

**UNIVERZITA PARDUBICE  
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA  
KATEDRA DOPRAVNÍCH PROSTŘEDKŮ**

**ANALÝZA OPOTŘEBENÍ OLEJŮ  
A JIMI MAZANÝCH SOUČÁSTÍ**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**2007**

**Michal Soukenka**

**UNIVERZITA PARDUBICE  
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA  
KATEDRA DOPRAVNÍCH PROSTŘEDKŮ**

**ANALÝZA OPOTŘEBENÍ OLEJŮ  
A JIMI MAZANÝCH SOUČÁSTÍ**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**AUTOR PRÁCE: Michal Soukenka**

**VEDOUCÍ PRÁCE: doc. RNDr. Jaroslava Machalíková, CSc.**

**2007**



**UNIVERSITY OF PARDUBICE  
TRANSPORT FACULTY JAN PERNER  
DEPARTMENT OF TRANSPORT MEANS**

**ANALYSIS OF THE USED OILS AND  
THEM LUBRICATED COMPONENTS**

**THESIS**

**AUTHOR: Michal Soukenka**

**SUPERVISOR: doc. RNDr. Jaroslava Machalíková, CSc.**

**2007**



Univerzita  
Pardubice  
Dopravní fakulta  
Jana Pernera

Fakulta / Vysokoškolský ústav: **Dopravní fakulta Jana Pernera**  
Katedra / Ústav : **Katedra dopravních prostředků**  
Akademický rok : **2006/2007**

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Pro: **Michal Soukenka**

Studijní program: **DOPRAVNÍ INŽENÝRSTVÍ A SPOJE**

Studijní obor: **DOPRAVNÍ PROSTŘEDKY – SILNIČNÍ VOZIDLA**

Název tématu: **Analýza opotřebení olejů a jimi mazaných součástí**

Zásady pro zpracování – osnova :

Na základě vypracovaného rešeršního přehledu analyzujte současný stav poznatků o možnostech sledování procesu opotřebení vybraných součástí vozidel příp. dalších mechanismů a olejů, jimiž jsou tyto součásti mazány.

Zabezpečte odběr vzorků a připravte zkušební vzorky pro analýzy. Seznamte se s principy a metodikou použitých experimentálních metod. Proveďte příslušné laboratorní zkoušky.

Výsledky experimentálních prací vyhodnoťte a interpretujte, závěry zpracujte ve formě doporučení pro uživatele v praxi.

Vypracovat:

1. Přehled současného stavu poznatků se zaměřením na monitorování procesu opotřebení olejů a vybraných mechanismů jimi mazaných
2. Program laboratorních zkoušek v laboratořích Univerzitního ekologického centra
3. Přehled experimentálních výsledků a jejich vyhodnocení.
4. Doporučení pro aplikaci výsledků v praxi.

Seznam odborné literatury:

1. MACEK, J.; SUK, B. *Spalovací motory I*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN: 80-01-02085-1.
2. Firemní materiály BRUKER G.m.b.H., návod k obsluze přístroje Vector 22.
3. Firemní materiály ReoTrade, s. r. o, návod k obsluze ferrografu REO 1.
4. BEČKA, J. *Tribologie*. Praha: ČVUT, 1997. ISBN 80-01-01621-8.
5. *Tribotechnika* [online].[cit. 1. března 2006]. Dostupné na WWW: <<http://www.tribotechnika.cz>>.
6. *WEARCHECK. Literature* [online].[cit. 1. března 2006]. Dostupné na WWW: <<http://www.wearcheck.ca/literature/documents.asp?DocType=techdoc>>.
7. *Practicing Oil Analysis*. [online].[cit. 1. března 2006]. Dostupné na WWW: <<http://www.practicingoilanalysis.com/>>.
8. *Degradace strojních součástí* [online].[cit. 11. září 2006]. Dostupné na WWW: <[http://degradace.tf.czu.cz/Dgrd\\_txt/Mngr\\_ram\\_txt2.htm](http://degradace.tf.czu.cz/Dgrd_txt/Mngr_ram_txt2.htm)>.
9. ROYLANCE, B. J. *Ferrography – then and now*, Tribology International, Volume 38, Issue 10, October 2005, Pages 857-862.
10. MACIÁN, V., PAYRI, R., TERMOS, B., MONTORO, L. *Applying analytical ferrography as a technique to detect failures in Diesel engine fuel injection systéme*, Wear, 2006.

Rozsah: 40 – 60 stran textu

Vedoucí práce: **Doc. RNDr. Jaroslava Machalíková, CSc.**  
**Katedra jakosti, provozní spolehlivosti a diagnostiky v dopravě,**

**DFJP**

Datum zadání práce: **15. 03. 2007**

Termín odevzdání práce: **25. 05. 2007**

Prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.  
děkan

Doc. Ing. Miroslav Tesař, CSc.  
vedoucí katedry

**Prohlašuji:**

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 13. 5. 2007

Michal Soukenka

**Abstrakt:**

Diplomová práce je věnována možnostem využití moderních instrumentálních metod (infračervené spektrometrie s Fourierovou transformací a analytické ferrografie) v tribotechnické diagnostice silničních vozidel, zejména v oblasti sledování opotřebení olejů a jimi mazaných součástí. Hodnocení technického stavu sledovaných mechanických soustav je doplněno analýzou olejových filtrů. Pro studium morfologie částic vyseparovaných z olejových filtrů byla použita rastrovací elektronová mikroskopie.

Počet stran: 96, počet obrázků: 119, počet tabulek: 18.

**Abstract:**

The thesis work is devoted to the possibility of using modern instrumental methods (infrared spectrometry with Fourier transformation and analytical ferrography) in tribotechnical diagnostics of road vehicles, especially in the area of monitoring the wear of operational matters and components lubricated by them. The evaluation of the technical condition of monitored mechanical systems is supported with an analysis of oil filters. Scanning electron microscopy was used for studying the morphology of particles separated out from oil filters.

Number of pages: 96, number of pictures: 119, number of tables: 18.

## Poděkování:

Zejména bych chtěl poděkovat svým rodičům a blízkým za podporu při studiu na VŠ.

Dále bych chtěl poděkovat paní doc. RNDr. Jaroslavě Machalíkové, CSc. za poskytnutí odborné pomoci a cenných rad při zpracování této diplomové práce; Filipu Krtičkovi a Lukáši Jehličkovi za kolegiální a pomoc při měření a konzultacích spojených s touto prací; panu Jiřímu Svobodovi ze společnosti Holcim (Česko) a.s., pracovníkům společností Autoservis Hybeš a Karex a.s. za spolupráci při zařizování odběru vzorků a poskytnuté informace ke sledovaným vozidlům; panu Ladislavu Horálkovi se společnosti VD Cyklos Choltice za pomoc s realizací otvácího přípravu.

OBSAH	
<b>1. Úvod</b>	<b>9</b>
<b>2. Teoretická část</b>	<b>10</b>
2.1 Tribotechnika	10
2.2 Optimalizace výměnného intervalu olejů	10
2.2.1 Všeobecné zásady určení výměnných intervalů	10
2.2.2 Optimalizace výměnného intervalu motorových olejů	11
2.3 Mazání	12
2.3.1 Mazání motoru	12
2.3.2 Způsoby mazání	13
2.3.3 Funkce a vlastnosti motorového oleje	14
2.4 Aditiva	17
2.5 Olejový filtr	19
2.5.1 Účel olejového filtru	19
2.5.2 Části olejového filtru	19
2.6 Teoretické principy použitých experimentálních metod tribotechnické diagnostiky	21
2.6.1 Infračervená spektrometrie	21
2.6.2 Ferrografie	26
2.6.3 Řádkovací elektronová mikroskopie (REM)	28
2.7 Opotřebení oleje v provozu	31
2.7.1 Druhy opotřebení v provozu	31
2.7.2 Druhy znečištění oleje	35
<b>3. Experimentální část</b>	<b>36</b>
3.1 Odběr vzorků	36
3.1.1 Odběr vzorků z Autoservisu Hybeš	36
3.1.2 Odběr vzorků z Karex a.s.	37
3.1.3 Odběr vzorků z DaimlerChrysler Automotive Bohemia s.r.o.	38
3.1.4 Odběr vzorků kompresorových olejů v Synthesii Pardubice	38
3.2 Metodika experimentálních prací	39
3.2.1 FTIR spektrometrie	39
3.2.2 Ferrografická analýza	41
3.2.3 Analýza olejových filtrů	44
3.3 Výsledky měření a jejich interpretace	52
3.3.1 Výsledky FTIR spektrometrie	52
3.3.2 Výsledky ferrografické analýzy	60
3.3.3 Výsledky analýzy olejových filtrů	73
3.4 Morfologické studium sférických otěrových částic	82
3.4.1 Morfologie částic únavového opotřebení	82
3.4.2 Sférické částice	82
3.4.3 Lokální elektronová mikroanalýza	86
3.4.4 Hodnocení analýzy olejových filtrů	87
<b>4. Závěr</b>	<b>89</b>
<b>5. Použitá literatura</b>	<b>91</b>

## 1. Úvod

Současný rozvoj techniky v oblasti dopravy i průmyslu klade vysoké nároky na kvalitu maziv, která musejí splňovat velmi vysoké nároky z hlediska jejich funkčnosti a pracovat za extrémních podmínek se stále delší životností. Se zvyšováním spolehlivosti a hospodárnosti provozu dopravních prostředků i strojních zařízení je úzce spjato sledování jejich technického stavu i stavu používaných maziv. Problémy tohoto typu řeší tribotechnická diagnostika, využívající mazacího média jako zdroje komplexních informací o dějích, změnách a režimech opotřebení v mazaných systémech. Jedná se zejména o zjišťování stavu, prodlužování použitelnosti a prognózování degradace mazacích olejů a o zjišťování režimu, místa a trendu opotřebení mechanického systému (vozidlového spalovacího motoru, hydraulické soustavy aj.) prostřednictvím monitorování výskytu cizích látek v mazivu, a to jak z kvantitativního, tak kvalitativního hlediska.

