 6) [4]

Obrovské náklady na tribologické nedostatky jsou většinou způsobeny velkým množstvím energetických a materiálových ztrát, které se vyskytují současně na prakticky každém mechanickém zařízení v provozu. Při přezkumu na základě jediného stroje jsou ztráty malé. Pokud se však stejná ztráta opakuje na tisících či miliónech strojů podobného typu, náklady budou velmi vysoké.

Obrázek 6 Jedno z možných provedení Vanové křivky [13]



3.4 Opotřebenění

Selhání vrstvy maziva narušuje relativní pohyb mezi pevnými tělesy a nevyhnutelně způsobuje vážné poškození kontaktních povrchů. Důsledkem selhání vrstvy maziva je značné opotřebenění. Opotřebenění za těchto okolností je výsledkem adheze mezi styčnými tělesy a nazývá se *adhezivní opotřebenění*. Když jsou vrstvy maziva částečně účinné, pak dochází k mírnějším formám opotřebenění a ty jsou často iniciovány únavovými procesy v důsledku opakovaných napětí ve skluzu nebo při valení. Tyto mírnější formy opotřebenění lze proto nazvat *únavové opotřebenění*. Na druhou stranu, pokud je materiál mazací vrstvy tvořen tvrdými částicemi nebo pouze protéká

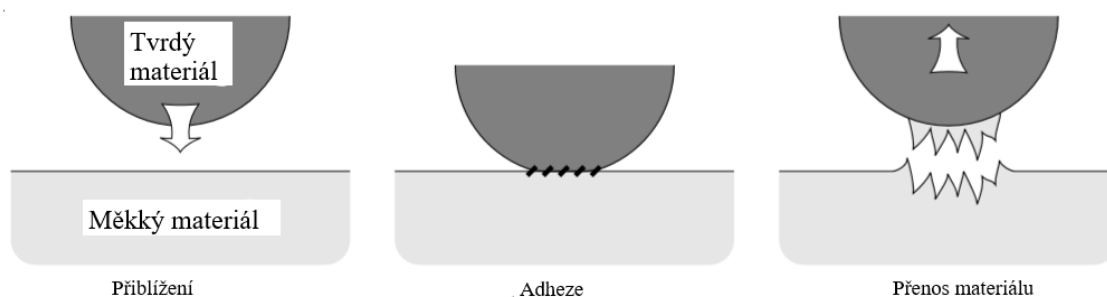
proti jednomu tělesu, aniž by poskytoval oporu proti jinému tělu, pak nastane forma opotřebení, která může být někdy velmi rychlá a je známá jako *abrazivní opotřebení*. Dvě další související formy opotřebení jsou *erozivní opotřebení*, které je způsobeno narážejícími částicemi a *kavitační opotřebení*, které je způsobeno rychle tekoucími tekutinami. V některých praktických situacích je materiál vrstvy tvořen chemickým znečištěním z kteréhokoli kontaktního tělesa, a přestože to může za určitých podmínek poskytnout dobré mazání, je značné opotřebení prakticky nevyhnutelné. Tato forma opotřebení je známá jako *korozivní opotřebení*. Pokud je korozivním prostředkem atmosférický kyslík, pak se opotřebení nazývá *oxidační opotřebení*. [3]

3.4.1 Adhezivní opotřebení

Adhezivní opotřebení je velmi závažná forma opotřebení charakterizovaná vysokou mírou opotřebení a velkým nestabilním koeficientem tření. Třecí kontakty mohou být rychle zničeny adhezivním opotřebením a v extrémních případech může být kluznému pohybu zabráněno velmi velkými koeficienty tření nebo zadřením. Kovy jsou zvláště náchylné k adhezivnímu opotřebením. Většinu poruch maziva v třecích kovových kontaktech má za následek adhezivní opotřebení, protože se to týká poruchy základní funkce maziva, která zajišťuje určitý stupeň separace mezi třecími povrchy. Pokud nejsou třecí povrchy odděleny, adheze a následné opotřebení jsou téměř nevyhnutelné. [3]

Mechanismus adheze funguje na principu přilnavosti dvou povrchů. Povrchy tuhých těles nejsou dokonale hladké, ale jejich povrch je tvořen různými mikronerovnostmi. Při kontaktu dvou těles tedy nedochází k jejich styku v celé ploše kontaktu, ale pouze v těchto dotykových ploškách mikronerovností. Při jejich kontaktu dojde k adhezi a vytvoří se mikrospoje, při jejichž následném porušení dojde k přenosu materiálu z měkčího tělesa na tvrdší. (obr. 7) [4]

Obrázek 7 Mechanismus adheze [3]

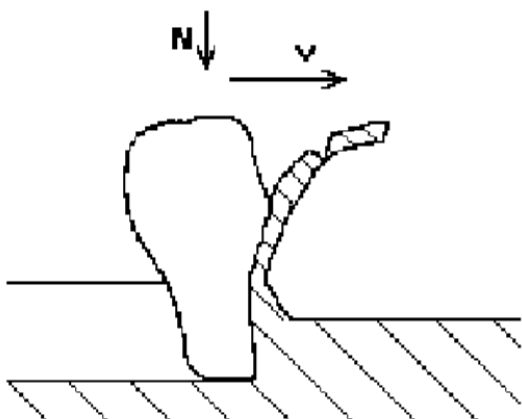


3.4.2 Abrazivní opotřebení

K abrazivnímu opotřebení dochází vždy, když je pevné těleso vystaveno působení částic materiálu, který má stejnou nebo větší tvrdost. Běžným příkladem tohoto problému je opotřebení lopat na zemních strojích. Jednoduše řečeno je tedy abrazivní opotřebení ztráta materiálu průchodem tvrdých částic přes jeho povrch. [2] Jakýkoli materiál, i když je velmi měkký, může způsobit abrazivní opotřebení, pokud jsou přítomny tvrdé částice. Například organický materiál, jako je cukrová třtina, je spojen s abrazivním opotřebením rezaček a drtičů třtiny kvůli malé frakci oxidu křemičitého přítomného v rostlinných vláknech. [14]

Původně se předpokládalo, že abrazivní opotřebení pískem nebo tvrdými nerovnostmi se podobalo řezání řadou obráběcích strojů nebo pilníku. Mikroskopické vyšetření však odhalilo, že proces řezání je aproximován pouze nejostřejšími zrna a je zapojeno mnoho dalších nepřímých mechanismů. Částice nebo zrna mohou odstraňovat materiál mikro-řezáním (obr. 8), mikro-trhlina, vytažením jednotlivých zrn nebo zrychlenou únavou opakovanými deformacemi. [15]

Obrázek 8 Mechanismus abrazivního opotřebení mikro-řezáním [16]

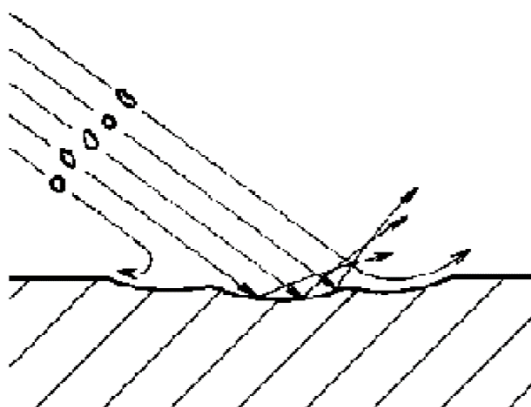


3.4.3 Erozivní opotřebení

Erozivní opotřebení je způsobeno nárazem částic pevné látky nebo kapaliny na povrch předmětu (obr. 9). K erozivnímu opotřebení dochází u celé řady strojních zařízení a typickými příklady jsou poškození lopatek turbíny letadla, letícího přes oblaky prachu a opotřebení oběžných kol čerpadla v systémech zpracování minerálních kalů. Společně s jinými formami opotřebení nezaručuje mechanická pevnost odolnost proti opotřebení a pro minimalizaci opotřebení je nutná podrobná studie vlastností materiálu. Vlastnosti erodující částice jsou také významné a je jim neustále připisována vyšší váha při kontrole tohoto typu opotřebení.

Erozivní opotřebení zahrnuje několik mechanismů opotřebení, které jsou z velké části řízeny materiálem částic, úhlem nárazu, rychlostí nárazu a velikostí částic. Pokud je částice tvrdá a pevná, je možné, že dojde k procesu podobnému abrazivnímu opotřebení. Tam, kde kapalné částice erodují, nedochází k oděru a příslušné mechanismy opotřebení jsou výsledkem opakovaného namáhání při nárazu. [3]

Obrázek 9 Mechanismus erozivního opotřebení [16]

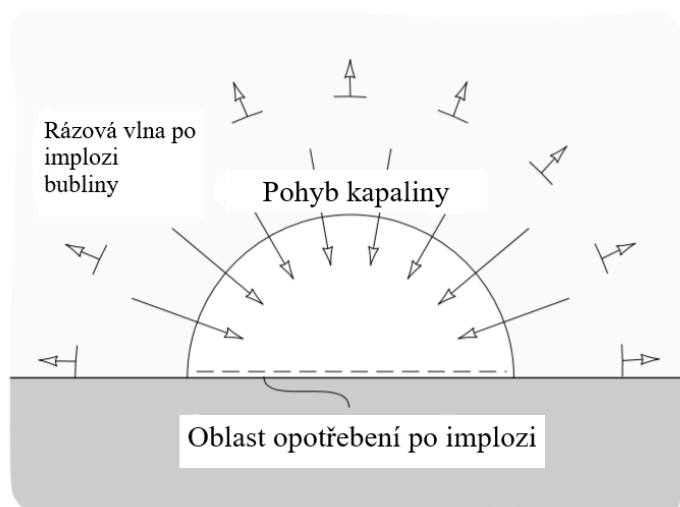


3.4.4 Kavitační opotřebení

Je známo, že kavitační opotřebení poškozuje zařízení, jako jsou vrtule nebo lopatky turbíny pracující v mokré páře a sedla ventilů. Opotřebení postupuje vytvářením řady prohlubní na povrchu vystaveném kavitaci. Tímto procesem může být zničena celá součást stroje. Provoz zařízení, např. vrtulí, je často omezen silnými vibracemi způsobenými kavitačním poškozením. [3]

Charakteristickým rysem kavitace je cyklická tvorba a zhroucení bublin na pevném povrchu v kontaktu s tekutinou. Tyto bubliny vznikají, pokud v určitém místě klesne tlak pod hodnotu tlaku nasycených par tekutiny při dané teplotě. Při opětovném zvýšení tlaku tyto bubliny implodují a vzniklý hydrodynamický ráz poškozuje povrch materiálu. (obr. 10) [4]

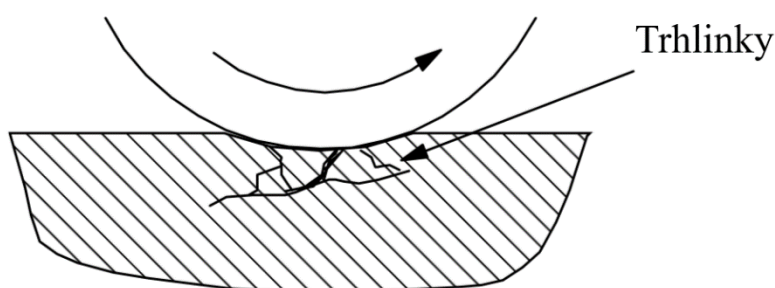
Obrázek 10 Mechanismus kavitace [3]



3.4.5 Únavové opotřebení

Únavové opotřebení je způsobeno tribologickými cykly únavového napětí, které vedou k tvorbě trhlin v povrchových oblastech kontaktních povrchů a separaci materiálu. (obr. 11) Tento typ separace materiálu je typický tvořením důlků a nazývá se též „*pitting*“. Únavové opotřebení může být pozorováno u ložisek valivých těles, roztečné linie zubů ozubeného kola a některých dalších tribologických systémů, kde je přítomen častý kontakt v cyklech a při vysokém napětí. Únava na povrchu nebo únava z valivého styku je zvláště důležitá při provozu kuličkových a válečkových ložisek a je obvykle způsobena nadměrným zatížením. [17]

Obrázek 11 Mechanismus únavového opotřebení [17]



3.4.6 Korozivní a oxidační opotřebení

Korozivní a oxidační opotřebení se vyskytuje v celé řadě situací. Základní příčinou těchto forem opotřebení je chemická reakce mezi opotřebovaným materiálem a korozivním médiem, kterým může být buď chemické činidlo, reaktivní mazivo nebo dokonce i vzduch. Korozivní opotřebení je obecný termín vztahující se k jakékoli formě opotřebení závislé na chemickém nebo korozivním procesu, zatímco oxidační opotřebení se týká opotřebení způsobeného atmosférickým kyslíkem. Obě tyto formy opotřebení sdílejí překvapující vlastnost, že rychlé opotřebení je obvykle doprovázeno sníženým koeficientem tření. Tento rozdíl mezi třením a opotřebením je velmi užitečným identifikátorem těchto procesů opotřebení. [3] Oxidační opotřebení je opotřebení suchých nemazaných kovů v přítomnosti vzduchu nebo kyslíku. Atmosférický kyslík radikálně mění koeficienty tření a míru opotřebení suchých třecích kovů a do procesu je zapojeno několik různých mechanismů.

Povrchové chemické reakce, které jsou prospěšné při prevenci adhezivního opotřebení, povedou, pokud nejsou kontrolovány, ke značné ztrátě podkladového materiálu. Pokud je materiál (kov) zkorodován a vytváří se tak film na jeho povrchu, zatímco je současně vystaven třecímu kontaktu, může dojít k jednomu ze čtyř následujících procesů [18]:

- Může být vytvořen odolný mazací film, který inhibuje jak korozi, tak opotřebení.
- Může být vyroben slabý film, který má krátkou životnost pod posuvným kontaktem a může dojít k vysoké míře opotřebení v důsledku pravidelného vytváření a ničení filmů. Koeficient tření může nebo nemusí být v tomto případě nízký.
- Ochranné povrchové filmy mohou být opotřebovány (např. pittingem) a galvanické spojení mezi zbývajícími filmy a podkladovým materiálem může vést k rychlé korozi opotřebované oblasti na povrchu.
- Korozivní a opotřebovací procesy mohou působit nezávisle a způsobit materiálové ztráty, což je jednoduše součet těchto dvou procesů spojených dohromady.

4. Nečistoty a možnosti jejich stanovení

Maziva, ať jsou jakkoliv kvalitní, se v průběhu času v provozu opotřebovávají a dochází k degradaci jejich kvality. Degradace může být způsobena různými faktory. Může se jednat o částečné odpaření maziva, jeho oxidaci nebo kontaminaci různými nežádoucími látkami. Zhoršení maziva může být plánováno a řízeno různými prostředky nebo může být nekontrolovatelné. V moderní praxi je možné se setkat ale spíše s první variantou.