Oleje významně ovlivňují nejen spolehlivost a životnost mazaného systému, ale i ekonomickou stránku provozu. Ekonomický pohled na používání oleje není jen v jeho pořizovací ceně, ale také ve výměnných intervalech. Časté výměny oleje vedou ke stavu, kdy se nevyužívá jeho celkových mazacích schopností – a naopak při intervalech výměny delších než je životnost oleje může dojít až k závažné poruše či destrukci zařízení. Proto je třeba nalézt optimální lhůtu, po jejímž uplynutí je mazivo potřeba vyměnit.

Díky poznatkům tribotechnické diagnostiky a jejich následnému využití v praxi výrazně klesají ekonomické nároky na výrobu a provoz strojů a zařízení. Dochází ke snížení prostojů výroby, zvýšení provozuschopnosti, produkční schopnosti a provozní životnosti a z toho vyplývající zvýšení výkonnosti strojní produkce. Důsledné využití tribotechnické diagnostiky tak přináší i přes nemalé pořizovací náklady na vybavení možnost efektivního hospodaření s mazivy.

Proto bylo cílem této práce přispět k rozšíření aplikace vybraných pokročilých instrumentálních metod pro analýzu stavu používaných motorových a kompresorových olejů v běžné praxi, k jejich efektivnějšímu využití a ke snížení provozních nákladů.

Teoretická část práce podává informace o druzích opotřebení a částicích při něm vznikajících, o funkci oleje v mazacím systému, o určování výměnných intervalů a druzích aditiv. Dále jsou charakterizovány principy vybraných experimentálních metod – FTIR spektrometrie, analytické ferrografie a rastrovací elektronové mikroskopie, které byly aplikovány v experimentální části práce.

Pro analýzu vzorků byla využita metoda infračervené spektrometrie s Fourierovou transformací; použitá analytická technika horizontální ATR je určena především k identifikaci organických látek a je vhodná zejména pro analýzu olejů.

Motorové a kompresorové oleje byly dále analyzovány ferrograficky. Na základě experimentálních výsledků bylo provedeno hodnocení technického stavu sledovaných mechanických soustav i olejů v nich použitých a byly posouzeny jejich výměnné lhůty.

Opotřebení mazacího oleje závisí na mnoha faktorech, kromě jiného i na funkci olejových čističů. Účinnost filtrace výrazně ovlivňuje životnost olejových náplní i samotných provozovaných systémů. Častou příčinou výměny olejů je jejich znečištění mechanickými nečistotami, které lze různými filtračními metodami z olejové oběhu odstranit. Filtrace oleje však značně komplikuje klasickou ferrografickou analýzu, protože částice, které mají pro hodnocení opotřebení největší význam, jsou zachytávány ve filtrační vložce. Dílčím cílem této práce bylo proto modifikovat doposud používanou metodiku izolace otěrových částic zachycených ve filtru, provést jejich morfologickou analýzu na rastrovacím elektronovém mikroskopu a dokumentovat charakteristické částice pro archiv DFJP. V rámci práce byl rovněž navržen, vyroben a otestován přípravek pro otevírání filtrů, usnadňující vyjmutí filtrační vložky pro její další zpracování před samotnou separací částic.



## 2. Teoretická část

### 2.1 Tribotechnika

Při vzájemném působení povrchů v pohybu se projevuje odpor proti pohybu – tření. Důsledkem tření je opotřebení pohybujících se povrchů. Tření a opotřebení se zmenšuje mazáním, přitom mazivem může být látka jakéhokoliv skupenství.

Tribologie je mezioborová věda, zabývající se obecně vzájemným působením povrchů tuhých těles při jejich relativním pohybu nebo při pokusu o vzájemný pohyb a s tím související technologií. Jedním z jejích oborů, který se zabývá aplikací výsledků tribologie v praxi, je tribotechnika [1]. Do tribotechniky patří

- výběr a způsoby aplikace maziv,
- maziva a jejich testování,
- materiály pro třecí dvojice,
- výpočet, konstrukce a optimalizace třecích dvojic,
- mazací technika,
- vědecké základy pro tření a opotřebení,
- měřicí a kontrolní metody pro tribotechnické pochody,
- spolehlivost a diagnostika (v tomto případě tzv. tribodiagnostika) konstrukčních částí a skupin,
- speciální technologické postupy vedoucí ke zvýšení odolnosti proti opotřebení,
- organizace techniky mazání.

V poslední době nabývá tribotechnika na důležitosti, neboť pomocí její správné aplikace lze dosáhnout významných úspor v řadě oblastí. Z nejdůležitějších lze jmenovat např.

- snížení spotřeby energie k pohonu strojů,
- zvýšení životnosti strojů a zařízení,
- snížení prostojů vzniklých v důsledku poruch a následných oprav,
- snížení nákladů na údržbu a opravy strojů,
- zvýšení výrobní přesnosti strojů,
- snížení investičních nákladů,
- snížení nákladů potřebných k zajištění vhodných maziv (jejich efektivní volbou a výběrem dodavatele).

### 2.2 Optimalizace výměnného intervalu olejů

#### 2.2.1 Všeobecné zásady určení výměnných intervalů

Uživatel by měl respektovat doporučení výrobců motorů, a to jak ve vztahu ke kvalitě používaných olejů, tak k délce výměnného intervalu. Doporučený interval výměny motorového oleje udává výrobce motoru jako maximální. U dnešního vozového parku převažuje interval 15 tisíc km, u nových automobilů je zřejmá snaha o prodloužení výměnného intervalu na 20 tisíc km až 50 tisíc km. Tradiční interval 15 tisíc km je třeba považovat za maximální. U automobilů provozovaných v městském provozu či na krátké trati s častým studeným startem je nutností snížit výměnný interval na přibližně 10 – 12 tis. km. Výměnný interval je dán kromě jiného i konstrukcí motoru, typem spalování paliva, konstrukcí palivového a vzduchového filtru atd. hlavním důvodem výměny motorového oleje mnohdy není chemická degradace samotného oleje, ale přítomnost nečistoty v oleji (saze, prach). Proto zejména u starších motorů není efektivní používat kvalitnější oleje než původně předepsal výrobce, ani prodlužovat výměnný interval oproti doporučenému.

### **Prodloužené servisní intervaly**

Pro oleje umožňující podstatné prodloužení výměnných lhůt se používá název Longlife. Zvyšování proběhu mezi nutnými výměnami motorového oleje je umožněno používáním jednak vysoce kvalitních olejů na syntetické bázi, které vyhovují velmi přísným normativům jednotlivých výrobců automobilů, jednak zabudováním sofistikovaných diagnostických systémů do motorů. Oleje se vyznačují velmi širokým viskozitním pásmem, takže na jedné straně je zaručeno rychlé a účinné promazání studeného motoru hned po spuštění, a to i za nízkých teplot, na druhé straně oleje dobře chrání motor i při práci pod plným zatížením. Lepší využití jejich kvalit ovšem podporují i zdokonalené, účinnější plnoprůtokové olejové filtry. Díky komplexní elektronické diagnostice je řídicí jednotka motoru průběžně informována o stavu a kvalitě provozních kapalin i o dalších provozně důležitých parametrech, z nichž se neustále odvozuje počet kilometrů zbývajících do nezbytné servisní prohlídky. K tomu slouží speciální zařízení vyvinutá právě pro tento účel, jako je např. *snímač teploty a hladiny oleje*, ve kterém jsou integrovány dva samostatné měřicí prvky – čidlo teploty oleje a snímač hladiny oleje. Informace o vzdálenosti, kterou je ještě možné ujet do příští servisní prohlídky, obdrží řidič prostřednictvím displeje v přístrojovém panelu. Na nutnost přistavit vůz do servisu ke kontrole a výměně oleje řidiče upozorní palubní *indikátor servisních intervalů*.

Prodloužení servisních intervalů není pevně stanoveno, závisí do značné míry na způsobu jízdy a používání vozidla. Nejdelšího servisního intervalu lze dosáhnout ekonomickým způsobem jízdy a provozem na převážně dlouhých trasách. Naopak nejkratší servisní intervaly budou mít vozidla provozovaná v extrémních podmínkách, používaná k jízdám převážně na krátké vzdálenosti v městském provozu a taková, jejichž řidiči jezdí nevhodným způsobem. Je tedy zřejmé, že 30 tisíc km (u zážehových motorů), resp. 50 tisíc km (u vznětových motorů) je mezním limitem a že skutečný proběh kilometrů závisí na způsobu provozování automobilu. Maximální časový interval výměny oleje činí v obou případech dva roky [2].

Pro určení výměnného intervalu je rovněž důležité znát nejenom absolutní míru opotřebení, ale i trend růstu opotřebení, který může mnoho napovědět o stavu součástí motoru a o nejvhodnějším způsobu údržby.

Pro správnost závěrů, formulovaných na základě rozborů oleje, je potřebné zabezpečit, aby odebrané vzorky byly skutečně reprezentativní a manipulace se vzorky byla prováděna vždy stejným způsobem.

#### **2.2.2 Optimalizace výměnného intervalu motorových olejů**

Moderní motory jsou velmi složité a náročné na používaná maziva. Hlavní požadavky spalovacích motorů na motorové oleje jsou zejména

- vysoká spolehlivost,
- dlouhá životnost,
- nízké riziko výpadku funkce,
- ekologicky přijatelný provoz,
- nízká energetická náročnost provozu,
- malá tvorba odpadních látek z používaných maziv.

Aby se v maximální míře naplnily tyto funkce, je snahou uživatele motoru

- použít optimální druh oleje,
- maximálně využít vlastnosti oleje,
- preventivní kontrolou stavu oleje předcházet poruchám motoru a zkracování jeho životnosti.

Mezi nejzávažnější faktory vedoucí ke stárnutí oleje v provozu, a tím i k ztrátě funkčních vlastností, patří

- 1) degradace oleje
  - oxidací,
  - nitrací,
  - poklesem účinnosti aditiv,
  - poklesem viskozity v důsledku destrukce modifikátorů viskozity a vyčerpání depresantů,
- 2) kontaminace oleje
  - produkty spalování,
  - nespáleným palivem,
  - tuhými částicemi (prach a ošetrové kovy, produkty oxidace, kondenzace a polymerace složek olejů nebo paliva),
  - kontaminace vodou a chladicí kapalinou,
  - produkty rozkladu přísad.

### 2.3 Mazání

Třecí plochy pohybujících se částí spalovacího motoru musí být dostatečně mazány, aby se zabránilo vzniku suchého tření (obr. 1), které vždy způsobuje zadírání. Mazáním se mezi třecími plochami vytvoří tenká vrstva maziva (olejový film). Spolehlivost spalovacího motoru do značné míry závisí na dobrém mazání; je proto nutné, aby olej nepřetržitě a intenzivně procházel vředy v třecích plochách součástí motoru a mazal, případně aby plnil některé další úlohy, např. chladil, utěšňoval, udržoval čistotu motoru, chránil proti korozi, přenášel síly.



Obr. 1 Schéma suchého tření [3]

#### 2.3.1 Mazání motoru

U spalovacích motorů se rozlišuje

- mazání mastnou směsí u zážehových dvoudobých motorů,
- mazání rozstřikovací – užívá se v kombinaci s mazáním tlakovým; olej je rozstřikován ve vnitřním prostoru motoru pohybujícími se součástmi klikového ústrojí,
- mazání tlakové – olej se čerpá a dodává na mazací místa; odstříkující nebo stékající olej pak maže ostatní místa.

Podle místa shromažďování oleje se dělí tlakové mazání na mazání

- ze skříně,
- z nádrže.

Podle způsobu, jakým je mazací olej přiváděn do ložisek klikového hřídele, lze rozlišit dva případy propojení:

- 1) paralelní, které je používáno v soudobých automobilech, kdy olej je přiváděn hlavním mazacím kanálem a rozvádí se k jednotlivým mazacím místům (tlaky mezi mazanými místy jsou přibližně stejné) [4],
- 2) sériové, užívané např. u tankových motorů, kdy olej vstupuje do prvního hlavního ložiska otvory ramen a čepů a pak postupuje k dalším ložiskům (rozdíly mezi vstupním tlakem na prvním ložisku a výstupním tlakem na posledním ložisku jsou značné) [4].

### 2.3.2 Způsoby mazání

V ideálním případě jsou povrchy strojních součástí fyzicky odděleny vrstvou maziva. Nedochází-li k přímému kontaktu dvou povrchů a není-li mazivo znečištěno, pracuje stroj s malým třením a vytváří malé opotřebení.

Režimy mazání:

#### Hydrodynamické mazání

Mazání, kdy dochází k oddělení součástí pomocí olejového „klínu“, který je vytvořen na principu hydrodynamiky (obr. 2).

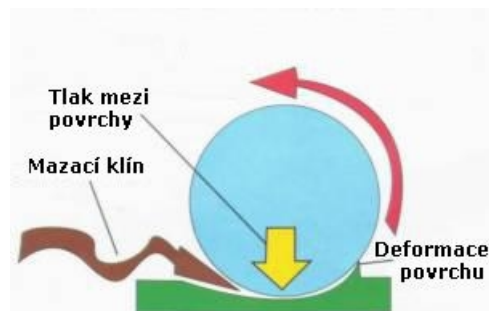


Obr. 2 Princip hydrodynamického mazání [5]

Vznik hydrodynamické vrstvy závisí na geometrii strojních povrchů, rychlosti, zatížení a na viskozitě oleje. Rychlost a viskozita jsou při vzniku hydrodynamického mazání nepřímo úměrné zatížení. Rostoucí rychlost, viskozita, nebo klesající zatížení bude snižovat čas potřebný k hydrodynamickému oddělení a zvětšovat tloušťku vrstvy. Podobně i velikost součásti a kvalita povrchu ovlivní způsob, jakým vznikne hydrodynamická vrstva. Hydrodynamického mazání není dosaženo při spouštění a ztrácí se při zastavování. Náhlá změna rychlosti nebo střídavé zatížení (rázové namáhání) narušují hydrodynamické namáhání. Příležitostně k vytvoření hydrostatické vrstvy během spouštění napomáhají pomocná čerpadla, aby došlo k „nadzvednutí“ čepu v uložení, urychlil se tak vznik hydrodynamické vrstvy a snížilo se s tím spojené opotřebení při rozběhu.

#### Elasticko-hydrodynamické (EHD) mazání

EHD mazání se uplatňuje ve valivých kontaktech, kde se povrchy stýkají v bodech nebo přímkách, jako valivé elementy v ložisku nebo přímkou záběru zubů dvou spoluzabírajících kol. Pro přenos zatížení je tedy k dispozici malá plocha povrchu – teoreticky bod nebo přímkou. Nicméně ve skutečnosti se kov během činnosti stroje zásluhou pružnosti materiálu deformuje a vytvoří tak prostor pro vznik hydrodynamické vrstvy. Protože vytvoření hydrodynamické vrstvy závisí na deformaci povrchu součástí, režim mazání se označuje jako elasticko-hydrodynamické nebo EHD mazání (obr. 3).



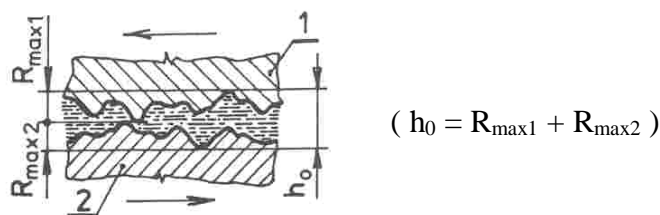
Obr. 3 Princip Elasticko–hydrodynamického mazání [5]

EHD vrstva oleje oddělující povrchy součástí je tenká, často slabší než jeden mikrometr. Protože většina zatížení součástí je v daném okamžiku přenášena přes velmi malou plochu, je tlak v této oblasti velmi vysoký a dosahuje hodnot až několik desítek MPa. Extrémní místní tlaky ve valivých kontaktech zvyšují význam účinného mazání.

### Mezní mazání

Kde nemůže být dosaženo hydrodynamické nebo EHD mazání, závisí průběh tření na dalších parametrech maziva. Tento stav je nazýván mezním mazáním. Pro mezní mazání jsou charakteristické následující podmínky

- tloušťka olejové vrstvy nepřesahuje drsnost povrchu součástí (obr. 4),
- zařízení pracuje v podmínkách, kdy je často startováno a zastavováno, v podmínkách rázového namáhání, vysokého statického zatížení nebo malých rychlostí,
- provozní podmínky vyžadují použití nízkoviskozitního oleje z důvodu tření některých součástí soustavy.



Obr. 4 Schéma mezního tření [3]

Mazání za mezních podmínek může vyžadovat použití

- měkkých kovů, které vytvářejí menší tření ve styku povrchů,
- aditiv, které chemickými reakcemi snižují tření na povrchu součástí,
- plastických maziv s přísadou grafitu nebo  $\text{MoS}_2$  na snížení tření a k řízení opotřebení.

### 2.3.3 Funkce a vlastnosti motorového oleje

Spalovací motory kladou na motorový olej nejrůznější požadavky, které navíc musí být splněny za všech provozních podmínek (např. vysoké tlaky a teploty). Základní funkcí motorového oleje je dokonalé mazání všech pohyblivých částí motoru. Olej musí vytvořit dostatečně únosný mazací film, aby tření a opotřebení součástí bylo co nejmenší (nejen za provozních teplot, ale i při studeném startu). Kromě mazací funkce musí olej splňovat i další požadavky:

- Musí mít dostatečnou termooxidační stálost, která omezuje tvorbu produktů termooxidačních reakcí a jejich usazování na plochách omývaných olejem. Na udržení čistoty součástí motoru závisí četnost údržbářských prací a v konečném důsledku i životnost motoru. Čistota je důležitá především v oblasti pístních kroužků, kdy při nadměrné tvorbě usazenin může dojít k jejich zapečení. Pokud k tomu dojde, ztrácí se těsnící a stěrací schopnosti. Vzniká nadměrné tepelné zatěžování pístu a následným zadřením. Olej proto musí obsahovat disperzanty, které zabraňují nečistotám a produktům spalování v jejich usazování (které navíc mohou ucpat sítko olejového čerpadla, filtry, případně mazací kanály) a detergenty, které potlačují tvorbu vysokoteplotních usazenin, zamezují korozní opotřebení a chrání motor proti rezavění. Při nedostatku těchto přísad v oleji je nutná výměna olejové náplně.
- Musí zajistit odvod tepla od součástí, které by byly jinak chlazeny nedostatečně a tepla vznikajícího třením vzájemně se pohybujících součástí a hořením ve spalovacím prostoru na stěny klikové skříně.

- Musí mít dostatečně velkou viskozitu v oblasti vysokých pracovních teplot, která je zapotřebí k dotěsnění mezi pístními kroužky a stěnou válce (aby pronikání stlačených plynů bylo minimální a nedocházelo k tlakovým ztrátám na kompresi). Dobré reologické vlastnosti (tekutost) maziva i při nízkých teplotách (kvůli čerpatelnosti oleje).
- Dále musí tlumit vibrace a hluk v motoru,
  - mít malou odparnost (olejová náplň měla co nejmenší ztráty),
  - neutralizovat kyselé korozivní zplodiny vznikajících během spalování paliva (chemická koroze),
  - chránit kovové plochy proti působení koroze při odstavení motoru (atmosférická koroze),
  - a nesmí mít nežádoucí vliv na těsnící materiály a nekovové komponenty.