Zjednodušeně řečeno, funkcí maziva je řídit tření a opotřebení v daném systému. Základní požadavky se tedy týkají výkonu maziva, tj. jeho vlivu na charakteristiky tření a opotřebení systému. Dalším důležitým aspektem je kvalita maziva, která odráží jeho odolnost vůči degradaci během provozu. Většina současných výzkumů maziv je věnována studiu, prevenci a monitorování degradace oleje, protože životnost oleje je stejně důležitá jako jeho počáteční úroveň výkonnosti. Kromě degradace za provozu, což může způsobit poškození samotného zařízení, může olej způsobit korozi kontaktních ploch. Kvalita oleje však není jediným hlediskem, důležité jsou také ekonomické úvahy. Například ve velkých strojích s obsahem několika tisíc litrů oleje mohou být náklady na olej velmi vysoké.

4.1 Druhy nečistot

Znečištění oleje způsobuje jeho rychlou degradaci. Nečistoty se můžou dělit do několika skupin. Podle *Helebranta (2000, s. 111)* se můžou dělit nečistoty na primární, nečistoty z okolí (neboli sekundární nečistoty), nečistoty vzniklé z mazacího obvodu a nečistoty vzniklé ze samotného maziva. Primární nečistoty jsou například nečistoty z potrubí nebo nádrží. Mohou je tvořit částice barvy, laků, okuje svarů, různé třísky apod. Nečistoty z okolí jsou nečistoty, které se dostaly do oleje díky nedokonalému těsnění. Může to být například prach a písek, ale i voda, která může vykondenzovat ze vzduchu. Nečistoty vzniklé z mazacího obvodu vznikají cirkulací oleje a jsou to produkty oxidace, koroze a opotřebení. Nečistoty vzniklé ze samotného maziva mohou vzniknout např. samovolným uvolněním aditiv z oleje.

Mezi základní a často se objevující nečistoty podle *Růžičky (2008)* a *Sejkorové (2013, s. 30-31)* patří:

Kontaminace vodou: Voda má korozivní účinky a omezuje rozpustnost aditiv v oleji. Redukuje odlučivost vzduchu a deemulgační vlastnosti, což může vést ke kavitaci a kavitačnímu opotřebení (viz kapitola 3.3.1.4). Její nadměrný obsah v motorových olejích může vést např. k zadření motoru. Mimo jiné podporuje i růst mikroorganismů.

Kontaminace palivem: Vniknutí paliva do maziva snižuje především jeho viskozitu a ovlivňuje bod vzplanutí. Tato kontaminace hraje roli především u motorových olejů.

Kontaminace chladicí kapalinou: Je to opět znečištění objevující se především u motorových olejů. Chladicí kapalina tvoří v oleji nerozpustné usazeniny.

Znečištění mazacího oleje v důsledku oxidačního a degradačního procesu: K tomuto znečištění dochází při oxidaci se vzdušným kyslíkem. Dochází k polymeraci různých látek, které následně tvoří měkké kaly, a ty mohou zalepovat olejový okruh.

Znečištění mechanickými nečistotami: K tomuto znečištění dochází za provozu, a to buď kontaminací částic z vnějšího okolí, nejčastěji prachem anebo přímo uvolňováním jednotlivých komponentů mazacího okruhu, např. železné třísky nebo vlákna filtru.

Nejzákladnější znečištění minerálních olejů je znečištění mechanickými nečistotami, jelikož více než 80 % opotřebení strojů vzniká právě v důsledku mechanických nečistot. [20] Znečištění částic mazacího oleje lze rozdělit na kovové a nekovové. Různé částice mohou mít různou tvrdost a tím se i liší jejich účinky na opotřebení systému a degradaci maziva (tab. 1).

V případě kontaminace železem jsou obvykle zdrojem kontaminace kovové úlomky vycházející ze součástí stroje kvůli častému tření a opotřebení. Hlavní chemickou složkou kovových zbytků je železo, které vytváří vliv na elektrické a magnetické vlastnosti oleje. Tyto vodivé kovové částice vedou ke zhoršení kvality oleje zvýšením jeho permitivity, oslabením izolačních vlastností a také indukci oxidace. [21]

V případě nekovového znečištění pochází zdroj kontaminace hlavně z nerozpustných částic v oleji, které jsou výsledkem oxidace a prachu z vnějšího okolí mechanického systému. Nekovové částice sestávají hlavně z oxidu křemičitého, který má vliv na fyzikální vlastnosti maziva. Vysoká koncentrace nekovových částic zvyšuje viskozitu maziva a může vést ke zvýšení opotřebení a selhání mechanických součástí. [21]

Tabulka 1 Tvrdost jednotlivých částic podle Mohsovy stupnice tvrdosti [22]

Typ částic	Tvrdost na Mohsově stupnici tvrdosti
Otřepy a třísky ze strojů	6 - 9
Podlahový prach	1 - 5
Silniční prach (křemičitý)	2 - 6
Uhelný prach	1,3 - 1,5
Celulóza	0,1 - 1,3
Oxidy mědi	6,4
Nástrojová ocel	7 - 8
Slitiny hliníku	2,5 - 3

4.2 Možnosti stanovení degradace maziva

V této kapitole budou nastíněny základní fyzikálně-chemické vlastnosti maziv, jako je viskozita, viskozitní index, bod tuhnutí, bod vzplanutí, obsah vody, číslo kyselosti atd. Budou popsána také jednotlivá měření těchto hodnot a jejich jednotky.

4.2.1 Viskozita

Parametr, který hraje při mazání zásadní roli, je viskozita oleje. Různé oleje vykazují různé viskozity. Kromě toho se viskozita oleje mění s teplotou, gradientem rychlosti, tlakem a tloušťka vytvořeného olejového filmu je obvykle úměrná této hodnotě. Na první pohled se tedy zdá, že viskóznější oleje by poskytovaly lepší výkon, protože vytvořené filmy by byly silnější a bylo by dosaženo lepší separace obou kontaktních povrchů. To bohužel není vždy pravda, protože viskóznější oleje vyžadují více síly, aby mohly téct. V důsledku toho jsou energetické ztráty vyšší a generuje se více tepla, což má za následek podstatné zvýšení teploty kontaktních povrchů, což může vést k selhání součásti. Pro technické aplikace je viskozita oleje obvykle zvolena tak, aby poskytovala optimální výkon při požadované teplotě. Znalost teploty, při které se očekává provoz oleje, je kritická, protože viskozita oleje je extrémně závislá na teplotě. Viskozita různých olejů se mění při různých rychlostech s teplotou. Může také být ovlivněna rychlostí pracovních ploch. Znalost viskozitních charakteristik maziva je proto velmi důležitá při konstrukci a predikci chování mazaného mechanického systému. [3]

Během doby používání oleje se jeho viskozita může snižovat nebo zvyšovat. Zvyšování viskozity může být způsobeno produkty vznikajícími při oxidaci oleje a následným vytvořením emulze těchto produktů s vodou. Viskozitu snižuje většinou tepelná a mechanická degradace oleje nebo například vniknutí paliva do oleje. [4]

V průběhu let byly vyvinuty různé techniky a přístroje pro měření viskozity. Nejčastěji používané v inženýrských aplikacích jsou kapilární a rotační viskozimetry.

Kapilární viskozimetry jsou založeny na principu, že skrz kapiláru bude protékat specifický objem tekutiny. Čas potřebný k průtoku tohoto objemu tekutiny poskytuje „kinematickou viskozitu“. Průtok kapilárou musí být laminární a výsledky jsou založeny na Poiseuilleově zákonu pro stálý viskózní tok v potrubí. [3] Měření kapilárními viskozimetry probíhá podle normy ČSN 65 6216. Nejčastěji se provádí měření kinematické viskozity pomocí kapilárního viskozimetru typu Ubbelohde. (obr. 12) Výpočet kinematické viskozity se následně provádí podle vzorce 3. [5]

$$v = c \cdot \tau \quad (3)$$

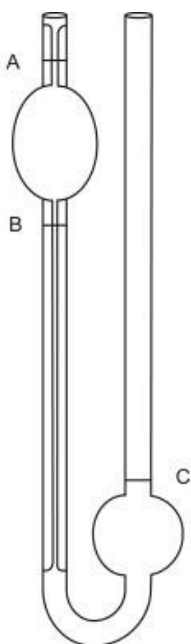
Kde:

v je kinematická viskozita [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$];

c je konstanta viskozimetru [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^2$];

τ je aritmetický průměr doby průtoku viskozimetrem [s].

Obrázek 12 Ubbelohdeho viskozimetr (A – počáteční značka, B – koncová značka, C – plnicí značka) [15]



Rotační viskozimetry jsou založeny na principu, že viskozita tekutiny souvisí se silou potřebnou k vytvoření stříhu mezi dvěma povrchy oddělenými filmem tekutiny. V těchto viskozimetrech je jeden z povrchů stacionární a druhý se otáčí vnějším pohonem a tekutina vyplňuje mezeru mezi nimi. Měření se provádí buď použitím konstantního točivého momentu a změřením změn v rychlosti otáčení, nebo použitím konstantní rychlosti a změřením změn točivého momentu. Tyto viskozimetry vyjadřují *dynamickou viskozitu*. Existují dva hlavní typy těchto viskozimetrů: válcovité a kuželovité. [3]

4.2.1.1 Dynamická viskozita

Jsou-li dány dva ploché povrchy, které odděluje vrstva kapaliny o tloušťce h , je síla potřebná k pohybu vrchního povrchu úměrná smáčené ploše A a rychlosti u . (obr. 13)

Předpokládá se, že vrstva kapaliny oddělující tyto dva povrchy je tvořena nekonečně tenkými vrstvičkami. Porovnávají se tedy dvě vrstvy kapaliny různé tloušťky tvořené stejnorodými vrstvami. Pokud rychlost povrchů zůstane v těchto dvou případech nezměněna, potom širší vrstva podléhá většímu relativnímu tření než tenčí vrstva. Rychlostní gradienty pro tyto dvě vrstvy se budou lišit. Vzhledem k tomu, že širší vrstva obsahuje více jednotlivých vrstev, bude zapotřebí menší síla pro stříh jedné vrstvy, takže se viskózní odpor bude měnit v závislosti na reciproční tloušťce filmu l/h . Různé kapaliny budou vykazovat jinou konstantu úměrnosti η , nazvanou *dynamická viskozita*. Výsledkem je tedy vztah, kde síla potřebná k posunutí jedné vrstvy, je úměrná smáčené ploše, konstantě úměrnosti a podílu u/h . [3]

$$F = A \cdot \eta \cdot u/h \quad (4)$$

Kde:

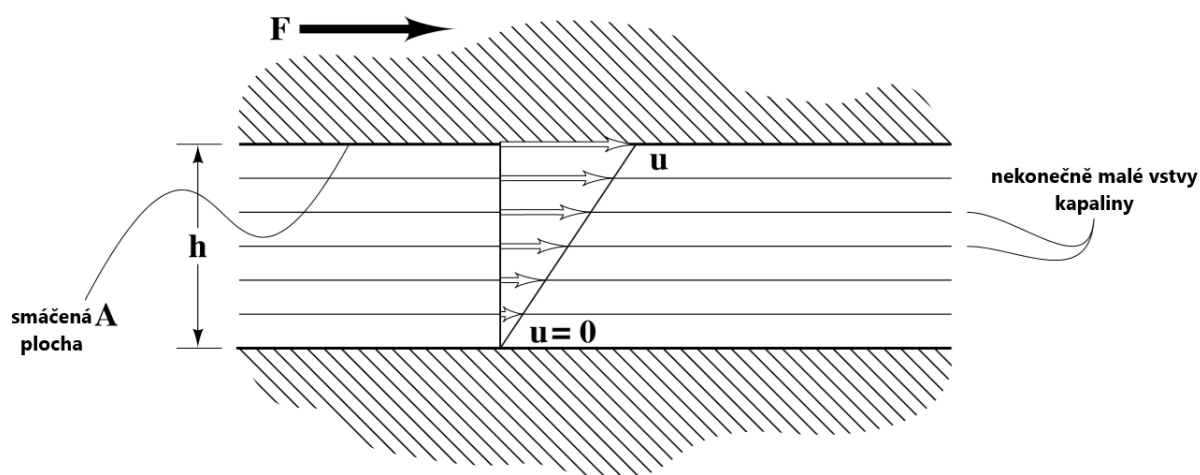
F je síla potřebná k pohnutí horního povrchu [N];

A je smáčená plocha [m];

η je dynamická viskozita [Pa·s];

u/h je smyková rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].

Obrázek 13 Schématické zobrazení kapaliny mezi dvěma povrchy [3]



4.2.1.2 Kinematická viskozita

Kinematická viskozita je definována jako poměr dynamické viskozity k hustotě kapaliny.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (5)$$

Kde:

ν je kinematická viskozita [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$];

η je dynamická viskozita [$\text{Pa} \cdot \text{s}$];

ρ je hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

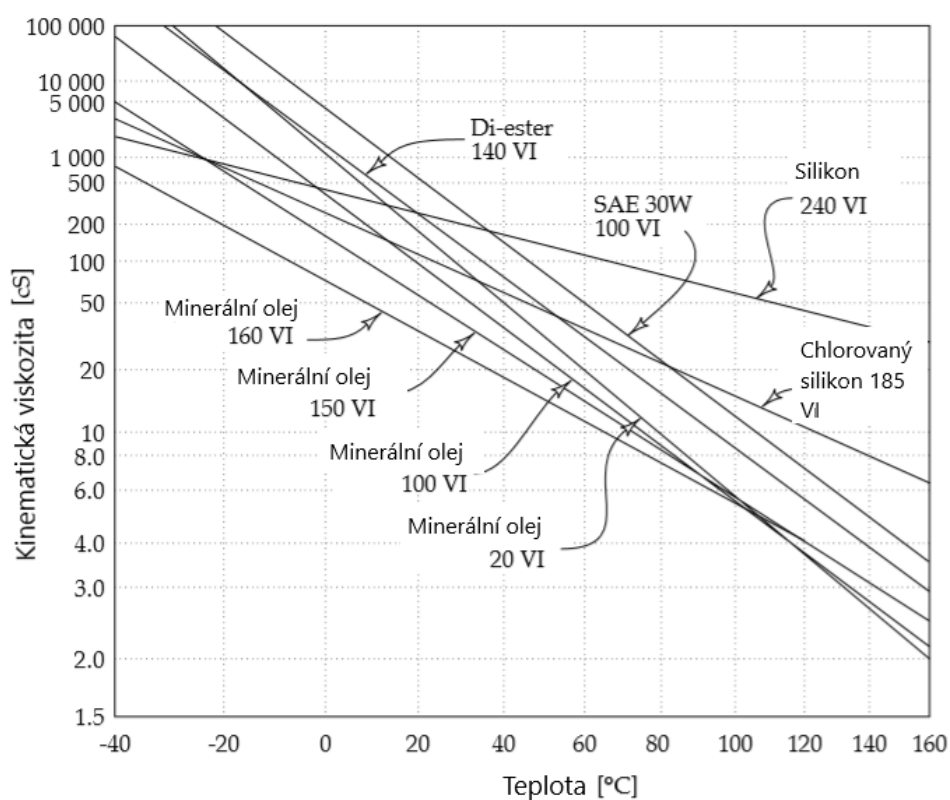
Nejčastěji používanou jednotkou kinematické viskozity je Stoke [S]. Tato jednotka je však pro praktické aplikace často příliš velká, proto se používá menší jednotka, centistoke [cS]. Jednotka SI pro kinematickou viskozitu je [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$], tj.: $1 [S] = 100 [cS] = 0.0001 [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$

Hustoty mazacích olejů jsou obvykle v rozmezí mezi 700 - 1200 [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] (0,7 - 1,2 [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]). Typická hustota minerálního oleje je 850 [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] (0,85 [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]). Pro nalezení dynamické viskozity jakéhokoli oleje v [cP] je viskozita tohoto oleje v [cS] vynásobena jeho hustotou v [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$], tedy pro typický minerální olej: $\text{viskozita v [cP]} = \text{viskozita v [cS]} \times 0,85 [\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$ [3]

4.2.1.3 Vztah mezi viskozitou a teplotou

Viskozita mazacích olejů je velmi citlivá na provozní teplotu. Se zvyšující se teplotou viskozita olejů poměrně rychle klesá. V některých případech může viskozita oleje klesnout asi o 80 % při zvýšení teploty o 25 °C. [3] U plynů naopak dynamická viskozita s narůstající teplotou vzrůstá. [4] Z technického hlediska je důležité znát hodnotu viskozity při provozní teplotě, protože určuje tloušťku mazacího filmu oddělujícího dva povrchy. Viskozita oleje při specifické teplotě může být vypočtena z rovnice nebo může být získána z grafu závislosti viskozity na teplotě. (obr. 14)

Obrázek 14 Graf závislosti kinematické viskozity na teplotě s příklady různých druhů olejů [3]



K dispozici je několik rovnic udávajících závislost viskozity na teplotě, některé z nich jsou čistě empirické, zatímco jiné jsou odvozeny z teoretických modelů. Nejběžněji používané rovnice jsou [23]:

$$\text{Reynoldsova: } \eta = be^{-aT} \quad (6)$$

$$\text{Slotteho: } \eta = \frac{a}{(b+T)^c} \quad (7)$$

$$\text{Waltherova: } (v + a) = bd^{\frac{1}{T^c}} \quad (8)$$

$$\text{Vogelova: } \eta = ae^{\frac{b}{T-c}} \quad (9)$$

Kde:

a, b, c, d jsou konstanty;

T je absolutní teplota [K];

ν je kinematická viskozita [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$];

η je dynamická viskozita [Pa·s].

Mezi nimi nej přesnější je Vogelova rovnice. Aby bylo možné určit tři konstanty v této rovnici, jsou zapotřebí tři měření viskozity při různých teplotách pro konkrétní olej. Viskozita oleje pak může být vypočtena při požadované teplotě nebo provozní teplota může být vypočtena, pokud je známa viskozita.

4.2.1.4 Viskozitní index

Různé oleje mohou mít různé sklony křivek v grafu závislosti viskozity na hustotě, jak je znázorněno na obrázku 6. Již v roce 1920 bylo známo, že ropa v Pensylvánii byla lepší než ropa na pobřeží Mexického zálivu. Surovina v Pensylvánii měla nejlepší teplotní charakteristiky viskozity, zatímco surovina na pobřeží Mexického zálivu měla nejhorší, protože její viskozita kolísala mnohem více s teplotou. Z technického hlediska existovala potřeba parametru, který by přesně popisoval charakteristiky viskozity a teploty olejů. V roce 1929 Dean a Davis vyvinuli „*Viskozitní index*“ [24,25]. Viskozitní index je zcela empirický parametr, který porovnává kinematickou viskozitu sledovaného oleje s viskozitami dvou referenčních olejů, které mají značný rozdíl v citlivosti viskozity na teplotu. Referenční oleje byly vybrány tak, aby jeden z nich měl index viskozity rovný nule ($VI = 0$) a druhý měl index viskozity rovný sto ($VI = 100$ při 37°C), ale oba mají stejnou viskozitu jako olej, který je předmětem sledování, při $210,8^\circ \text{F}$ ($98,89^\circ \text{C}$) (obr. 15). [3]

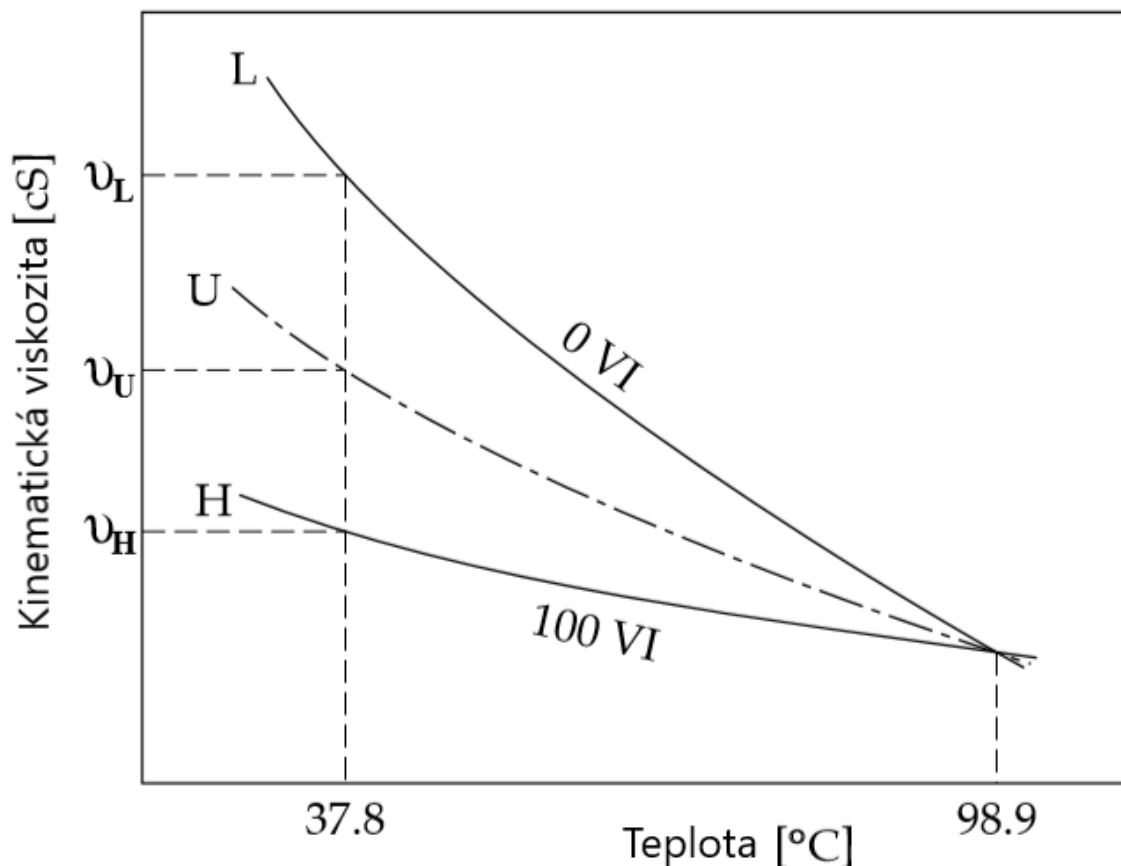
Protože oleje z Pensylvánie a Mexického zálivu mají stejnou viskozitu při $98,9^\circ \text{C}$, byly původně vybrány jako referenční oleje. Olejům vyrobeným z ropy v Pensylvánii byl přidělen viskozitní index 100, zatímco oleje vyrobené z ropy z pobřeží Mexického zálivu viskozitní index 0. Viskozitní index lze spočítat pomocí následující rovnice [3]:

$$VI = \frac{L-U}{L-H} \cdot 100 \quad (10)$$

Nejprve se měří kinematická viskozita sledovaného oleje při 40°C („U“) a při 100°C . Poté z tabulky pro viskozitu sledovaného oleje při teplotě 100°C odečtou odpovídající hodnoty

referenčních olejů „L“ a „H“. Nahrazením získaných hodnot „U“, „L“ a „H“ do výše uvedené rovnice se získá index viskozity. [3]

Obrázek 15 Grafické znázornění výpočtu viskozitního indexu [26]



Z grafu je patrné, že oleje s vyšším viskozitním indexem mají plošší křivku a tím jsou tedy méně náchylné na výkyvy viskozity při změnách teploty.

4.2.1.5 Vztah mezi viskozitou a tlakem

Viskozita maziva se zvyšuje s tlakem (vyjma například vody). Pro většinu maziv je tento účinek podstatně větší než účinek teploty nebo stříhu, když je tlak výrazně nad atmosférickým tlakem. To je zvláště důležité při mazání silně zatížených koncentrovaných kontaktů, které lze nalézt například ve valivých ložiscích a ozubených kolech. Tlaky, s nimiž se tyto kontakty potýkají, mohou být tak vysoké a rychlost zvyšování tlaku tak rychlá, že se mazivo chová spíše jako pevná látka než kapalina. Fenomén zvyšování viskozity s tlakem a možnost selhání maziva spíše lomem než viskózním stříhem je často pozorován, ale ne vždy je rozpoznán. Například, když je asfalt nebo pryskyřice zasažena kladivem, rozbije se, na druhou stranu, pokud je umístěna na nakloněnou rovinu, bude pomalu téct. [3]

Bylo provedeno několik pokusů o vývoj vzorce popisujícího vztah mezi tlakem a viskozitou maziv. Některé byly docela uspokojivé, zejména při nízkých tlacích, zatímco jiné byly poměrně složité a v praxi se nedaly snadno použít. Nejznámější rovnicí pro výpočet viskozity maziva při mírných tlacích (blízkých atmosférickému tlaku) je Barusova rovnice (viz vztah 11) [27,28]. Použití této rovnice na tlaky nad 0,5 GPa však může vést k závažným chybám [29]. Rovnice se stává ještě nespolehlivější, pokud je okolní teplota vysoká.

$$\eta_p = \eta_0 e^{\alpha p} \quad (11)$$

Kde:

η_p je dynamická viskozita za daného tlaku p [Pas];

η_0 je dynamická viskozita za atmosférického tlaku [Pas];

α je koeficient závislosti tlaku na viskozitě [$\text{m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$], který lze získat vynesáním přirozeného logaritmu dynamické viskozity η v závislosti na daném tlaku p . Sklon grafu je koeficient α .

Koeficient závislosti tlaku na viskozitě je funkcí molekulární struktury maziva a jeho fyzikálních charakteristik, jako jsou různé intermolekulární vlastnosti nebo charakteristiky tuhosti, viskozity a teploty.

K dispozici jsou různé vzorce pro výpočet koeficientu závislosti tlaku na viskozitě. Jeden z těch prvních byl odvozen Woosterem (viz vztah 12). [28]

$$\alpha = (0,6 + 0,965 \cdot \log_{10} \cdot \eta_0) \cdot 10^{-8} \quad (12)$$

4.2.2 Hustota a relativní hustota

Hustota maziva je důležitá v technických výpočtech a někdy nabízí jednoduchý způsob identifikace maziv. Hustota nebo relativní hustota se často používají k charakterizování ropy. Poskytují hrubou představu o množství benzínu a petroleje přítomného v surovém stavu. Hustota oleje je však často zaměňována s relativní hustotou.

Hustota neboli měrná hmotnost je hmota daného objemu látky (v našem případě oleje). Naproti tomu relativní hustota je definována jako poměr hmotnosti daného objemu oleje při teplotě t_1 k hmotnosti stejného objemu čisté vody při teplotě t_2 . U ropných produktů se relativní hustota obvykle uvádí při stejné teplotě 60 °F (15,6 °C). [2] V ropném průmyslu se používá jednotka API (American Petroleum Institute), která je odvozena z konvenční relativní hustoty. [26] Hustota typického minerálního oleje se pohybuje okolo $850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a hustota vody se pohybuje okolo $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, tudíž relativní hustota minerálního oleje je zhruba 0,85.

4.2.3 Bod vzplanutí a bod hoření

Bod vzplanutí maziva je teplota, při které se jeho pára vznítí. Aby se stanovil bod vzplanutí, olej se zahřívá při standardním tlaku na teplotu, která je dostatečně vysoká na to, aby se vytvořilo dostatečné množství páry pro vytvoření zápalné směsi se vzduchem.

Bod hoření oleje je teplota, při které se produkuje dostatek páry pro udržení hoření po zapálení. Při této teplotě je rychlost vypařování nejméně tak velká jako rychlost hoření, což zajišťuje trvalý dostatek hořlavých par.