### **Složení motorových olejů**

Výroba motorových olejů se skládá ze tří základních operací: z výroby základového oleje, z výroby aditiv a z mísení a výroby motorových olejů. Pro mísení se téměř vždy používá směs základových olejů. Tak se nastavuje požadovaná viskozita oleje. Do takového základového oleje se pak dávkuje aditivační balík, který obsahuje všechny potřebné přísady. Výkonové vlastnosti jsou dány především použitou aditivací. Ta je rozhodující pro konečnou kvalitu motorového oleje. Viskozita oleje se pak většinou ještě dále upraví přidáním polymerních modifikátorů viskozity (zvyšovačů viskozitního indexu).

Syntetické oleje jsou vyráběny syntézou z plynného ethylenu (polyalfaolefiny) nebo jinými syntézami (např. esterové oleje). Vychází se z čistých sloučenin, ve kterých není žádná síra. Cena těchto olejů je vyšší než cena minerálních, proto se dnes syntetické základové oleje nahrazují kvalitními minerálními oleji.

Technologie výroby minerálních olejů už pokročily tak daleko, že vlastnosti kvalitních minerálních a syntetických olejů se téměř vyrovnaly [1].

Rozdělování olejů na minerální, polosyntetické a syntetické dnes už ztrácí svůj praktický význam. Respektované instituce API - American Petroleum Institut, SAE - Society of Automotive Engineers a ACEA - Assotiation des Constructeurs Européens d'Automobile je také od 90. let minulého století přestaly používat.

### **Syntetické oleje**

Syntetický olej se vyrábí velmi náročnou technologií, kdy se z ropného základu extrahují pouze ty složky, které jsou pro mazání vhodné; nepotřebné a nevhodné složky, které nejdou normální destilací odstranit a v minerálním oleji tedy zůstávají, zde nejsou přítomné a tedy olejový základ neovlivňují. Takto získaný základový olej se aditivuje podobně jako olej minerální; mnoho aditiv je však odlišných a vhodných pouze do synteticky vyráběných olejů. Výroba syntetických olejů je velmi variabilní z hlediska složení základové složky, proto je možné s pomocí vhodných aditiv vyrobit olej s obrácenou charakteristikou viskozity, kdy olej se zvyšující se teplotou houstne [6].

Mazací schopnost syntetického oleje je dána hlavně jeho konstantní viskozitou a schopností vytvářet pevnější mazací film na třecích dvojicích. Pevnějšímu styku oleje s kovovou stěnou motoru výrazně napomáhají syntetické estery, které způsobují menší stékanost oleje ze stěn a tak i při dlouhodobém odstavení motoru z provozu mazané plochy výrazně méně korodují. Při startu zajišťují správné mazání do doby, než olejové čerpadlo naplní všechny kanály mazací soustavy olejem a olej začne mazat. Opotřebením motorů je proto zastudena menší, než při použití olejů minerálních. Syntetický olej však při tepelném přetížení degraduje – tato změna je na rozdíl od minerálních olejů nevratná, proto do závodních motorů musí být

používán olej s vyšším viskozitním číslem, než při použití oleje minerálního. I z tohoto důvodu se tepelně namáhané motory vybavují chladiči oleje [6].

Velkou výhodou syntetických olejů je menší tvorba karbonu. U syntetických olejů je možné použití aditiv, které udržují karbon neustále ve vznosu, takže se téměř neusazuje, při výměně olejové náplně se vypustí spolu s olejem. Oxidace těchto olejů je také pomalejší, protože olej neobsahuje složky, které jsou oxidačně méně odolné.

### **Polosyntetické oleje**

U polysyntetických olejů se používá minerální základ, který je vyroben syntetickou cestou a do něj se přimíchává syntetický olej určitého složení. Obsah syntetické složky nesmí být menší než 20% objemu, špičkové polosyntetické oleje obsahují až 65% syntetického oleje [6]. Takto vyrobený základ se dále aditivuje pro dosažení potřebných parametrů. Polosyntetické oleje jsou kompromisem mezi oleji minerálními a plně syntetickými, od každé skupiny mají určité dobré vlastnosti. Nejsou sice jako celek lepší než oleje syntetické, ale jsou kvalitativně na vyšší úrovni než oleje minerální. Jejich cena a provozní vlastnosti je předurčují do motorů s vyšším měrným výkonem, než který je únosný pro oleje minerální, tvorba karbonu a černých kalů je výrazně menší než u minerálních olejů. Dosažitelné rozpětí viskozitních tříd plně pokrývá evropské požadavky a jejich většímu rozšíření brání někdy zbytečně vysoká cena. Životnost polosyntetických olejů je větší než olejů minerálních a běžně se u všech udává výměna minimálně po 15 tisíc km [6].

### **Minerální oleje**

Minerální olej se vyrábějí destilací z ropy, kdy se oddělí lehčí a těžší uhlovodíkové složky, výsledný produkt se technologicky upravuje a aditivuje. Jejich výhodou je kromě přijatelné ceny také to, že nejsou náchylné k degeneraci z krátkodobého působení vysokých teplot. K tomuto jevu dochází velmi často při záběhu motoru, kdy se mikroobjemy oleje ve styku s ještě nezaběhnutými třecími dvojicemi (např. pístní kroužek – válec) silně přehřívají [6].

U minerálních olejů se vyskytuje největší tvorba karbonu a černých kalů. Karbon se začíná vytvářet při styku oleje s palivem za působení teploty, vlhkosti a dalších činitelů. Vytvořený karbon se postupně usazuje na stěnách, nejdříve relativně pomalu, jakmile se celý povrch kovu pokryje vrstvou karbonu, usazování karbonu se zrychlí. Karbon se vytváří vždy, pouze sestava vhodných aditiv a typ oleje (minerální, syntetický) tvorbu karbonu omezuje s větším či menším úspěchem. Karbon zhoršuje přestup tepla z motoru stěnami a tak je při silně zakarbonovaném motoru teplota uvnitř vyšší. Každá nová náplň oleje má snahu starý karbon rozpouštět, tím se aditiva vyčerpávají a potom nestačí zabraňovat tvorbě karbonu nového. Rozpuštěný karbon potom proudí mazacími kanály až k filtru, který se ucpává více, než potřebujeme a tím snižuje jeho životnost. Pro snížení tvorby karbonu je nutné dosáhnout styku oleje s co nejmenším množstvím paliva, které se do olejové náplně dostane, proto je dlouhá a častá jízda na sytič nevhodná, také velká vůle pístů ve válcích napomáhá profuku palivové směsi do prostoru pod písty, totéž platí pro vodítka sacích ventilů. Benzín se sice postupně z oleje odpaří, ale to platí při důkladném prohřátí oleje aspoň na 80 °C, což nebývá v městském provozu často splněno. To je také jeden z mnoha důvodů, proč by se měla výměnná lhůta olejové náplně motoru zkrátit v městském a podobném provozu zhruba o 1/3 v zimě a 1/4 v létě [6].

### **Doporučený motorový olej**

Při volbě motorového oleje není rozhodující značka oleje nebo to, je-li olej minerální nebo syntetický. Základní předepsaný parametr motorového oleje je jeho výkonová specifikace (API, ACEA, příp. i firemní výkonové specifikace, např. Ford, GM či VW, apod.). Součástí každé výkonové specifikace je i požadavek na minimální vysokoteplotní viskozitu (HTHS

- High Temperature High Shear), tj. viskozitní parametr, který výrobce motoru doporučuje a který by vždy měl být dodržen.

Viskozitní třídu oleje si musí volit každý uživatel i podle toho, pro jaký provoz automobil potřebuje (městský provoz, krátké trasy, dlouhé trasy po dálnici apod.), zda chce šetřit palivo (lehkoběžné oleje), či podle toho, jakou má spotřebu oleje (viskóznější oleje pro utěsnění pístu ve válci).

### **Vzájemná mísitelnost olejů**

Motorové oleje jsou navzájem mísitelné. Problémem při mísení různých olejů ale může být změna viskozitní charakteristiky oleje. Smísení dvou různých motorových olejů např. SAE 5W40 může za určitých okolností vést i k vytvoření oleje např. SAE 10W40 [1].

Vždy je však nutné dodržovat požadavek motoru na minimální HTHS viskozitu. Při mísení olejů může dojít k záměně zejména ve viskozitních třídách SAE 0W30 a 5W30, které se vyrábí s normální HTHS viskozitou, tj. větší než 3,5 mPa.s, a se sníženou HTHS viskozitou, tj. v rozmezí 2,9 - 3,5 mPa.s. Tento problém se týká např. Longlife olejů (oleje s prodlouženým intervalem výměny) pro motory VW. Většina těchto Longlife olejů má sníženou HTHS viskozitu, ale pro benzinové motory s turbodmychadlem je nutné používat oleje s normální HTHS viskozitou, tj. se specifikací VW 503.01. Důvodem je vyšší teplota některých mazaných míst benzinového turbomotoru a nutnost udržení pevné olejové vrstvy mezi třecími povrchy [1].

## **2.4 Aditiva**

Aditiva jsou chemické přísady, které zlepšují vlastnosti olejů a plastických maziv. Druhy aditiv a jejich množství se liší podle způsobu užití maziva. Obsah aditiv v mazivu se pohybuje v rozsahu od 1 do 25 %. Druhy a množství aditiv stanovují výrobci na základě norem a praktických zkoušek.