Body vzplanutí a hoření jsou z hlediska bezpečnosti velmi důležité, protože představují jediné faktory, které definují nebezpečí požáru maziva. Obecně se bod vzplanutí a bod hoření olejů zvyšuje se zvyšující se molekulovou hmotností. Pro typický mazací olej je bod vzplanutí asi 210 ° C, zatímco bod hoření je asi 230 ° C. [3] Měření bodu vzplanutí a bodu hoření má největší smysl v motorových olejích, kde snížený bod vzplanutí indikuje vniknutí a množství paliva v oleji. Bod vzplanutí a bod hoření se dají zjišťovat pomocí zkoušek určování *Bodu vzplanutí v uzavřeném kelímku* nebo *Bodu vzplanutí v otevřeném kelímku*. Nejčastěji se používá zkouška bodu vzplanutí v otevřeném kelímku podle Clevelanda podle normy ČSN 65 6212. [4,2]

4.2.4 Oxidační stabilita

Oxidační stabilita je odolnost lubrikantu vůči molekulárnímu rozkladu nebo přesmyku při zvýšených teplotách v běžném ovzduší. Mazací oleje mohou oxidovat, když jsou vystaveny vzduchu, zejména při zvýšených teplotách, což má velmi silný vliv na životnost oleje. Rychlost oxidace závisí na stupni rafinace oleje, teplotě, přítomnosti kovových katalyzátorů a provozních podmínkách a zvyšuje se s teplotou. [33,34]

Oxidace olejů je složitý proces, protože při různých teplotách vznikají různé sloučeniny. Například při asi 150 ° C se produkují organické kyseliny, zatímco při vyšších teplotách se vytvářejí aldehydy. [30] Míra a odolnost proti oxidaci se také liší mezi různými sloučeninami, například parafíny mají největší odolnost proti oxidaci, zatímco asfalteny a nenasycené uhlovodíky mají nejmenší odolnost proti oxidaci. [3]

Jedním ze způsobů, jak zlepšit oxidační stabilitu, je odstranění aromatických uhlovodíků a molekul obsahujících síru, kyslík, dusík atd. Toho je dosaženo rafinací. Rafinovanější olej má lepší oxidační stabilitu. Je také dražší a má horší mezní mazací vlastnosti, takže výběr oleje pro konkrétní aplikaci je vždy kompromisem, v závislosti na typu práce, kterou má olej provádět. Oxidaci lze také řídit přísadami, které napadají hyperoxidy vytvořené v počátečních fázích oxidace nebo narušují mechanismus řetězové reakce zachycením volných radikálů. Produkty oxidace obvykle sestávají z kyselých sloučenin, kalů a laků. Všechny tyto sloučeniny způsobují,

že se olej stává korozivnějším, viskóznějším a také způsobuje nanášení nerozpustných produktů na pracovní povrchy, což omezuje tok oleje v obslužných strojích. To narušuje výkonnost strojního zařízení. Oxidační stabilita je velmi důležitá charakteristika oleje, zejména tam, kde je vyžadována prodloužená životnost, např. Turbíny, transformátory, hydraulické jednotky a jednotky pro přenos tepla atd. Mazivo s omezenou oxidační stabilitou vyžaduje častější údržbu nebo výměnu, což má za následek vyšší provozní náklady. Za přísnějších podmínek může být nutné vyměnit olej častěji, takže provozní náklady budou ještě vyšší. Bylo navrženo mnoho testů pro posouzení oxidačních charakteristik olejů a neexistuje jednoznačný důvod pro výběr konkrétního testu. Některé byly navrženy pro specifické aplikace, například pro posouzení oxidačních charakteristik maziv železničních naftových motorů. Ve většině zkušebních přístrojů je olej ve styku s vybranými katalyzátory a je vystaven vzduchu nebo kyslíku a účinky se měří z hlediska tvorby kyseliny nebo kalu, změny viskozity atd. [35,36]

V těchto zařízeních kyslík prochází vzorkem oleje umístěným v reakční nádobě. Reakční nádoba se skládá z velké zkumavky s menší centrální odnímatelnou přívodní trubicí kyslíku, která nese cívku katalyzátoru z oceli a mědi. Na konci zkumavky je vodou chlazený kondenzátor, který vrací těkavější složky do reakce. Do zkumavky se vloží asi 300 ml oleje a 60 ml destilované vody. Průtok kyslíku je asi 0,5 litr/min a test se provádí při teplotě 95 °C. Během zkoušky se ve zkumavce vytvoří kyselé sloučeniny a neutralizační číslo stanovené na konci testu je měřítkem oxidační stability oleje. Testy se obvykle provádějí po určitou dobu. [3]

4.2.5 Bod tuhnutí a bod zákalu

Bod tuhnutí oleje je nejnižší teplota, při které olej při ochlazení ještě teče (resp. při které přestává téct). Aby se stanovil bod tuhnutí, olej se nejprve zahřeje, aby se zajistilo rozpuštění všech složek a eliminoval se jakýkoli vliv minulého tepelného zpracování. Potom se chladí specifickou rychlostí a při snižování o 3 °C se nádoba nakloní, aby se zkontroloval jakýkoliv pohyb. Jako bod tuhnutí se zaznamenává teplota 3 °C nad bodem, ve kterém se olej zastaví. Tato vlastnost oleje je důležitá při mazání jakéhokoli systému vystaveného nízkým teplotám, jako jsou automobilové motory, stavební stroje, vojenské a kosmické aplikace. Když olej přestane proudit, znamená to, že došlo k dostatečné krystalizaci vosku nebo že olej dosáhl vysoce viskózního stavu. V této fázi se z oleje vysráží vosky nebo parafiny s vysokou molekulovou hmotností. Vosky tvoří blokuující krystalky, které zabraňují tekoucímu zbytku oleje. Toto je kritický bod, protože úspěšný provoz stroje závisí na nepřetržitém přísunu oleje do pohyblivých částí. Viskozita oleje v bodě tuhnutí je obvykle velmi vysoká, tj. několik set Pascal sekund, ale přesná hodnota má malý praktický význam, protože důležitá je minimální teplota, při které může být olej použit. [30]

Bod zákalu je teplota, při které se parafinový vosk a další materiály začnou srážet. Počátek srážení vosku způsobuje zřetelné zakalení nebo zákal viditelný na dně nádoby. Tento výskyt má několik praktických aplikací v kapilárních nebo knotových systémech, ve kterých formující se vosk může bránit toku oleje. Stanovení bodu zákalu je omezeno pouze na čiré tekutiny, protože měření je založeno čistě jen na pozorování. Pokud je bod zákalu oleje pozorován při teplotě vyšší než bod tuhnutí, má olej *bod tuhnutí vosku*. Pokud je bod tuhnutí dosažen bez bodu zákalu, olej ukazuje jednoduchý *bod tuhnutí viskozity*. [3]

Bod tuhnutí a bod zákalu se zkouší podle normy ČSN 65 6072. Vzorek oleje se umístí do zkumavky s danými rozměry a ochlazuje se. Sleduje se teplota i vzhled a tekutost oleje. Bod zákalu se odečte při objevení prvních krystalků u dna a bod tuhnutí se zjistí nakláněním zkumavky do vodorovné polohy. [2]

4.2.6 Obsah vody

Obsah vody je množství vody přítomné v mazivu. Vlhkost a voda znehodnocují kvalitu maziva, jejímu obsahu se dá ale těžko zabránit a často velmi často bývá v mazivu obsažena. Může být vyjádřen v ppm, objemových procentech nebo hmotnostních procentech. Korozivní a oxidační chování maziv je spojeno s obsahem vody. Olej smíchaný s vodou poskytne emulzi. Emulze má mnohem nižší nosnost než čistý olej a může dojít k poruše maziva následované poškozením provozních povrchů. Obecně v aplikacích, jako jsou turbínové olejové systémy, je limit obsahu vody pod 0,2 % a pro hydraulické systémy pod 0,1 %. V dielektrických systémech má nadměrný obsah vody významný vliv na dielektrické poruchy. Obsah vody v takových systémech by měl být obvykle udržován pod 35 ppm. [3] Při nízkém tlaku také bublinky vodní páry expandují a způsobují kavitaci, která vede k poškození kovových částí. [31] Kromě vytváření emulze a korozivních a oxidačních účinků na součásti má voda obsažena v mazivu i další negativní vlivy, a to především [4]:

- pění oleje,
- zvyšování viskozity,
- snižování oxidační stability oleje,
- tvorbu kalů.

Způsobů měření obsahu vody v mazivu je několik. Nejprve se provádí jednoduché měření na zjištění přibližného obsahu vody v oleji. Jednou z takových zkoušek může být jednoduché nalití oleje na rozehřátou kovovou desku. Tímto lze pozorovat podobný efekt, jako když se na špatně utřené pánvi po mytí zahřívá olej na smažení. Pokud je v oleji obsažena voda, ozývá se praskavý

zvuk. Při vyšším obsahu vody, jako třeba na zmíněné pánvi, dochází i k prskání oleje. Tak vysoký obsah vody v oleji pro technické využití by však byl velmi nežádoucí. Dále následuje podrobnější měření.

Nejoblíbenější, i když nejméně přesnou metodou stanovení obsahu vody je odstředivý test. Při této metodě se 50% směs oleje a rozpouštědla odstřeďuje specifickou rychlostí, dokud pozorované objemy vody a sedimentu nejsou stabilní. Kromě vody se také oddělí pevné látky a jiné rozpustné látky, nicméně získané výsledky nekorelují dobře s výsledky získanými jinými metodami. [3]

Destilační metoda je o něco přesnější a zahrnuje destilaci oleje smíchaného s xylenem. Jakákoliv voda přítomná ve vzorku kondenzuje v jímací nádobě. Zkouška je vhodná pro vzorky obsahující více než 0,02 % vody. (ČSN 65 6062) [3,4]

Nejpřesnější metody zjišťování obsahu vody v oleji jsou analýzy Karl Fischera (KF). Jejich nejčastější provedení jsou Volumetrická titrace a Coulometrická titrace. Volumetrická titrace využívá elektromagnetickou titraci a udává koncentraci vody v ppm. Při Coulometrické titraci se při průchodu elektrického proudu uvolňuje na anodě jód. Jeden mol jódu reaguje přesně s jedním molem vody. Po zreagování veškeré vody se změří přebytečný jód. (ČSN 65 6062) [3,4,31]

4.2.7 Stanovení popela

V mazivu je přítomno určité množství nehořlavého materiálu, který lze určit měřením množství popela zbývajících po spalování oleje. Znečišťujícími látkami mohou být opotřebitelné výrobky, pevné produkty rozkladu z paliva nebo maziva, atmosférický prach vstupující přes filtr atd. Některé z těchto kontaminujících látek jsou odstraňovány olejovým filtrem, ale některé se usazují v oleji. Obsah popela se používá jako prostředek ke sledování nežádoucích nečistot a někdy i přísad olejů. V použitých olejích může také indikovat znečišťující látky, jako jsou nečistoty, opotřebené výrobky atd. [3]

Pro stanovení množství kontaminantu se odvážený vzorek oleje spálí ve speciálně navržené nádobě, popřípadě i za působení oxidačních činidel. Zbytek, který zbývá, se poté zpopelnatí ve vysokoteplotní muflové peci a poté se zjistí jeho hmotnost. Výsledek se udává v hmotnostních procentech původního vzorku. Stanovení popela se měří podle ČSN 65 6063. [2,3]

4.2.8 Neutralizační číslo a číslo celkové kyselosti a alkality

Neutralizační číslo maziva udává množství hydroxidu draselného (KOH) v miligramech na gram oleje potřebné k neutralizaci kyselých nebo alkalických sloučenin přítomných v mazivu.

Číslo celkové kyselosti (Total acid number – TAN) se vyjadřuje jako množství hydroxidu draselného v miligramech nezbytné k neutralizaci jednoho gramu oleje. Zkouška se provádí podle normy ČSN 65 6213. Jak číslo celkové kyselosti, tak i číslo celkové alkality se zjišťují potenciometrickou titrací. [2,3]

Číslo celkové alkality (Total base number – TBN) je množství hydroxidu draselného v miligramech nezbytné k neutralizaci kyseliny chlorovodíkové (HCl), které by bylo nutné k odstranění zásaditosti v jednom gramu oleje, a stanovuje se titrační metodou. Zkouška se provádí podle normy ČSN 65 6069. [2,3]

TAN je tedy mírou kyselých látek zbývajících v oleji a TBN je mírou alkalických látek zbývajících v oleji. Obecně se TBN vztahuje pouze na olej dodávaný s alkalickými přísadami k potlačení tvorby kyselin na bázi síry v přítomnosti paliv nízké kvality, jako jsou oleje naftových motorů. TBN je tedy záporným měřítkem kyselosti oleje a měla by být udržována jeho minimální hodnota. Na druhé straně se číslo TAN vztahuje na většinu olejů, protože jsou obvykle slabě kyselé. Během zkoušky se neutralizační roztok přidává, dokud nejsou neutralizovány všechny kyselé nebo alkalické složky. Neutralizační číslo je užitečné při posuzování změn v mazivu, ke kterým dochází během provozu za oxidačních podmínek. Často se používá ve spojení s dalšími parametry, jako je povrchové napětí, při monitorování stavu maziva. Nejlepší výsledky zkoušek jsou dosaženy v systémech, které jsou relativně bez kontaminantů, jako jsou generátory parních turbín, transformátory, hydraulické systémy atd. Lze jej také použít při monitorování stavu olejů používaných v motorech, kompresorech, převodovkách a jako řezných kapalin. Obvykle je stanoveno limitující neutralizační číslo jako kritérium označující, kdy je třeba olej vyměnit nebo regenerovat. [3]

4.2.9 Karbonizační zbytek

Při teplotách 300 °C nebo více a za nepřítomnosti vzduchu se oleje mohou rozkládat za vzniku fragmentů s nízkou molekulovou hmotností, které se obvykle vyskytují v minerálních olejích. Fragmentované uhlovodíkové molekuly se buď rekombinují, a vytváří tak dehtové usazeniny (asfalteny), nebo se uvolňují do atmosféry jako těkavé složky [32]. Usazeniny jsou nežádoucí téměř ve všech případech a většina mazacích olejů je testována na sklon k vytváření usazenin. Karbonizační zbytek se stanoví zvážením zbytku po zahřátí oleje na vysokou teplotu v nepřítomnosti vzduchu. Parametr karbonizačního zbytku hraje v případě syntetických olejů

malou roli díky jejich dobré tepelné stabilitě. Rovněž se občas používá při charakterizaci vysoce rafinovaných maziv. [3]

V praxi je se možné setkat například s Conradsonovým karbonizačním zbytkem (CCT), který se zjišťuje podle normy ČSN 65 6210. Zkouška probíhá zahříváním 10g vzorku v předepsaném přístroji pomocí Méckerova kahanu. Prvních 10 minut se vzorek zahřívá a dalších 7 minut se vzorek žihá. Jeho hodnota se vyjadřuje v hmotnostních procentech (viz vztah 13). [2,4]

$$x = \frac{A_1}{A_2} \cdot 100 \quad (13)$$

Kde:

x je vlastní CCT zkoušeného vzorku [%]

A_1 je hmotnost CCT [g]

A_2 je navážka vzorku [g]

5. Praktická ukázka vybraných vzorků

Pro analýzu k praktické ukázce byly využity vzorky z firmy Benteler ČR s.r.o., konkrétně ze závodu v Chrastavě. Jsou zde vyráběny kovové součásti do aut, typicky nápravy, nápravnice, centrální trubky, moduly a protinárázové výztuhy karosérií, a to pomocí technologií jako jsou například lisování za tepla, hydroformování, ohýbání, laserování nebo robotické svařování.

Prvním provozem je lisovna, kde jsou nainstalovány 3 víceúčelové linky pro tváření za tepla. Zařízení se skládá z pece k předehřátí čistých plechových přístřihů na předepsanou teplotu (880 – 930 °C). V dalším kroku jsou v univerzálním lise pomocí příslušného nástroje z předehřátých přístřihů vylisovány za tepla požadované tvarové profily.

K praktické ukázce byly použity vzorky hydraulického oleje právě z těchto tvářecích lisů. Vzorky byly odebrány z hydraulických lisů Hydrap 800 s maximální pracovní silou 8000 kN a pracovním tlakem 250 bar a Hydrap 1000 s maximální pracovní silou 10 000 kN a pracovním tlakem 260 bar. Zdrojem tlakové energie pro hlavní lisovací válec jsou axiální pístová čerpadla s dálkovou regulací dodávaného množství a výkonu. Zdrojem tlakové energie pro pomocné funkce je axiální pístové čerpadlo s regulací dodávaného množství a tlaku. Všechna čerpadla jsou poháněna elektromotorem. Spojení elektromotorů a čerpadel je provedeno pomocí držáku čerpadla a pružné zubové spojky. Na víčkách nádrže jsou umístěny hydraulické rozvodné bloky s hydraulickými prvky. Hlavní rozvodný blok je určen pro ovládání pohybu hlavního lisovacího válce, další rozvodné bloky jsou určeny pro ovládání pomocných funkcí. Propojení mezi bloky a čerpadly je provedeno tlakovými hadicemi a tlakovým potrubím. Lamelové čerpadlo

poháněné elektromotorem tvoří spolu s dvojitým tlakovým filtrem a vodním chladičem samostatný okruh filtrace a chlazení. Odpadní kapalina se vrací od hydraulického válce do nádrže přes svařované potrubí. Hlavní a plnicí nádrž je propojená potrubím, ve kterém je zabudován kompenzátor. Kontrola kvality pracovní kapaliny by se u obou lisů měla provádět po 500 hodinách provozu. Minimální požadovaná třída čistoty pracovního oleje podle normy NAS 1638 je 9 a podle ISO/DIS 4406 je požadovaná třída čistoty 18/14.

Jako pracovní kapalina je v lisech použit hydraulický olej Renolin VG 46 od firmy Fuchs. Fyzikálně-chemické vlastnosti čistého oleje jsou uvedeny v tabulce 2. Jedná se o hydraulický olej třídy HLP a oběhový olej třídy CLP. Hydraulické oleje třídy HLP nacházejí hlavní uplatnění v hydraulických zařízeních s hydrostatickým pohonem, v nichž se vyskytuje vysoké tepelné zatížení, kde je třeba očekávat přítomnost vody a koroze a kde čerpadla nebo hydrostatické motory, vzhledem ke konstrukci nebo pracovním podmínkám, vyžadují oleje s přísadami snižujícími opotřebení v podmínkách smíšeného tření. Tyto oleje tedy musí mít vysokou oxidační stabilitu, vysokou únosnost při přenášení zatížení, schopnost antikorozivní ochrany, nízkou pěnovost a schopnost odlučování vzduchu, deemuľgační schopnosti a zvýšenou třídu čistoty.

Tabulka 2 Fyzikálně-chemické vlastnosti oleje Renolin VG 46

Vlastnosti	Jednotka	Údaje			Zkouška dle
Viskozitní třída	-	VG 32	VG 46	VG 68	-
Typ hydraulického oleje	-	HLP 32	HLP 46	HLP 68	DIN 51 524, č.2
Typ oběhového oleje	-	CLP 32	CLP 46	CLP 68	DIN 51 517, č.3
Kinematická viskozita při					
0 °C	mm ² /s	350	600	950	DIN 51 550
40 °C	mm ² /s	33	47	67	DIN 51 562
50 °C	mm ² /s	22	32	42	nebo
100 °C	mm ² /s	5,6	7,1	8,6	DIN 51 015
Viskozitní index	-	100	100	100	DIN ISO 2909
Hustota při 15 °C	kg/m ³	880	880	882	DIN 51 757
Bod vzplanutí dle Clevelanda	°C	190	190	190	DIN ISO 2592
Bod tuhnutí	°C	-27	-27	-24	DIN ISO 3016
Číslo kyselosti	mg KOH/g	1	1	1	DIN 51 558, č.1
Číslo zmýdelnění	mg KOH/g	1,2	1,2	1,2	DIN 51 559, č.2
Obsah sulfátového popela	% (hmot.)	0,2	0,2	0,2	DIN 51 575
Obsah vody	% (hmot.)	množstevně nelze prokázat			DIN ISO 3733
Obsah nerozpustných látek	% (hmot.)	množstevně nelze prokázat			DIN 51 592
Deemuľgační vlastnosti	min.	<40	<40	<40	DIN 51 599
Odlučivost vzduchu při 50 °C	min.	6	7	8	DIN 51 381
Odolnost proti pění	ihned	30/10/30			DIN 51 566
	po 10 min.	0			řada zk. I-III
Korozní účinky na mědi	stupeň kor.	1-100 A24			DIN 51 759
Korozní účinky na oceli	stupeň kor.	0-A			DIN 585
Mechanická zkouška na FZG převodovce	zatěžovací stupeň	12 (typová zkouška)			DIN 51 354, část 1
Zkouška na křídlovém čerpadle - úbytek hmoty lopatek a kroužku po 250 h	mg	<150			DIN 51 389
Chování vůči těsnicímu materiálu SRE-NBR 1*) dle DIN 53 538, část 1 při teplotě 100 ±1 °C, po 7 dnech ± 2 h					
Relativní změna objemu	%	5	5	5	DIN 53 505
Změna tvrdosti v jednotkách Shore-A	Shore	-1	-1	-1	-

*) SRE-NBR 1 se vyrábí jen pro zkušební účely a tímto způsobem zjištěné hodnoty změny objemů jsou charakteristiky, které slouží pro výběr těsnění, které má být v praxi užito, viz katalog výrobců těsnění.

Olej se v lisech čistí každé 3 měsíce. V lisu Hydrap 800 trvá čištění 26 dní a v lisu Hydrap 1000 trvá čištění 39 dní (viz tab. 3). Hydraulický olej je čištěn přístrojem značky Kleentek ELC-R 50SP. Kleentek je přístroj na elektrostatické čištění nevodivých kapalin. Když olej protéká elektrickým polem, speciálně tvarované nevodivé kolektory – sběrače, které jsou umístěny mezi elektrodami s vysokým napětím (cca 10 kV), zachycují veškeré částice obsažené v oleji bez rozdílu, zda jsou kovové či nekovové, vodivé či nevodivé, organické či anorganické, včetně kapének vody do 500 ppm. Obsah nádrže s olejem musí několikrát protéct přístrojem Kleentek. Pokud by se do oleje dostala voda, použije se dehydrátor Kleentek DH-1B. Princip spočívá v několikerém průchodu oleje přes sušící vložku. Vložka je schopna pohltnout 4 litry vody. [38]

Tabulka 3 Časový harmonogram nasazení čističů Kleentek v jednotlivých strojních zařízeních

Nasazení Kleenteků při čištění hydraulických systémů strojů.					
stroj	dnů	od - do	od - do	od - do	od - do
Hydrap 1000 T	39	17.6. - 26.7.	7.9. - 16.10.	4.1. - 11.2.	27.3. - 4.5.
Hydrap 800 T	26	24.6. - 20.7.	9.9. - 5.10.	4.1. - 1.2.	23.3. - 17.4.
VP 250	9	20.7. - 29.7.	5.10. - 14.10.	1.2. - 10.2.	17.4. - 26.4.
Ohýbací linka PQ-24-2	17	26.7. - 12.8.	19.10. - 5.11.	11.2. - 29.2.	4.5. - 21.5.
Ohýbací linka PQ-24-3	17	12.8. - 29.8.	5.11. - 22.11.	29.2. - 18.3.	21.5. - 6.6.
CNC 80 60 M	2	29.7. - 31.7.	14.10. - 16.10.	10.2. - 12.2.	26.4. - 28.4.
DSP 1500	31	31.7. - 31.8.	19.10. - 23.11.	12.2. - 14.3.	28.4. - 26.5.
Cyab 400 P	9	29.8. - 7.9.	22.11. - 1.12.	18.3. - 27.3.	6.6. - 15.6.
Cyab 400 L	9	31.8. - 9.9.	23.11. - 2.12.	14.3. - 23.3.	26.5. - 4.6.

Vzorek oleje z lisu Hydrap 1000 před čištěním byl odebrán 7.9.2019 a vzorek po čištění byl odebrán 16.10.2019. Vzorek oleje z lisu Hydrap 800 před čištěním byl odebrán 10.9.2019 a vzorek po čištění byl odebrán 7.10.2019.

5.1 Měření hustoty a viskozity

Měření hustoty a viskozity bylo provedeno pomocí rotačního Stabingerova viskozimetru SVM 3000 firmy Anton Paar v tribologické laboratoři Technické fakulty ČZU v Praze. Tento viskozimetr měří hustotu a viskozitu podle ASTM D7042. Princip tohoto rotačního viskozimetru je založen na měření točivého momentu a rychlosti. Rotující magnet v SVM 3000

vytváří pole vířivých proudů s přesným brzdícím momentem závislým na rychlosti. Odchylka točivého momentu je 50 pNm. Velmi malá měřicí buňka obsahuje trubici, která se otáčí konstantní rychlostí. Tato zkumavka se naplní vzorkem. Ve vzorku pluje měřicí rotor se zabudovaným magnetem – tím se zabrání tření v ložiskách. Nízká hustota rotoru umožňuje, aby byl vystředěn odstředivou silou. Krátce po zahájení měření dosáhne rotor stabilní rychlosti. To je určeno rovnováhou mezi brzdícím účinkem vířivých proudů a střižnými silami při práci ve vzorku. Dynamická viskozita se počítá z rychlosti rotoru. [4]

Bylo provedeno měření hustoty a viskozity oleje z lisu Hydrap 800 před a po čištění při teplotě 40 °C (tab. 4 a 5). Pro stejný lis bylo provedeno měření hustoty a viskozity i při 100 °C (tab. 6 a 7). Pro každý údaj byla provedena 3 měření pro větší přesnost, tzn. bylo provedeno celkem 12 měření pro tento lis.

Tabulka 4 Naměřené hodnoty hustoty, dynamické a kinematické viskozity při 40 °C na lisu Hydrap 800 před čištěním

Hydrap 800; před čištěním; 40 °C	η [MPa·s]	ν [mm ² ·s ⁻¹]	ρ [g·cm ⁻³]
1. měření	40,552	46,911	0,8644
2. měření	40,526	46,879	0,8645
3. měření	40,778	46,778	0,8644
průměrná hodnota	40,619	46,856	0,8644
směrodatná odchylka	0,11316458	0,05668039	0,0000471

Tabulka 5 Naměřené hodnoty hustoty, dynamické a kinematické viskozity při 40 °C na lisu Hydrap 800 po čištění

Hydrap 800; po čištění; 40 °C	η [MPa·s]	ν [mm ² ·s ⁻¹]	ρ [g·cm ⁻³]
1. měření	40,551	46,914	0,8644
2. měření	40,533	46,893	0,8644
3. měření	40,544	46,906	0,8644
průměrná hodnota	40,543	46,904	0,8644
směrodatná odchylka	0,007408704	0,008653837	0

Tabulka 6 Naměřené hodnoty hustoty, dynamické a kinematické viskozity při 100 °C na lisu Hydrap 800 před čištěním

Hydrap 800; před čištěním; 100 °C	η [MPa·s]	ν [mm ² ·s ⁻¹]	ρ [g·cm ⁻³]
1. měření	5,6355	6,8135	0,8271
2. měření	5,6341	6,8166	0,8265
3. měření	5,6328	6,8182	0,8262
průměrná hodnota	5,634	6,816	0,8266
směrodatná odchylka	0,001102522	0,001951068	0,0003742

Tabulka 7 Naměřené hodnoty hustoty, dynamické a kinematické viskozity při 100 °C na lisu Hydrap 800 po čištění

Hydrap 800; po čištění; 100 °C	η [MPa·s]	ν [mm ² ·s ⁻¹]	ρ [g·cm ⁻³]
1. měření	5,6341	6,8157	0,8266
2. měření	5,6314	6,8131	0,8266
3. měření	5,6388	6,8189	0,8269
průměrná hodnota	5,635	6,816	0,8267
směrodatná odchylka	0,003057595	0,00237206	0,0001414

Z naměřených hodnot pro hydraulický olej z lisu Hydrap 800 je zřejmé, že dynamická ani kinematická viskozita se během čištění téměř nezměnily, to stejné platí i o hustotě.

Stejné měření bylo provedeno i pro druhý lis Hydrap 1000. Hustota a viskozita byla měřena před a po čištění při 40 °C (tab. 8 a 9) a také při teplotě 100 °C (tab. 10 a 11). Opět byla pro přesnost provedena 3 měření pro každou hodnotu, celkem tedy 12 měření.

Tabulka 8 Naměřené hodnoty hustoty, dynamické a kinematické viskozity při 40 °C na lisu Hydrap 1000 před čištěním

Hydrap 1000; před čištěním; 40 °C	η [MPa·s]	ν [mm ² ·s ⁻¹]	ρ [g·cm ⁻³]
1. měření	39,993	46,245	0,8648
2. měření	40,052	46,306	0,8649
3. měření	40,06	46,318	0,8649
průměrná hodnota	40,035	46,29	0,8649
směrodatná odchylka	0,029877528	0,031961783	0,0000471

Tabulka 9 Naměřené hodnoty hustoty, dynamické a kinematické viskozity při 40 °C na lisu Hydrap 1000 po čištění

Hydrap 1000; po čištění; 40 °C	η [MPa·s]	ν [mm ² ·s ⁻¹]	ρ [g·cm ⁻³]
1. měření	40,109	46,382	0,8648
2. měření	40,116	46,388	0,8648
3. měření	40,12	46,735	0,8658
průměrná hodnota	40,115	46,502	0,8651
směrodatná odchylka	0,004546061	0,165009764	0,0004714

Tabulka 10 Naměřené hodnoty hustoty, dynamické a kinematické viskozity při 100 °C na lisu Hydrap 1000 před čištěním

Hydrap 1000; před čištěním; 100 °C	η [MPa·s]	ν [mm ² ·s ⁻¹]	ρ [g·cm ⁻³]
1. měření	5,613	6,7908	0,8266
2. měření	5,5919	6,7658	0,8265
3. měření	5,5303	6,6928	0,8263
průměrná hodnota	5,578	6,75	0,8265
směrodatná odchylka	0,035085705	0,041577237	0,0001247

Tabulka 11 Naměřené hodnoty hustoty, dynamické a kinematické viskozity při 100 °C na lisu Hydrap 1000 po čištění

Hydrap 1000; po čištění; 100 °C	η [MPa·s]	ν [mm ² ·s ⁻¹]	ρ [g·cm ⁻³]
1. měření	5,5955	6,77	0,8265
2. měření	5,5934	6,7696	0,8263
3. měření	5,4712	6,6222	0,8262
průměrná hodnota	5,553	6,721	0,8263
směrodatná odchylka	0,058106932	0,069579499	0,0001247

Po měření bylo zjištěno, že ani u druhého lisu se výrazně nezměnila po čištění jeho viskozita, ani hustota. Hodnoty kinematické viskozity při 40 °C a 100 °C odpovídají přibližně hodnotám stanoveným výrobcem.