Velké množství aditiv jsou povrchově aktivní polární látky. Nabitými částmi jsou molekuly přitahovány k povrchům, např. k povrchu pístu ve válci motoru. Polární aditiva utvoří na povrchu tenký film, který v závislosti na chemickém složení aditiva zvyšuje odolnost proti korozi, proti usazování nečistot, proti poškození vysokým tlakem apod.

Druhá skupina – nepolární aditiva nejsou povrchově aktivní, tzn. nejsou přitahována k povrchům, ale jsou rozptýlena v celém objemu maziva rovnoměrně. Přesto jsou tato aditiva velice významná – zlepšují viskozitu maziva, snižují bod tuhnutí maziva, chrání gumová těsnění proti poškození apod.

### **Typy aditiv**

#### **Aditiva s povrchovým účinkem**

- 1) Detergenty zamezují usazování nečistot na površích, případně již vytvořené nečistoty rozpouštějí. Díky detergentům mazivo lépe přilne k mazaným plochám. Detergenty hrají významnou roli např. při ochraně pístu ve válci, kde vlivem vysokých teplot dochází k uvolňování uhlíku, který má tendenci se usazovat na pracovních plochách pístu. Vzniklé úsady způsobují vznik netěsností vlivem mechanického poškození (poškrábání) nebo změnou tvaru zapříčiněnou nánosem nečistot.
- 2) Disperzanty zabraňují tvorbě úsad, které se tvoří především za nižších provozních teplot. Obalí mikroskopické mechanické nebo kapalné nečistoty a zamezí tak jejich koncentraci a usazování. Nečistoty se vlivem disperzantu vznášejí rovnoměrně v celém objemu maziva. Zamezí se tak zablokování olejových kanálů a filtrů.
- 3) Aditiva zlepšující ochranu proti vysokému tlaku a opotřebení, chrání před opotřebením ocelové části, které se o sebe třou pod vysokým tlakem (např. ozubená



kola). Aditiva vytvoří chemickou reakcí na povrchu kovu odolné vrstvy, které zamezí kontaktu kov na kov.

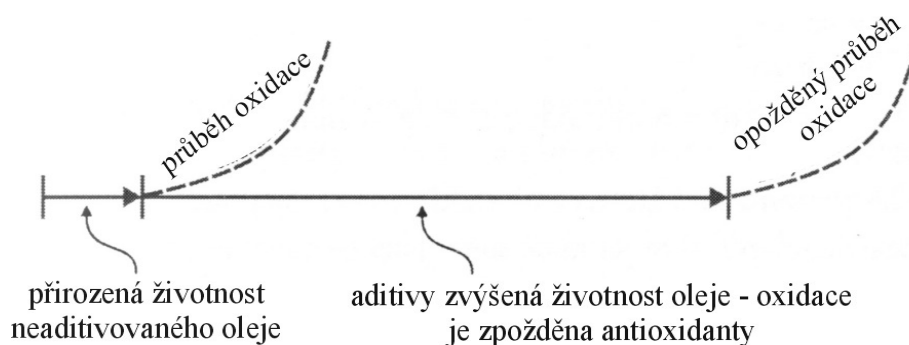
- 4) Aditiva zvyšující ochranu proti korozi vytvářejí na povrchu kovů ochranný film, který zabraňuje tvorbě koroze (brání oxidaci kovového povrchu). K oxidaci povrchů kovů může docházet například vlivem agresivních sloučenin vznikajících ve válci motoru při spalování palivové směsi.
- 5) Aditiva upravující tření mezi třecími plochami na požadovanou hodnotu. Přesná hodnota tření ploch je požadována například v automatických převodovkách, retardérech aj.

### Aditiva zlepšující vlastnosti oleje

- 1) Aditiva zlepšující viskozitní index stabilizují viskozitu maziva, tzn. viskozita aditivovaného maziva je méně závislá na teplotě. Tím rozšiřují teplotní rozsah, v jakém je mazivo schopno plnit svou funkci. Se snižující se teplotou viskozita maziva stoupá a naopak, se zvyšující teplotou viskozita maziva klesá. Změny viskozity maziva mají dopad rovněž na tloušťku mazacího filmu a na ztráty energie, které vznikají překonáváním odporu maziva.
- 2) Aditiva snižující bod tuhnutí zmenšují možnost vylučování parafinu v mazivu za nízkých teplot. Při nízkých teplotách dochází u minerálních olejů ke vylučování parafínu. Jejich nekonzistentnost zhoršuje kvalitu mazání a zvyšuje ztráty energie z důvodu překonávání odporu maziva.
- 3) Aditiva chránící elastomery zpomalují stárnutí gumových a plastových částí, které jsou ve styku s mazivem (například těsnění) tím, že zamezují vyplavení / chemické degradaci elastomerů obsažených v gumových a plastových dílech. Elastomery zajišťují, aby gumové a plastové části byly stále elastické (pružné).

### Aditiva chránící olej

- 1) Zpomalovače stárnutí omezují chemickou degradaci maziva, ke které dochází především za vyšších teplot. Likvidací oxidačních činidel zamezují vzniku nežádoucích chemických sloučenin, které zkracují životnost maziva (obr. 5). Antioxidanty prodlužují indukční periodu oxidace základového oleje. Jejich degradaci nezvyšují jen teplota a katalyzátory oxidace, ale také přítomnost mechanických nečistot, vody a prachu. Degradací mazivo tmavne a dochází ke zvyšování jeho viskozity.



Obr. 5 Prodloužení životnosti oleje pomocí antioxidantů [7]

- 2) Deaktivátory kovů zabraňují chemickým reakcím probíhajícím na povrchu mikroskopických kovových částic přítomných v mazivu (ocel, měď). Kovové částice, které vznikají třením kovu o kov působí jako katalyzátor chemických degradačních procesů. Vytvořením ochranného filmu kolem částic kovu je zamezeno katalytickým chemickým reakcím a je tudíž zpomaleno stárnutí maziva.

- 3) Aditiva snižující pěnovost potlačují vznik olejové pěny. Intenzivním promícháváním oleje se vzduchem dochází k tvorbě pěny, která urychluje stárnutí maziva (usnadňuje oxidaci), zvyšuje stlačitelnost maziva (vznikají problémy u hydraulických soustav) a může způsobit i únik maziva ze zařízení.

## 2.5 Olejový filtr

Se zvyšujícími se nároky na výkon i životnost motorů a s nástupem nové řady aditivovaných olejů bylo nutné přepracovat soustavu filtrace, požadavkem bylo udržet olej co nejvíce čistý, aby se do kluzných ložisek nedostávaly pevné částice, které poškozují povrch čepů, vaček atd. Plnopřítokový filtr musel snášet plný tlak oleje a pětinašobný průtok oleje proti obtokovému filtru, jeho konstrukce a použité materiály jsou odlišné, odlišné je i uspořádání olejového okruhu (bez úpravy není možné takový filtr namontovat místo filtru obtokového). Z důvodu nebezpečí poruchy mazání při ucpání filtru je vybaven pojistným ventilem, který propustí olej obtokem okolo vložky (lépe nefiltrovaný, než žádný olej). Rozdíl mezi obtokovým a plnopřítokovým filtrem je kromě konstrukce ve velikosti zachycovaných částic. Plnopřítokový je o něco hrubší a nedokáže zachytit velmi malé částice, obtokový filtr je jemnější a tudíž olej na výstupu z filtru je čistější.

Na základě tohoto rozdílu byl vyvinut kombinovaný filtr, který v jednom pouzdře sdružuje filtr plnopřítokový i obtokový, montuje se na místo plnopřítokového filtru. Tento filtr je zvláště vhodný pro vozidla pracující v rozvázkovém režimu, ovšem použít ho lze na všechna vozidla s plnopřítokovou filtrací [6].

Podrobná databáze údajů o olejových filtrech je dostupná v online katalogu [8].

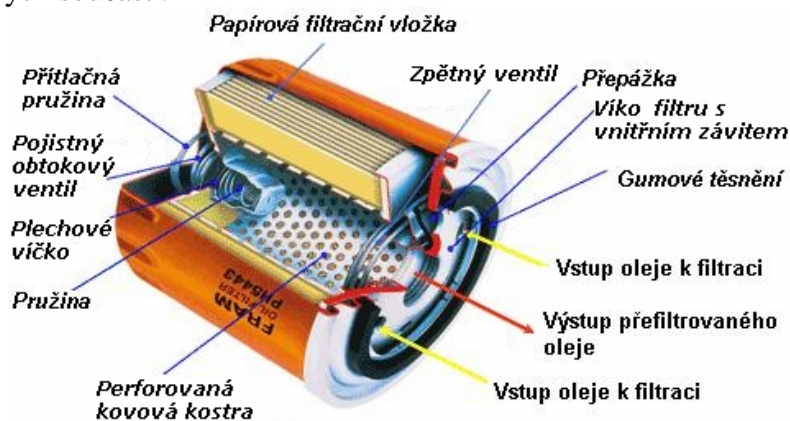
### 2.5.1 Účel olejového filtru

Olejový filtr zbavuje olej nečistot a pevných částic jako je prach, kovové částičky, částičky sazí atd. zajišťuje tak, že je motor mazán pouze čistým olejem. Nečistoty v oleji působí v motoru jako brusná pasta, což samozřejmě vede k vyššímu opotřebení a snížení životnosti motoru.

### 2.5.2 Části olejového filtru

Každý olejový filtr tvoří pět základních součástí (obr. 6).

- 1) Víko filtru, které obsahuje gumové těsnění, závit pro montáž k motoru a zpětný ventil.
- 2) Koš, který celý filtr uzavírá.
- 3) Filtrační vložka, která obsahuje samotný filtrační materiál připevněný k vnitřní kostře a dvěma víčkům.
- 4) Pojistný obtokový ventil, který zajišťuje obtok oleje v případě překročení určitého tlaku při ucpání filtru.
- 5) Pružina, která slouží k přitlačení celé konstrukce k víku filtru a dobrému utěsnění jednotlivých součástí.



Obr. 6 Konstrukce olejového filtru [9]

### **Víko filtru**

Vnější stranou víka filtr doléhá k bloku motoru a zajišťuje tak vstup a výstup oleje a také zatěsnění. Olej do filtru vstupuje několika malými otvory okolo většího otvoru, kterým čistý olej z filtru vytéká. Filtr se k bloku motoru šroubuje závitem ve výstupním otvoru a doléhá na něj gumovým těsněním.

Z vnitřní strany víka se nachází zpětný ventil, který zabraňuje vytékání oleje z filtru po vypnutí motoru. Zpětný ventil bývá ve formě gumové membrány, která je ve většině případů samonosná a neobsahuje tedy žádnou další pružinu. Membrána funguje podobně jako kuličkový ventil, tlak vstupujícího oleje membránu "rozevře", ta se tak vzdálí od víka a olej může do filtru protékat. Naopak po odeznění tlaku oleje (vypnutím motoru) se membrána vrátí do svého původního stavu, přilne k víku a zakryje tak vstupní otvory, kterými olej nemůže vytékat ven.

Pokud by zpětný ventil nefungoval správně, po vypnutí motoru by většina nashromážděných nečistot vytekla z filtru zpět do olejové vany. Navíc by byl filtr při následném startu motoru prázdný, musel by se tedy nejprve naplnit olejem, což zvyšuje dobu běhu motoru bez mazání a neblaze tak působí na jeho životnost [10].

### **Koš filtru s pružinou**

Koš filtru je nejčastěji zhotoven z hliníku o tloušťce několik desetin milimetru. Koš je k víku filtru přilísován. Spoj i samotný materiál musí vydržet vysoké tlaky oleje při studených startech a vysokých otáčkách motoru. Pružina, která je umístěna na dně koše, slouží k přitlačení celé konstrukce k víku filtru a dobrému utěsnění jednotlivých součástí [10].

### **Filtrační vložka**

Filtrační vložku tvoří filtrační materiál, který je seskládán do tvaru válce, podobně jako např. kónické vzduchové filtry. Filtrační vložka je zevnitř držena kovovou kostrou s otvory na průtok oleje, na obou základnách je zakončena dvěma kovovými víčky, k nimž je vložka přilepena. Olej teče kolem stěny koše, směrem zvenku celou plochou filtru dovnitř a odtéká z filtrační vložky odtokovým otvorem v horním víčku. Konce filtračního materiálu jsou k sobě zpravidla sepnuté a zalisované v plechu, mohou však být také zalepené nebo zašité [10].

### **Pojistný obtokový ventil**

Obtokový ventil slouží k zajištění průtoku oleje (a tedy i mazání motoru) i v případě, kdy je filtr nadměrně zanesen a olej jím už nemůže projít. V případě, kdy rozdíl tlaků oleje před a za filtrem stoupne nad určitou mez, obtokový ventil se otevře a olej může skrz filtr dále proudit.

Obtokový ventil se otevírá také v případech tlakových špiček během extrémně vysokých otáček a také v případech, kdy má olej příliš vysokou viskozitu, tj. převážně při studených startech v zimě. V případě obtoku filtrem pouze protéká a do motoru se nám tak dostává nevyčištěný olej, který s sebou navíc strhává usazené nečistoty ve filtru. Lepší je mazat znečištěným olejem než žádným, takže funkční obtokový ventil je velmi důležitý.

Existuje mnoho druhů konstrukce obtokových ventilů. Vždy jde o pružinu, která tlačí na ventilek umístěný v otvoru. Při vzrůstu tlaku oleje nad hodnotu, která přetlačí pružinu dojde k otevření obtokového ventilu. V zavřeném stavu musí být ventil dokonale utěsněn a olej přes něj nesmí prolínat. Obtokový ventil bývá převážně umístěn v otvoru spodního víčka filtrační vložky a často je její nedělitelnou součástí [10].

## 2.6 Teoretické principy použitých experimentálních metod tribotechnické diagnostiky

Opotřebením kovových součástí motoru je základním fenoménem, který ovlivňuje životnost motoru a jeho skutečnou užitnou hodnotu. Závažnost této problematiky zvyšuje skutečnost, že náklady na údržbu a opravy motorů několikanásobně převyšují jejich pořizovací cenu. Údržba složitých moderních motorů zaměstnává velký počet kvalifikovaných pracovníků, proto provozovatel vyžaduje od motoru vysokou životnost a optimální udržovatelnost. Navíc je opotřebením úzce spjato s procesem tření, a tedy i se spotřebou energie.

Konvenční metody analýzy maziv mnohdy neukazují na skutečný stav oleje v motoru a pracovní podmínky moderních motorů. Použití moderních instrumentálních technik, např. v této práci použitá infračervená spektrometrie a ferrografie, zabraňuje předčasným demontážím a opravám motoru tím, že podává uživateli přesné informace o opotřebením maziva, jeho znečištění a o opotřebením motoru a jeho závadách. Vytváří se tím předpoklad spolehlivé kontroly výměnných lhot maziva a včasné motorové údržby.

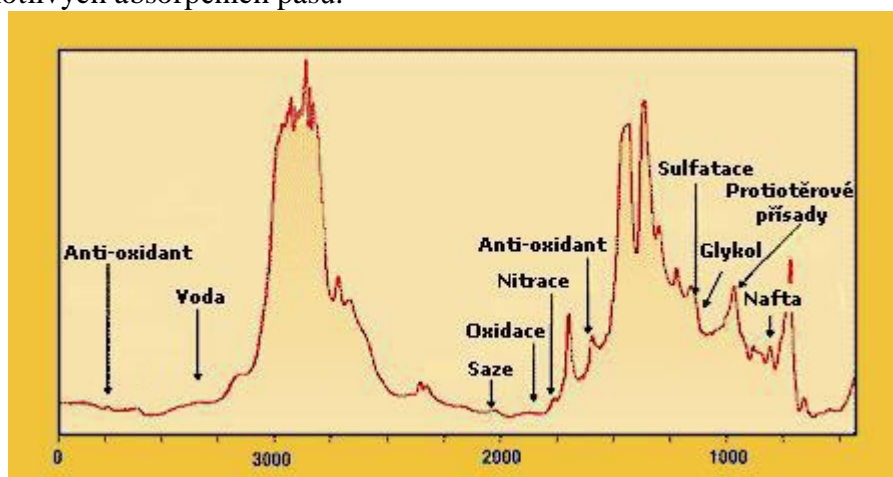
### 2.6.1 Infračervená spektrometrie

Infračervená spektrometrie umožňuje identifikovat druh maziva a sledovat změny probíhající při degradaci oleje v motoru, což je tradičními metodami prakticky nemožné.

Infračervená spektrometrie je založena na měření absorpce infračerveného záření při průchodu analyzovaným vzorkem. Infračerveným zářením se rozumí elektromagnetické záření s rozsahem vlnových délek  $\lambda$  0,78 – 1 000  $\mu\text{m}$ , což odpovídá rozsahu vlnočtů  $1/\lambda$  12 800 – 10  $\text{cm}^{-1}$ . Celá oblast bývá rozdělena na blízkou (13 000 – 4 000  $\text{cm}^{-1}$ ), střední (4 000 – 200  $\text{cm}^{-1}$ ) a vzdálenou infračervenou oblast (200 – 10  $\text{cm}^{-1}$ ). Nejvyužívanější z nich je střední oblast, která v rozmezí 1 500 – 700  $\text{cm}^{-1}$  je přirovnávána k „otiskům prstů“, protože dvě rozdílné látky se stejným IČ spektrem neexistují. Absorpční pásy, které mají vrcholy v intervalu 4 000 - 1 500  $\text{cm}^{-1}$ , jsou vhodné pro identifikaci funkčních skupin (např. –OH, C=O, N-H, –CH<sub>3</sub> aj.) [11].

### Polohy pásů sloučenin a strukturních skupin v IR spektrech

Oblasti vlnočtů charakteristických pásů význačných vazeb resp. strukturních skupin ve spektru jsou schematicky uvedeny na obr. 7, pomocí kterého lze i přibližně určit polohu a šířku jednotlivých absorpčních pásů.



Obr. 7 Typické pásy v FTIR-spekttru motorového oleje [12]

Při pohlcování infračerveného záření vzorkem dochází ke změnám rotačně vibračních energetických stavů molekuly v závislosti na změnách dipólového momentu molekuly. Analytickým výstupem je pak infračervené spektrum, které je grafickým vyjádřením funkční

závislosti energie, většinou vyjádřené v procentech transmitance (T) nebo jednotkách absorbance (A), na vlnové délce resp. vlnočtu dopadajícího záření.