5.2 Stanovení viskozitního indexu

Viskozitní index byl stanoven podle postupu uvedeném v kapitole 4.1.4 a dosazen do vztahu 10. Kinematická viskozita pro 100 °C je určena jako průměrná hodnota kinematické viskozity při 100 °C po čištění z obou lisů. Hodnoty L a H jsou odečteny z tabulky 12. Hodnota U je průměrná hodnota kinematické viskozity při 40 °C po čištění z obou lisů.

$$v_{100} = 6,769 \approx 6,8$$

$$U = 46,703 \approx 46,7$$

Tabulka 12 Hodnoty L a H pro výpočet viskozitního indexu podle normy ASTM D 2270 [39]

v_{100}	L	H	v_{100}	L	H	v_{100}	L	H	v_{100}	L	H	v_{100}	L	H
2.00	7.994	6.394	8.30	106.9	63.05	14.6	283.0	143.9	21.8	575.6	261.5	41.0	1810	676.6
2.10	8.640	6.894	8.40	109.2	64.18	14.7	286.4	145.3	22.0	585.2	264.9	41.5	1851	689.1
2.20	9.309	7.410	8.50	111.5	65.32	14.8	289.7	146.8	22.2	595.0	268.6	42.0	1892	701.9
2.30	10.00	7.944	8.60	113.9	66.48	14.9	293.0	148.2	22.4	604.3	272.3	42.5	1935	714.9
2.40	10.71	8.496	8.70	116.2	67.64	15.0	296.5	149.7	22.6	614.2	275.8	43.0	1978	728.2
2.50	11.45	9.063	8.80	118.5	68.79	15.1	300.0	151.2	22.8	624.1	279.6	43.5	2021	741.3
2.60	12.21	9.647	8.90	120.9	69.94	15.2	303.4	152.6	23.0	633.6	283.3	44.0	2064	754.4
2.70	13.00	10.25	9.00	123.3	71.10	15.3	306.9	154.1	23.2	643.4	286.8	44.5	2108	767.6
2.80	13.80	10.87	9.10	125.7	72.27	15.4	310.3	155.6	23.4	653.8	290.5	45.0	2152	780.9
2.90	14.63	11.50	9.20	128.0	73.42	15.5	313.9	157.0	23.6	663.3	294.4	45.5	2197	794.5
3.00	15.49	12.15	9.30	130.4	74.57	15.6	317.5	158.6	23.8	673.7	297.9	46.0	2243	808.2
3.10	16.36	12.82	9.40	132.8	75.73	15.7	321.1	160.1	24.0	683.9	301.8	46.5	2288	821.9
3.20	17.26	13.51	9.50	135.3	76.91	15.8	324.6	161.6	24.2	694.5	305.6	47.0	2333	835.5
3.30	18.18	14.21	9.60	137.7	78.08	15.9	328.3	163.1	24.4	704.2	309.4	47.5	2380	849.2
3.40	19.12	14.93	9.70	140.1	79.27	16.0	331.9	164.6	24.6	714.9	313.0	48.0	2426	863.0
3.50	20.09	15.66	9.80	142.7	80.46	16.1	335.5	166.1	24.8	725.7	317.0	48.5	2473	876.9
3.60	21.08	16.42	9.90	145.2	81.67	16.2	339.2	167.7	25.0	736.5	320.9	49.0	2521	890.9
3.70	22.09	17.19	10.0	147.7	82.87	16.3	342.9	169.2	25.2	747.2	324.9	49.5	2570	905.3
3.80	23.13	17.97	10.1	150.3	84.08	16.4	346.6	170.7	25.4	758.2	328.8	50.0	2618	919.6
3.90	24.19	18.77	10.2	152.9	85.30	16.5	350.3	172.3	25.6	769.3	332.7	50.5	2667	933.6
4.00	25.32	19.56	10.3	155.4	86.51	16.6	354.1	173.8	25.8	779.7	336.7	51.0	2717	948.2
4.10	26.50	20.37	10.4	158.0	87.72	16.7	358.0	175.4	26.0	790.4	340.5	51.5	2767	962.9
4.20	27.75	21.21	10.5	160.6	88.95	16.8	361.7	177.0	26.2	801.6	344.4	52.0	2817	977.5
4.30	29.07	22.05	10.6	163.2	90.19	16.9	365.6	178.6	26.4	812.8	348.4	52.5	2867	992.1
4.40	30.48	22.92	10.7	165.8	91.40	17.0	369.4	180.2	26.6	824.1	352.3	53.0	2918	1007
4.50	31.96	23.81	10.8	168.5	92.65	17.1	373.3	181.7	26.8	835.5	356.4	53.5	2969	1021
4.60	33.52	24.71	10.9	171.2	93.92	17.2	377.1	183.3	27.0	847.0	360.5	54.0	3020	1036
4.70	35.13	25.63	11.0	173.9	95.19	17.3	381.0	184.9	27.2	857.5	364.6	54.5	3073	1051
4.80	36.79	26.57	11.1	176.6	96.45	17.4	384.9	186.5	27.4	869.0	368.3	55.0	3126	1066
4.90	38.50	27.53	11.2	179.4	97.71	17.5	388.9	188.1	27.6	880.6	372.3	55.5	3180	1082
5.00	40.23	28.49	11.3	182.1	98.97	17.6	392.7	189.7	27.8	892.3	376.4	56.0	3233	1097
5.10	41.99	29.46	11.4	184.9	100.2	17.7	396.7	191.3	28.0	904.1	380.6	56.5	3286	1112
5.20	43.76	30.43	11.5	187.6	101.5	17.8	400.7	192.9	28.2	915.8	384.6	57.0	3340	1127
5.30	45.53	31.40	11.6	190.4	102.8	17.9	404.6	194.6	28.4	927.6	388.8	57.5	3396	1143
5.40	47.31	32.37	11.7	193.3	104.1	18.0	408.6	196.2	28.6	938.6	393.0	58.0	3452	1159
5.50	49.09	33.34	11.8	196.2	105.4	18.1	412.6	197.8	28.8	951.2	396.6	58.5	3507	1175
5.60	50.87	34.32	11.9	199.0	106.7	18.2	416.7	199.4	23.0	963.4	401.1	59.0	3563	1190
5.70	52.64	35.29	12.0	201.9	108.0	18.3	420.7	201.0	29.2	975.4	405.3	59.5	3619	1206
5.80	54.42	36.26	12.1	204.8	109.4	18.4	424.9	202.6	29.4	987.1	409.5	60.0	3676	1222
5.90	56.20	37.23	12.2	207.8	110.7	18.5	429.0	204.3	29.6	998.9	413.5	60.5	3734	1238
6.00	57.97	38.19	12.3	210.7	112.0	18.6	433.2	205.9	29.8	1011	417.6	61.0	3792	1254
6.10	59.74	39.17	12.4	213.6	113.3	18.7	437.3	207.6	30.0	1023	421.7	61.5	3850	1270
6.20	61.52	40.15	12.5	216.6	114.7	18.8	441.5	209.3	30.5	1055	432.4	62.0	3908	1286
6.30	63.32	41.13	12.6	219.6	116.0	18.9	445.7	211.0	31.0	1086	443.2	62.5	3966	1303
6.40	65.18	42.14	12.7	222.6	117.4	19.0	449.9	212.7	31.5	1119	454.0	63.0	4026	1319
6.50	67.12	43.18	12.8	225.7	118.7	19.1	454.2	214.4	32.0	1151	464.9	63.5	4087	1336
6.60	69.16	44.24	12.9	228.8	120.1	19.2	458.4	216.1	32.5	1184	475.9	64.0	4147	1352
6.70	71.29	45.33	13.0	231.9	121.5	19.3	462.7	217.7	33.0	1217	487.0	64.5	4207	1369
6.80	73.48	46.44	13.1	235.0	122.9	19.4	467.0	219.4	33.5	1251	498.1	65.0	4268	1386
6.90	75.72	47.51	13.2	238.1	124.2	19.5	471.3	221.1	34.0	1286	509.6	65.5	4329	1402
7.00	78.00	48.57	13.3	241.2	125.6	19.6	475.7	222.8	34.5	1321	521.1	66.0	4392	1419
7.10	80.25	49.61	13.4	244.3	127.0	19.7	479.7	224.5	35.0	1356	532.5	66.5	4455	1436
7.20	82.39	50.69	13.5	247.4	128.4	19.8	483.9	226.2	35.5	1391	544.0	67.0	4517	1454
7.30	84.53	51.78	13.6	250.6	129.8	19.9	488.6	227.7	36.0	1427	555.6	67.5	4580	1471
7.40	86.66	52.88	13.7	253.8	131.2	20.0	493.2	229.5	36.5	1464	567.1	68.0	4645	1488
7.50	88.85	53.98	13.8	257.0	132.6	20.2	501.5	233.0	37.0	1501	579.3	68.5	4709	1506
7.60	91.04	55.09	13.9	260.1	134.0	20.4	510.8	236.4	37.5	1538	591.3	69.0	4773	1523
7.70	93.20	56.20	14.0	263.3	135.4	20.6	519.9	240.1	38.0	1575	603.1	69.5	4839	1541
7.80	95.43	57.31	14.1	266.6	136.8	20.8	528.8	243.5	38.5	1613	615.0	70.0	4905	1558
7.90	97.72	58.45	14.2	269.8	138.2	21.0	538.4	247.1	39.0	1651	627.1			
8.00	100.0	59.60	14.3	273.0	139.6	21.2	547.5	250.7	39.5	1691	639.2			
8.10	102.3	60.74	14.4	276.3	141.0	21.4	556.7	254.2	40.0	1730	651.8			
8.20	104.6	61.89	14.5	279.6	142.4	21.6	566.4	257.8	40.5	1770	664.2			

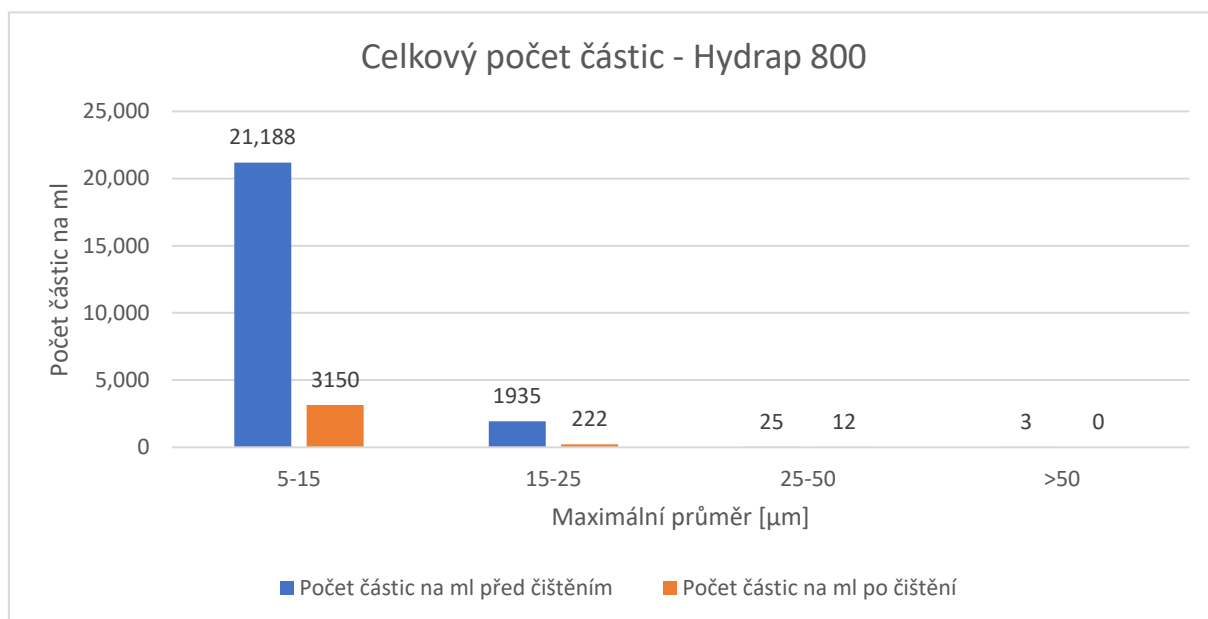
$$VI = \frac{L - U}{L - H} \cdot 100 = \frac{73,48 - 46,7}{73,48 - 46,44} \cdot 100 = 99,04$$

Viskozitní index uvedený výrobcem je 100, u oleje z lisu se podařilo naměřit VI = 99. Odchylka od původní hodnoty viskozitního indexu může být dána drobnou změnou fyzikálně-chemických vlastností oleje. Spíše ale bude způsobena nepřesností měření a použitím jiných měřících metod a jiných norem.