Transmitance (propustnost) je definována jako poměr intenzity záření, které prošlo vzorkem (I), k intenzitě záření vycházejícího ze zdroje ( $I_0$ ) [11].

$$T = \frac{I}{I_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

Absorbance je definována jako dekadický logaritmus  $1/T$

$$A = -\log \frac{I}{I_0} \quad [\%] \quad (2)$$

$I_0$	... intenzita záření vyšlého ze zdroje	[ W/m <sup>2</sup> ]
$I$	... intenzita záření prošlého vzorkem	[ W/m <sup>2</sup> ]

Intenzita záření I, které prošlo vzorkem, závisí na vlnočtu a dráhovém rozdílu skládaných paprsků (3).

$$I(d) = \int_{-\infty}^{\infty} I(\tilde{n}) \cos(2pd\tilde{n}) d\tilde{n} \quad (3)$$

I – intenzita záření

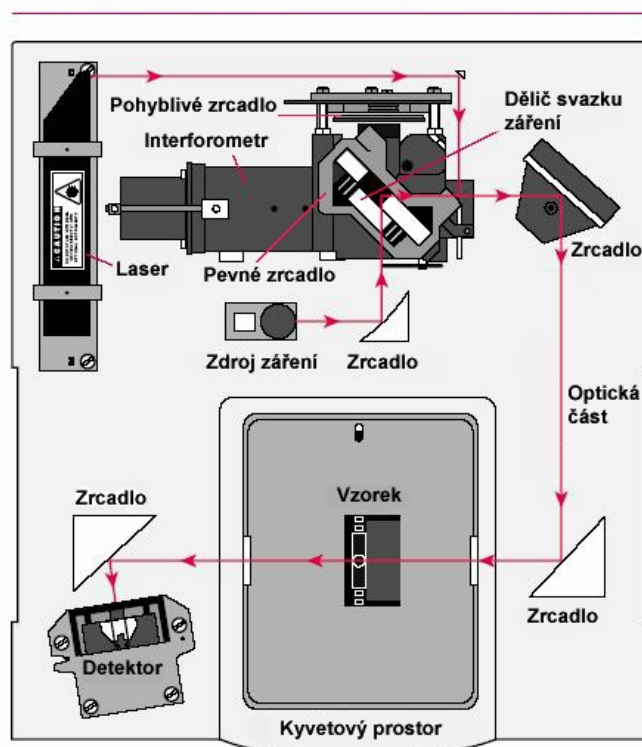
d – dráhový rozdíl skládaných paprsků

$\tilde{n}$  - vlnočet ( $1/\lambda$ )

Infračervená spektroskopie byla používána k identifikaci chemické struktury látek již od 30. let 20. století. S rozvojem výpočetní techniky v 80. letech 20. století dochází k praktickému rozšíření infračervených spektrometrů s Fourierovou transformací (FTIR spektrometry).

Infračervená spektrometrie s Fourierovou transformací se využívá pro její schopnost analyzovat silně absorbující vzorky a s nástavci pro analýzu pevných či silně absorbujících kapalných vzorků v odraženém záření (reflektanční infračervená spektroskopie). Přístroje pracují na principu interference záření, které na rozdíl od disperzních přístrojů měří interferogram modulovaného svazku záření po průchodu vzorkem. Tyto přístroje vyžadují aplikaci matematické metody Fourierovy transformace, aby výsledkem byl klasický spektrální záznam. Při měření dopadá na detektor vždy celý svazek záření (obr. 8).

Navíc je analýza rychlá a postačuje k ní malé množství vzorku (cca 1 ml). Po pořízení IČ spektra, které trvá cca 30 sekund, lze získat informace o úbytku aditiv a ztráty protiotěrové a antioxidační přísady (ZDDP), množství nečistot, unikání plynu kolem pístů (blowby), o vnikání chladicích médií (ethylenglykol), přítomnosti vody a nespáleného paliva (C-disperze) a oxidačních, nitračních a sulfatačních produktů [11]. Pomocí vyhledávacích programů a digitalizovaných knihoven infračervených spekter je možno identifikovat neznámou analyzovanou látku.



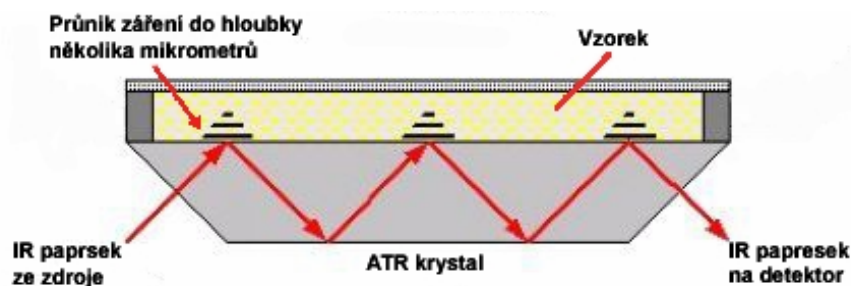
Obr. 8 Schéma FTIR spektrometru [13]

### Zeslabená úplná reflektance

K měření vzorků, které silně absorbují infračervené záření, je výhodná technika zeslabené totální reflektance (ATR - Attenuated Total Reflectance). Jedná se o účinnou rychlou metodu, která vyžaduje minimální přípravu vzorku pro analýzu. ATR analýza vzorků FTIR spektrometrií je rychlá, může být automatizována a eliminuje použití toxických rozpouštědel.

Technika je založena na principu násobného úplného odrazu záření na fázovém rozhraní měřeného vzorku a měřicího krystalu z materiálu o vysokém indexu lomu.

Krystal má tvar lichoběžníkového hranolu a většinou je planární. Svazek paprsků je přiveden do krystalu soustavou zrcadel tak, aby úhel dopadu na fázové rozhraní vyhověl podmínce totálního odrazu. Měřený vzorek je v dokonalém kontaktu s ATR krystalem a záření proniká částečně do analyzovaného materiálu. Při totálním odrazu na rozhraní opticky hustšího prostředí (ATR krystal) s prostředím opticky řidším (zkoumaný vzorek) vzniká tzv. evanescentní vlna elektromagnetického záření v oblasti absorpce. Protože intenzita evanescentní vlny klesá exponenciálně se vzdáleností od rozhraní (řádově  $\mu\text{m}$ ), musí být dosaženo těsného kontaktu mezi vzorkem a krystalem. To lze zajistit u kapalných vzorků. Pokud měřený vzorek absorbuje záření o určité frekvenci, pak tato složka bude v totálně odraženém záření zeslabena. Takto získané spektrum se do značné míry podobá spektru změřenému v transmittančním režimu. Penetrační hloubka do povrchu vzorku je řádově v jednotkách  $\mu\text{m}$ , tzn. charakterizujeme pouze velmi tenké povrchové vrstvy, avšak vzhledem k násobnému odrazu na fázovém rozhraní získáme velmi kvalitní spektrum, ekvivalentní transmisnímu spektru měřenému při tloušťce vzorku řádově desítek  $\mu\text{m}$ . Používají se krystaly např. ZnSe, diamantu, AgCl, Si, Ge, safíru, KRS-5 (směs halogenidů thalných) [14]. Dnes se jako standardní měřicí technika používá převážně lichoběžníkového ZnSe krystalu v horizontálním uspořádání (obr. 9).



Obr. 9 Princip zeslabené totální reflektance (ATR) [15]

ATR spektrum vzorku je ovlivněno vlnovou délkou infračerveného záření ( $\lambda$ ), poměrem indexů lomu měřeného vzorku a ATR krystalu, efektivní dráhou záření (EPL), úhlem dopadu záření na fázové rozhraní ( $\Theta$ ) a kontaktem mezi měřeným vzorkem a ATR krystalem. Výsledná hloubka penetrace záření do vzorku je definována vztahem (4). Je to vzdálenost od rozhraní vzorek/krystal, kde intenzita evanescentní vlny klesne na  $1/e$ , tj. přibližně 37 % své původní hodnoty [16]:

$$d_p = \frac{l}{2pn_k \sqrt{\sin^2 \Theta - \left(\frac{n_v}{n_k}\right)^2}} \quad [\mu\text{m}] \quad (4)$$

$d_p$ - hloubka průniku záření	$[\mu\text{m}]$
$\lambda$ - vlnová délka záření	$[\mu\text{m}]$
$\Theta$ - úhel dopadu záření na fázové rozhraní	$[\circ]$
$n_k$ - index lomu krystalu	$[-]$
$n_v$ - index lomu vzorku	$[-]$

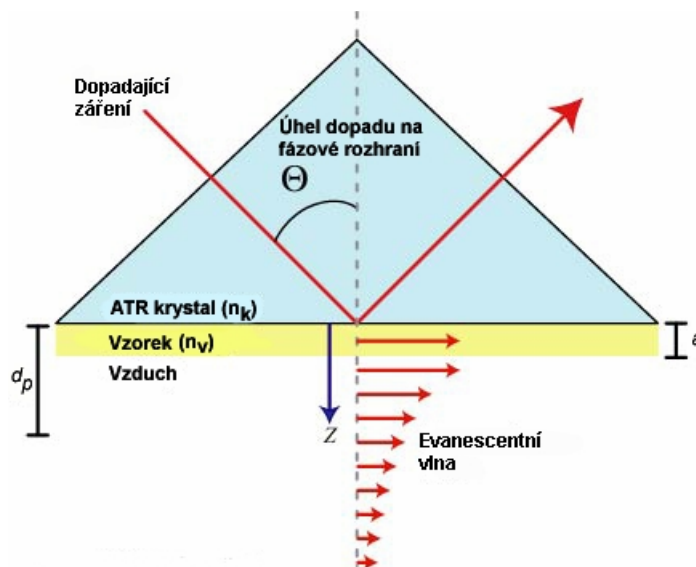
Při průchodu záření krystalem a jeho následným dopadem na zkoušený vzorek mohou nastat čtyři případy:

- paprsek záření prochází vzorkem,
- dochází k částečnému odrazu, kdy část paprsku prochází vzorkem,
- paprsek záření prochází po rozhraní krystalu a vzorku,
- totální odraz paprsku záření.

K totálnímu odrazu (obr. 10) dojde v případě, že úhel dopadu  $\Theta$  je větší než mezní úhel  $\Theta_m$  podle vztahu (5):

$$\Theta \geq \Theta_m \quad \text{kde} \quad \sin \Theta_m = \frac{n_v}{n_k} \quad (5)$$





Obr. 10 Totální odraz záření v krystalu [17]

Z uvedených výrazů (4), (5) je patrné, že penetrační hloubka infračerveného záření do vzorku závisí na vlnové délce záření. S vlnovou délkou záření se zvyšuje hloubka penetrace. Z toho pak plyne, že se relativní intenzity pásů ve spektru snižují s rostoucími hodnotami vlnočtů ve srovnání se spektry v transmittančním modu. Tento jev je matematicky kompenzován, ATR korekce je standardní součástí softwarového vybavení FTIR spektrometrů.