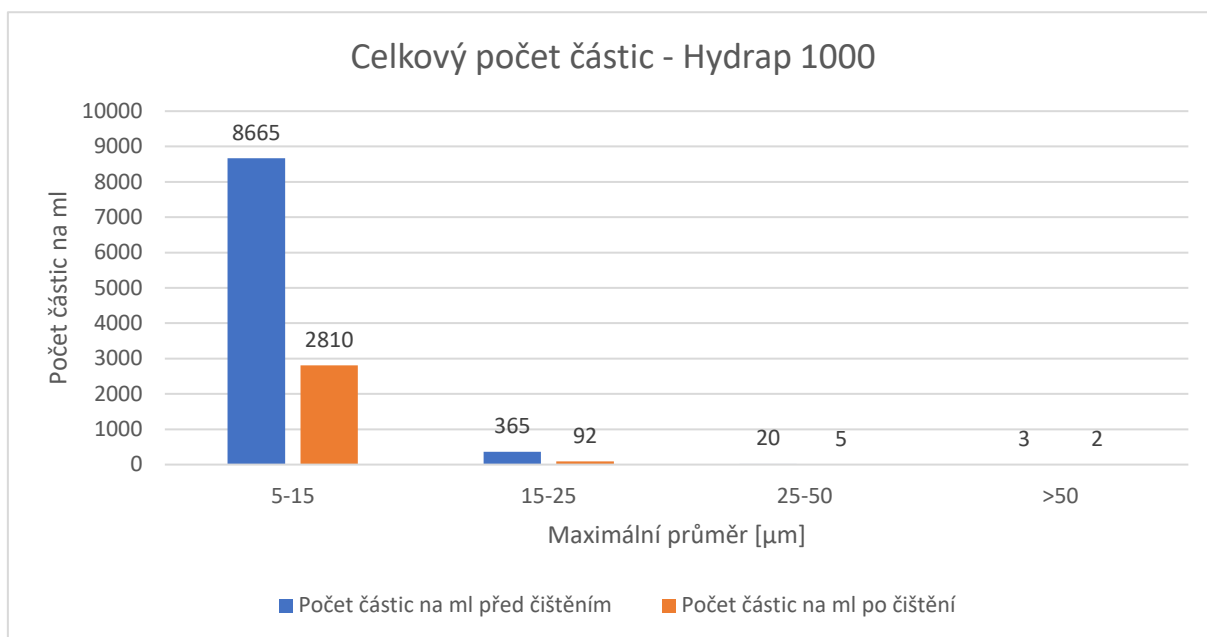
5.3 Celkové znečištění

Celkové znečištění bylo změřeno pomocí přístroje LaserNet Fines-C v laboratoři tribotechniky Technické fakulty ČZU. LaserNet Fines-C (LNF-C) používá laserové zobrazovací techniky a pokročilý software pro zpracování obrazu k identifikaci typu, množství a závažnosti mechanických poruch měřením rozmístění velikostí, rychlosti vývoje a tvarových vlastností úlomků v mazivu. Kombinuje standardní techniky analýzy oleje spočívající v počítání částic a třídění tvarů do jednoho analytického nástroje. Měření bylo provedeno pro všechny 4 vzorky. Na prvním grafu vidíme rozdíl v počtu částic různých průměrů před a po provedení čištění pro lis Hydrap 800 (obr. 16), na druhém grafu je znázorněno totéž měření i pro lis Hydrap 1000 (obr. 17).

Obrázek 16 Graf celkového znečištění lisu Hydrap 800



Obrázek 17 Graf celkového znečištění lisu Hydrap 1000



Na první pohled je z grafů zřejmé, že počet znečišťujících částic po čištění přístrojem Kleentek značně klesl. U lisu Hydrap 800 o více než 85 % a u lisu Hydrap 1000 téměř o 70 %, čištění elektrostatickým odlučovačem je tedy velmi účinné. Poněkud překvapující bylo zjištění, že u lisu Hydrap 800 bylo znečištění částicemi o průměru 5-15 μm více než dvojnásobné a znečištění částicemi o průměru 15-25 μm dokonce více než pětinasobné. Znečištění většími částicemi bylo u obou lisů přibližně stejné.

5.4 Kód čistoty (NAS 1638)

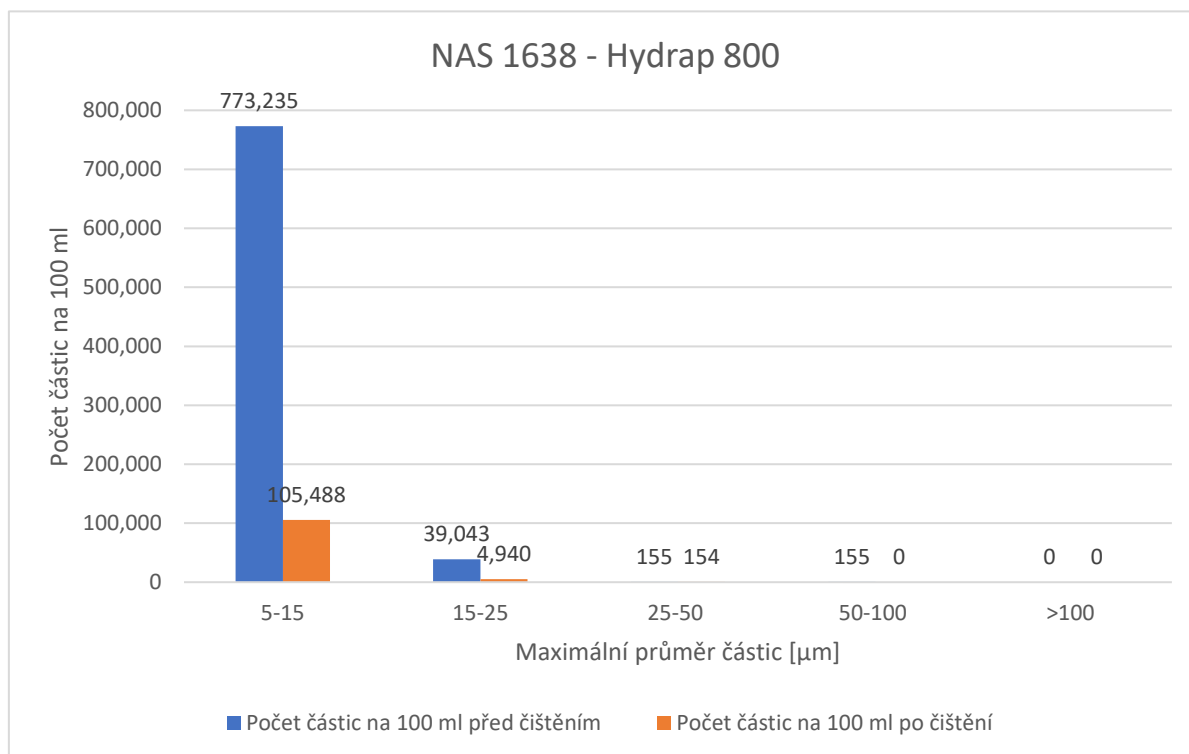
Pro měření kódu čistoty byla zvolena norma NAS 1638. V technické dokumentaci lisu byl uveden i kód čistoty podle normy ISO/DIS 4406, nicméně přístroj LNF-C v tribotechnické laboratoři měří pouze normu ISO 4406:1999. Měření tedy bylo provedeno podle normy NAS 1638, která se shoduje. V průvodní dokumentaci pro lis Hydrap 800 a Hydrap 1000 byla podle této normy stanovena výrobcem doporučená třída čistoty oleje 9. Norma NAS 1638 pro čistotu byla vyvinuta pro letecké a kosmické komponenty v USA a je stále široce používána pro aplikace v průmyslových a leteckých kapalinových pohonech. V ČR je tato norma stále hojně používána, a to i mimo letecký a vojenský průmysl. [40] NAS systém dělí částice do 5 pásem velikosti částic, které podle jejich počtu ve 100 ml měřeného oleje rozděluje do 12 tříd čistoty (viz tab. 13). Měření kódu čistoty podle NAS 1638 bylo provedeno na přístroji LNF-C v laboratoři tribotechniky Technické fakulty ČZU v Praze. První měření porovnává rozdíl v kódu čistoty oleje VG 46 před a po čištěním u lisu Hydrap 800 (obr. 18). Druhé měření

porovnává kód čistoty před a po čištění u druhého lisu Hydrap 1000 (obr. 19). Kódy čistoty jsou následně přiřazeny podle počtu znečišťujících částic podle NAS 1638 (viz tab. 14 a 15).

Tabulka 13 Dělení tříd čistoty podle NAS 1638 [34]

Třída	Max. počet částic/100 ml ve specifikovaném rozsahu velikostí (μm)				
	5 - 15	15 - 25	25 - 50	50 - 100	>100
00	125	22	4	1	0
0	250	44	8	2	0
1	500	89	16	3	1
2	1000	178	32	6	1
3	2000	256	63	11	2
4	4000	712	126	22	4
5	8000	1425	253	45	8
6	16000	2850	506	90	16
7	32000	5700	1012	180	32
8	64000	11400	2025	360	64
9	128000	22800	4050	720	128
10	256000	45600	8100	1440	256
11	512000	91200	16200	2880	512
12	1024000	182400	32400	5760	1024

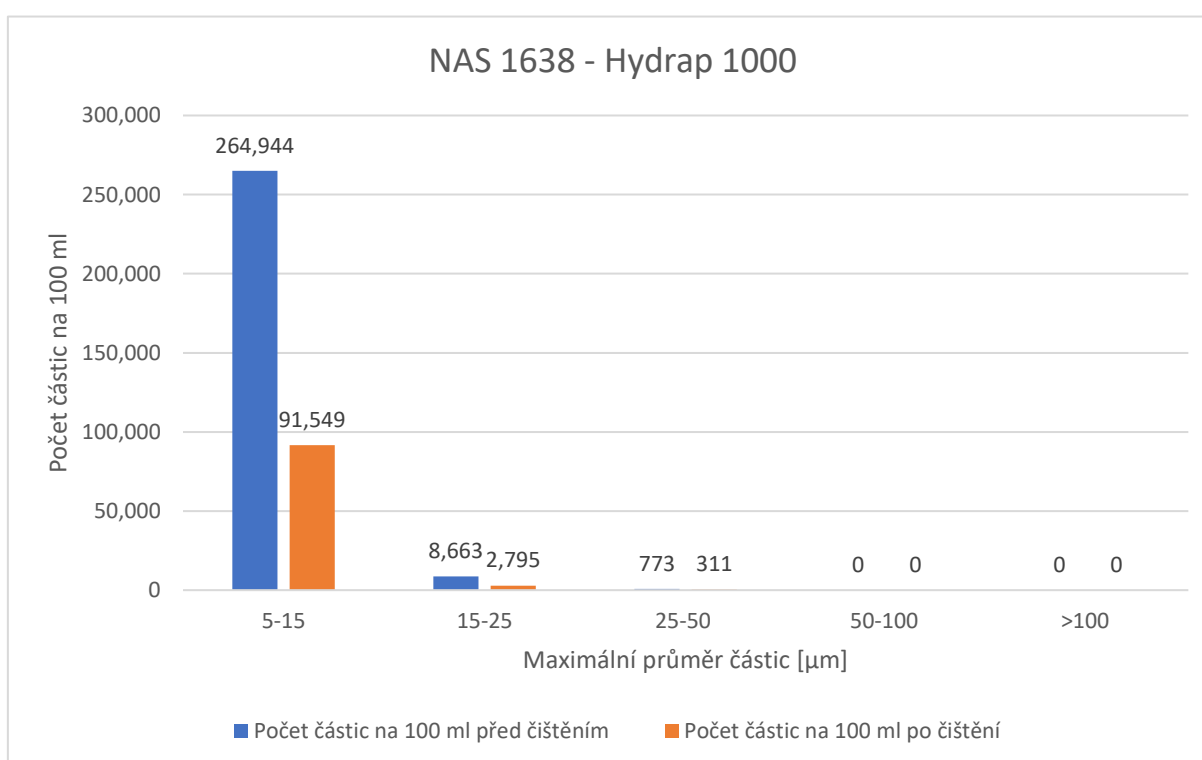
Obrázek 18 Graf kódu čistoty podle NAS 1638 – lis Hydrap 800



Tabulka 14 Kód čistoty podle NAS 1638 – lis Hydrap 800

Lis Hydrap 800				
Maximální průměr částic [μm]	Počet částic na 100 ml před čištěním	Třída čistoty	Počet částic na 100 ml po čištění	Třída čistoty
5-15	773 235	12	105 488	9
15-25	39 043	10	4 940	7
25-50	155	5	154	5
50-100	155	7	0	00
>100	0	00	0	00

Obrázek 19 Graf kódu čistoty podle NAS 1638 – lis Hydrap 1000



Tabulka 15 Kód čistoty dle NAS 1638 – lis Hydrap 1000

Lis Hydrap 1000				
Maximální průměr částic [μm]	Počet částic na 100 ml před čištěním	Třída čistoty	Počet částic na 100 ml po čištění	Třída čistoty
5-15	264 944	11	91 549	9
15-25	8 663	8	2 795	6
25-50	773	7	311	6
50-100	0	00	0	00
>100	0	00	0	00

Měřením kódu čistoty podle NAS 1638 se potvrdilo, co bylo patrné již z předchozího měření celkového znečištění, a to že olej v lisu Hydrap 800 byl před čištěním mnohem více znečištěn, třída čistoty u něho byla 12, kdežto u druhého lisu měl olej před čištěním třídu čistoty 11. Po čištění bylo však u obou olejů dosaženo požadovaného kódu čistoty podle NAS 1638 - a to třídy 9. Čištění se tedy opět ukázalo jako validní a správně nastavené.

6. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo popsat a nadefinovat základní pojmy v tribologii a přiblížit různé druhy praktických zkoušek. Vzhledem k rozsahu práce nebylo možné popsat veškeré druhy zkoušek a veškeré tribologické pojmy. Snahou bylo vybrat nejdůležitější body z tribologie a tribodiagnostiky a stručně je popsat a následně je uvést na praktickém příkladu.

Důležitost tribodiagnostiky byla předvedena na praktické ukázce, ve které byly měřeny vzorky hydraulického oleje z tvářecích lisů firmy Benteler ČR s.r.o. I zde by bylo možné provést podrobnější měření několika faktorů a více vzorků, ale opět snahou bylo stručně předvést nejdůležitější faktory ovlivňující kvalitu hydraulického oleje, které laboratoř tribotechniky umožnila změřit.

Při měření hustoty, kinematické a dynamické viskozity bylo zjištěno, že jejich hodnoty se při 40 °C ani při 100 °C zásadně nemění. Jelikož se pracovní teplota obou lisů pohybuje od 25 °C do 55 °C, nejvíce vypovídající hodnotu mělo měření při 40 °C. Hustota ani viskozita se při této teplotě ani u jednoho lisu před a po čištění prakticky nezměnila. Viskozitní index vyšel již trochu rozdílně od tabulkové hodnoty 100, avšak nikoliv zásadně. Rozdíl mohl být způsobený spíše nepřesným měřením a použitím jiných norem pro měření viskozity než zásadním rozdílem ve viskozitní kvalitě oleje.

Měření, které přineslo zajímavější výsledky, bylo měření celkového znečištění pomocí LNF-C. Zde již byl rozdíl v kvalitě oleje odebraného těsně před provedením čištění a oleje odebraného ihned po skončení čištění velmi patrný. Bohužel i zde by pro lepší představu vývoje znečištění bylo lepší více vzorků v různých časech. Byly vybrány dva mezní stavy a to na začátku čištění a po skončení čištění. Tyto vzorky alespoň pomohly přiblížit význam čištění oleje jako údržby strojního zařízení a také tribodiagnostiky, díky které je možné přesně stanovit aktuální stav oleje a posoudit jeho vliv na strojní zařízení. Čištění se v tomto případě ukázalo jako velmi účinné, počet částic v oleji při něm několikanásobně klesl. Zajímavé bylo také zjištění, že lis Hydrap 800 byl znečištěn mnohem více než lis Hydrap 1000. Jedním z důvodů by mohl být fakt, že lis Hydrap 800 byl v provozu od předchozího čištění do data odebrání vzorku o 9 dní déle než lis Hydrap 1000. Příčina tohoto jevu může být i úplně jiné povahy a k její nalezení by bylo zapotřebí znát důkladněji tento provoz a provést hlubší analýzu, nicméně i toto měření je dobrým příkladem významu tribodiagnostiky, jako nástroje pro zjištění stavu strojního zařízení skrze stav maziva.

Posledním měřením bylo měření kódu čistoty podle normy NAS 1638. Asi nejpoužívanější normou pro kód čistoty stále zůstává ISO 4406, nicméně tuto normu LNF-C měřil jen pro ISO 4406:1999, kdežto požadovaný kód čistoty byl uveden v technické dokumentaci lisu pro novější normu ISO/DIS 4406. Měření nám jen potvrdilo výsledky z minulého měření celkového

znečištění, a to že lis Hydrap 800 byl znečištěn mnohem více a před čištěním měl vyšší třídu čistoty než olej z druhého lisu. Nicméně po čištění oba tyto lisy dosahovaly potřebné třídy čistoty 9.

Praktická ukázka vzorků sloužila jen jako krátký příklad použití tribodiagnostiky v praxi. Zajímavější analýzu degradace maziva by přineslo dlouhodobé sledování kvality oleje, pro které není v bakalářské práci tolik prostoru. Takové měření provádí většina větších firem, mezi něž patří i Benteler ČR s.r.o., kde probíhá odběr vzorků a jejich následné měření na obsah vody a kód čistoty 15. den v měsíci. Pravidelná diagnostika strojních maziv dokáže ušetřit obrovské náklady na nákladnou výměnu opotřebovaných strojních součástí. Při dlouhodobém sledování maziva lze také správně nastavit pravidelnou údržbu, spočívající ať už v čištění nebo výměně oleje a nastavit tak plán údržby (viz tab. 2). Na pracovníkovi údržby by mělo být pak samotné sestavení tribotechnické diagnostiky. Například pro hydraulické oleje by zkouška bodu vzplanutí neměla takový význam jako pro oleje motorové, kde dochází k infiltraci paliva a bod vzplanutí se tak může měnit. Tribodiagnostika je významná bezdemontážní diagnostika třecích dvojic strojních zařízení a neměla by chybět jako nástroj údržby v žádné firmě zaměřující se na výrobu a používající množství drahých strojních zařízení.

7. Seznam použitých zdrojů

- [1] VOWLES, Hugh P. Early Evolution of Power Engineering. *ISIS: A Journal of a History of Science Society* [online]. 1932, **17**(2), 412-420 [cit. 2020-02-29]. Dostupné z: <https://www.journals.uchicago.edu/doi/abs/10.1086/346662>
- [2] SEJKOROVÁ, M. Metody tribotechnické diagnostiky. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Univerzita Pardubice, 2013, 10 s. ISBN 978-80-248-3280-7.
- [3] STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. *Engineering tribology*. Boston: Butterworth-Heinemann, 2001., 1-2, 468 s. ISBN 9780750673044.
- [4] HELEBRANT, František, Jiří ZIEGLER a Daniela MARASOVÁ. *Technická diagnostika a spolehlivost: Tribodiagnostika* Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2000. ISBN 8070788836.
- [5] HELEBRANT, F. – HRABEC, L.- BLATA, J. *Provoz, diagnostika a údržba strojů : Tribologie, základní pojmy* Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013, ISBN 978-80-248-3028-5.
- [6] BLAU, P. *Tribosystem analysis*. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2016, 1 s.,
- [7] JOYNER, Helen, C.W. PERNELL a Christopher DAUBERT. Impact of Oil-in-Water Emulsion Composition and Preparation Method on Emulsion Physical Properties and Friction Behaviors. *Tribology Letters* [online]. 2014, 143-160 [cit. 2019-10-30]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/271951862_Impact_of_Oil-in-Water_Emulsion_Composition_and_Preparation_Method_on_Emulsion_Physical_Properties_and_Friction_Behaviors
- [8] PERSSON, Bo N. J. *Sliding Friction: physical principles and applications* /. 2nd ed. Berlin: Springer, 2000., 5 s. ISBN 3-540-67192-7.
- [9] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Valivý odpor. In: *Encyklopedie fyziky* [online]. WebArchiv.cz, 2006 [cit. 2020-11-01]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/37-valivy-odpor>
- [10] Základy oboru. *Tribotechnika* [online]. Praha: Česká strojnická společnost [cit. 2020-11-05]. Dostupné z: www.tribotechnika.cz/index.php/zaklady-oboru

- [11] RESCHETOW, D.: *Erhöhung der Tragkraft und der Lebensdauer von Maschinenteilen. Fertigungstechnik und Betrieb*, 22, 1972, 6.
- [12] BREUDEL, Horst. *Tribotechnika*. Přeložil Emil ŠAFR. Praha: SNTL, 1984.
- [13] SUHIR, E. Analytical bathtub curve with application to electron device reliability. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* [online]. 2015, **26**(9), 6633-6638 [cit. 2020-02-25]. DOI: 10.1007/s10854-015-3263-1. ISSN 09574522.
- [14] STAUFFER, R.D. a THOMPSON, J.L. *Improved Bench Oxidation Tests for Railroad Diesel Engine Lubricants*. Lubrication Engineering, 1988, s. 416-423.
- [15] KULKARNI, Vitthal S. a Charles SHAW. Kapitola 9 - Rheological Studies. *Essential Chemistry for Formulators of Semisolid and Liquid Dosages* [online]. Academic Press, 2016, s. 145-182 [cit. 2020-02-05]. ISBN 9780128010242. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128010242000091>
- [16] SHARP, R.B. *Plant Silica: An Abrasive Constituent of Plant Matter*. J. Agricultural Engineering Research, 1962, s. 214-220.
- [17] EBRARY (FIRMA), -- GRESHAM, R M. -- TOTTEN, G E. -- SOCIETY OF TRIBOLOGISTS AND LUBRICATION ENGINEERS. Kapitola 4 - Contamination Control and Failure Analysis. *Lubrication and maintenance of industrial machinery [elektronický zdroj] : best practices and reliability*. Boca Raton: CRC Press, 2008, 23 s. ISBN 1420089358.
- [18] RENGSTORFF, G.W., MYOSHI, K., a BUCKLEY, D.H. *Interaction of Sulfuric Acid Corrosion and Mechanical Wear of Iron*. ASLE Transactions, 1986, 43-51 s.
- [19] RŮŽIČKA, Pavel. Znehodnocení mazacích olejů vlivem kontaminace, typy nečistot. *Tribotechnika* [online]. TechPark, o.z., 2008 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12015/znehodnoceni-mazacich-oleju-vlivem-kontaminace-ty-py-necistot.html>
- [20] MOON, M. Lubricant Contaminants Limit Gear Life. *Gear Solutions Magazine*. 2009, (6), 26-33.
- [21] ZHU, Junda, David HE a Jae M. YOON. *Online Particle Contaminated Lubrication Oil Condition Monitoring and Remaining Useful Life Prediction for Wind Turbines* [online]. Chicago, 2014 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z:

https://www.researchgate.net/profile/Eric_Bechhoefer/publication/261222792_Online_particle-contaminated_lubrication_oil_condition_monitoring_and_remaining_useful_life_prediction_for_wind_turbines_Particle_contamination_models/links/5ad88c58458515c60f591861/Online-particle-contaminated-lubrication-oil-condition-monitoring-and-remaining-useful-life-prediction-for-wind-turbines-Particle-contamination-models.pdf. University of Illinois at Chicago.

- [22] FITCH, Jim. Particle Contamination - 10 Important Things You Should Know. *Practicing Oil Analysis* [online]. Noria, 2005, **7**(9) [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://www.machinerylubrication.com/Read/781/particle-contamination>
- [23] CROUCH, R.F. a CAMERON, A. *Viscosity-Temperature Equations for Lubricants*. Journal of the Institute of Petroleum. 1961, s. 307-313.
- [24] DEAN, E.W. a DAVIS, G.H.B. *Viscosity Variations of Oils With Temperature*. Chem. and Met. Eng, 1929, s. 618-619.
- [25] DAVIS, G.H.B., LAPEVROUSE, G.M. a DEAN, E.W. *Applying Viscosity Index to Solution of Lubricating Problems*. Journal of Oil and Gas, 1932, s. 92-93.
- [26] O'CONNOR, J.J., BOYD, J., a AVALLON, E.A. *Standard Handbook of Lubrication Engineering*. McGraw-Hill Book Company, 1968.
- [27] BARUS, C. *Isotherms, Isopiestic and Isometrics Relative to Viscosity*. American Journal of Science, 1893, s. 87-96.
- [28] CAMERON, A. *Basic Lubrication Theory*, Ellis Horwood Limited, 1981.
- [29] SARGENT JR., L.B., *Pressure-Viscosity Coefficients of Liquid Lubricants*. ASLE Transactions, 1983, s. 110.
- [30] ZUIDEMA, H.H. *The Performance of Lubricating Oils*, New York: Reinhold Publ, 1952, s. 26-28.
- [31] Voda v oleji. *Tribotechnika* [online]. TechPark, o.z., 2008 [cit. 2020-02-01]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22011/voda.html>
- [32] FOWLE, T.I. *Lubricants for Fluid Film and Hertzian Contact Conditions*. Proc. Inst. Mech. Engrs, 1967-1968, s. 508-584.

- [33] KLAUS, E.E., UGWUZOR, D.I., NAIDU, S.K. a DUDA, J.L. *Lubricant-Metal Interaction Under Conditions Simulating Automotive Bearing Lubrication*, Proc. JSLE International Tribology Conf., 1985, Tokyo: Elsevier, s. 859-864
- [34] COLCLOUGH, T. *Role of Additives and Transition Metals in Lubricating Oil Oxidation*. Ind. Eng. Chem. Res., 1987, s. 1888-1895
- [35] SMITH, A.N. *Turbine Lubricant Oxidation: Testing, Experience and Prediction*. Miami: ASTM Technical Publication 916, 1983.
- [36] SWAIN, M.V. *Microscopic Observations of Abrasive Wear of Polycrystalline Alumina*. Wear, 1975, s. 185-189.
- [37] STRAKA, B. *Motorové oleje a tribotechnická diagnostika naftových motorů*. Praha: Nadas, 1986.
- [38] ELC / Elektrostatické čištění olejů. *KLEENTEK* [online]. Praha: KLEENTEK, spol. s r.o., 2019 [cit. 2020-02-20]. Dostupné z: <https://www.kleentek.cz/elc-elektrostaticke-cisten-oleju/>
- [39] *ASTM D2270: Standard Practice for Calculating Viscosity Index from Kinematic Viscosity at 40 °C and 100 °C*. 10. USA: ASTM International, 2016. Dostupné také z: <http://ppapco.ir/wp-content/uploads/2019/07/ASTM-D2270-2016.pdf>
- [40] NOVÁČEK, Vladimír. Sledování znečištění průmyslových olejů. *Tribotechnika* [online]. TechPark, o.z., 2008 [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22009/sledovani-znecisten-primyslovych-oleju.html>

8. Seznam obrázků

Obrázek 1 Stabingerův viskozimetr Anton Paar SVM 3000 v laboratoři tribotechniky Technické fakulty ČZU v Praze.....	2
Obrázek 2 Schéma tribologického systému [4].....	5
Obrázek 3 Stribeckova křivka; a – oblast suchého tření, b – oblast smíšeného tření, c – oblast hydrodynamického tření [7].....	6
Obrázek 4 Kluzné tření [8].....	7
Obrázek 5 Rameno valivého odporu [9]	8
Obrázek 6 Jedno z možných provedení Vanové křivky [13].....	10
Obrázek 7 Mechanismus adheze [3]	11
Obrázek 8 Mechanismus abrazivního opotřebení mikro-řezáním [16]	12
Obrázek 9 Mechanismus erozivního opotřebení [16].....	13
Obrázek 10 Mechanismus kavitace [3]	14
Obrázek 11 Mechanismus únavového opotřebení [17].....	14
Obrázek 12 Ubbdelohdeho viskozimetr (A – počáteční značka, B – koncová značka, C – plnicí značka) [15]	19
Obrázek 13 Schématické zobrazení kapaliny mezi dvěma povrchy [3]	21
Obrázek 14 Graf závislosti kinematické viskozity na teplotě s příklady různých druhů olejů [3]	22
Obrázek 15 Grafické znázornění výpočtu viskozitního indexu [26]	24
Obrázek 16 Graf celkového znečištění lisu Hydrap 800	38
Obrázek 17 Graf celkového znečištění lisu Hydrap 1000	39
Obrázek 18 Graf kódu čistoty podle NAS 1638 – lis Hydrap 800	40
Obrázek 19 Graf kódu čistoty podle NAS 1638 – lis Hydrap 1000	41

9. Seznam tabulek

Tabulka 1 Tvrdost jednotlivých částic podle Mohsovy stupnice tvrdosti [22]	18
Tabulka 2 Časový harmonogram nasazení čističů Kleentek v jednotlivých strojních zařízeních	33
Tabulka 3 Fyzikálně-chemické vlastnosti oleje Renolin VG 46	32
Tabulka 4 Naměřené hodnoty hustoty, dynamické a kinematické viskozity při 40 °C na lisu Hydrap 800 před čištěním.....	34
Tabulka 5 Naměřené hodnoty hustoty, dynamické a kinematické viskozity při 40 °C na lisu Hydrap 800 po čištění	34
Tabulka 6 Naměřené hodnoty hustoty, dynamické a kinematické viskozity při 100 °C na lisu Hydrap 800 před čištěním.....	35
Tabulka 7 Naměřené hodnoty hustoty, dynamické a kinematické viskozity při 100 °C na lisu Hydrap 800 po čištění	35
Tabulka 8 Naměřené hodnoty hustoty, dynamické a kinematické viskozity při 40 °C na lisu Hydrap 1000 před čištěním.....	35
Tabulka 9 Naměřené hodnoty hustoty, dynamické a kinematické viskozity při 40 °C na lisu Hydrap 1000 po čištění	36
Tabulka 10 Naměřené hodnoty hustoty, dynamické a kinematické viskozity při 100 °C na lisu Hydrap 1000 před čištěním.....	36
Tabulka 11 Naměřené hodnoty hustoty, dynamické a kinematické viskozity při 100 °C na lisu Hydrap 1000 po čištění	36
Tabulka 12 Hodnoty L a H pro výpočet viskozitního indexu podle normy ASTM D 2270 [39].....	37
Tabulka 13 Dělení tříd čistoty podle NAS 1638 [34]	40
Tabulka 14 Kód čistoty podle NAS 1638 – lis Hydrap 800.....	41
Tabulka 15 Kód čistoty dle NAS 1638 – lis Hydrap 1000	41