Index lomu krystalu má dva účinky. Se vzrůstem indexu lomu krystalu klesá kritický úhel a snižuje se penetrační hloubka záření (např. výměnou krystalu ZnSe ( $n=2,4$ ) za krystal Ge ( $n=4$ )). Současně se tím sníží efektivní dráha paprsku a relativní intenzita pásů ve spektru.

Zatímco intenzita pásů v transmittančním spektru je ovlivněna tloušťkou vzorku, v ATR technice je obdobnou veličinou tzv. efektivní dráha průniku (EPL - Effective Penetration Length), která je definována jako penetrační hloubka ( $d_p$ ) násobená počtem reflexí ( $N$ ) infračerveného záření v ATR krystalu podle vztahu (6) [16]:

$$EPL = d_p N \quad [\mu\text{m}] \quad (6)$$

Počet reflexí lze vypočítat podle vztahu (7):

$$N = \frac{l}{t} \cot \Theta \quad [-] \quad (7)$$

$l$  - délka krystalu [mm]

$t$  - tloušťka krystalu [mm]

$\Theta$  - úhel dopadu záření na rozhraní [°]

Z výrazu (6) plyne, že s větším úhlem dopadu se snižuje počet reflexí a tím i intenzita pásů ve spektru. Vzhledem k tomu, že je hloubka penetrace záření do vzorku řádově v mikrometrech, je velmi důležité dodržovat dobrý kontakt vzorků s krystalem. To platí zejména pro pevné vzorky. Pro zajištění reprodukovatelnosti měření je nutné pokrýt celou plochu krystalu vzorkem.



Lze tedy shrnout, že mezi faktory ovlivňující ATR absorpci patří

- vlnová délka IČ záření,
- index lomu vzorku,
- hloubka průniku záření,
- efektivní délka průniku záření,
- úhel dopadu záření na rozhraní,
- kontakt vzorku s krystalem,
- materiál krystalu (index lomu, propustnost pro IČ záření) [16].

### 2.6.2 Ferrografie

Ferrografie je metoda založená na principu separace otěrových částic z opotřebeného oleje. Zkoumání ferrogramu (stopy) tvořené částicemi usazenými na podložce ferrografu je nejučinnější částí tribologických analýz. Vyhodnocení se provádí buď ferrodenzimetrem (přímočtená ferrografie) nebo bichromatickým mikroskopem (analytická ferrografie).

Bichromatickým mikroskopem se rozumí speciální mikroskop vzniklý jako kombinace biologického mikroskopu pro zkoumání transparentních preparátů (osvětlení zespoda – transmitantní – prosvěcuje preparát; světlo poté vstupuje do objektivu) a metalurgického mikroskopu pro zkoumání neprůsvitných mikrovýbrusů (preparát je osvětlován objektivem a reflexní – odražené světlo je zpět přijímáno objektivem).

Ferrografie umožňuje určit nejen obsah otěrových částic kovů, ale i tvar a velikost. Tyto údaje jsou důležité k určení režimu a druhu opotřebení, původu a intenzitě opotřebení.

Přednosti ferografických metod:

- Ferrografie je bezdemontážní diagnostická metoda umožňující na základě částicové analýzy opotřebeného oleje objektivně určit režim opotřebení mechanické soustavy a jejich částí.
- Na základě počtu a morfologie částic lze určit trend opotřebení a preventivními opatřeními zabránit vzniku mezního či havarijního opotřebení.
- Lze určit druh materiálů, ze kterých otěr vznikl a jejich původ (místo opotřebení).
- Z výsledků ferografické analýzy lze také určit vliv provozních podmínek na intenzitu opotřebení.

Zásadní pozornost je nutno věnovat metodice odběru vzorků oleje z mazací soustavy motoru, převodovky či jiné tribologické soustavy. Aby mohl být na základě ferografických analýz správně posouzen technický stav zařízení, je nezbytné, aby vzorek oleje byl reprezentativní, tedy parametry distribučních funkcí velikosti, procentického zastoupení, tvarových znaků a jiných vlastností částic otěrových kovů musejí být shodné ve vzorku kapaliny i v celém jejím objemu v soustavě zařízení.

#### **Přímočtená ferrografie (Direct Reading Ferrography)**

Přímočtená ferrografie dává rychlý odhad množství otěrových částic ferromagnetických slitin kovů vyskytujících se ve vzorku oleje. Využívá sedimentace částic při průtoku vzorku oleje v silném nehomogenním magnetickém poli. Částice se usazují podle své velikosti (tab. 1). Olej potom odplaven speciálním rozpouštědlem.

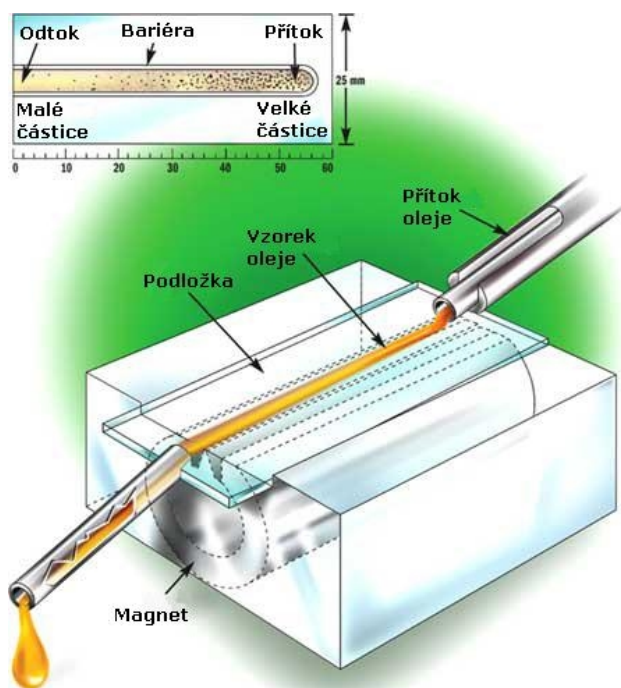
Pro přímočtenou ferrografii jsou důležité dvě skupiny:

- „malé“ částice  $D_S$ : menší než 5  $\mu\text{m}$ , odpovídají normálnímu adhezivnímu opotřebení,
- „velké“ částice  $D_L$ : větší než 15  $\mu\text{m}$ , nárůst četnosti jejich zachycení je varovným příznakem blížící se poruchy dílů, omývaných olejem.

Tab. 1 Morfologie otěrových částic v závislosti na režimu opotřebení [16].

Režim opotřebení	Index intenzity opotřebení WSI	Morfologie otěrových částic
I. záběhový	10 – 100	Husté adhezivní řetízky, abrazivní srpečky a mečičky, volné lamelární částice
II. nepatrný	0 – 10	Adhezivní částice tvořící lesknoucí se řetízky do velikosti 15 $\mu\text{m}$
III. velmi mírný	10 – 100	Lístkové adhezivní částice tvořící lesknoucí se řetízky
IV. střední	100 – 500	Lamelární zářící částice o velikosti do 150 $\mu\text{m}$
V. střední až velký	500 – 1 000	Velké nepravidelně ohraničené částice hroznovitého seskupení, tmavé oxidy a sféroidy, povrch rozrytý a zoxidovaný
VI. velký až mezní	1 000 – 2 000	Velké částice nepravidelného tvaru, barvy tmavé až černé velikost nad 150 $\mu\text{m}$
VII. havarijní	nad 2 000	Makroskopické třírozměrné částice, sféroidy a abrazivní částice, velikost až 1 mm

Optická hustota nanesené stopy se u velkých částic opotřebení ( $D_L$ ) na ferrogramu zjišťuje ve vzdálenosti 57 mm před místem, kde olej opouští hranu magnetu (obr. 11). Pro malé částice ( $D_S$ ) je to 53. mm. Těsně před poruchou ložiska, ozubených kol apod. prudce roste četnost výskytu velkých otěrových částic.



Obr. 11 Schéma ferrografu [19]

Index intenzity opotřebení se vypočítá ze vztahu:

$$WSI = (D_L^0 + D_S^0) \cdot (D_L^0 - D_S^0) = (D_L^0)^2 - (D_S^0)^2 \quad (8)$$

Růst WSI (Wear-Severity Index) je způsoben abnormálním urychleným opotřebením třecích dvojic [18].

### **Analytická ferrografie (Analytical Ferrography)**

Analytická ferrografie navazuje na přímočtenou ferrografii. Při zjištění, že v mazané soustavě dochází k abnormálnímu opotřebení, umožňuje právě analytická ferrografie získat podrobnější informace o stavu soustavy. Vypovídá o skutečném technickém stavu mazací soustavy a mazaných dílů i o způsobu opotřebení jednotlivých třecích dvojic.

Ferrogramy připravené z odebraných vzorků oleje jsou podrobeny zkoumání v tzv. bichromatickém mikroskopu. Ferromikroskopické vyšetření ferrogramů má charakter kvalitativní i kvantitativní, zahrnuje určení tvaru, velikosti a chemického složení částice, případně mechanismu jejího vzniku. Kvantitativně je posuzován tvar některých typických částic v zorném poli. Při zpracování na počítači je možno s využitím analýzy digitálního obrazu podstatně rozšířit možnosti kvantitativního hodnocení morfologie částic např. o různé tvarové faktory [20].

### **Příprava a ředění vzorků**

Před počátkem ferrografické analýzy musí být vzorek nejprve homogenizován, neboť za dobu uplynulou mezi jeho odběrem a analýzou již došlo k částečné či úplné sedimentaci částic na stěny odběrné nádoby. Vzorek nutno ohřát na teplotu cca 65 až 70 °C a poté intenzivně protřepávat po dobu asi pěti minut.

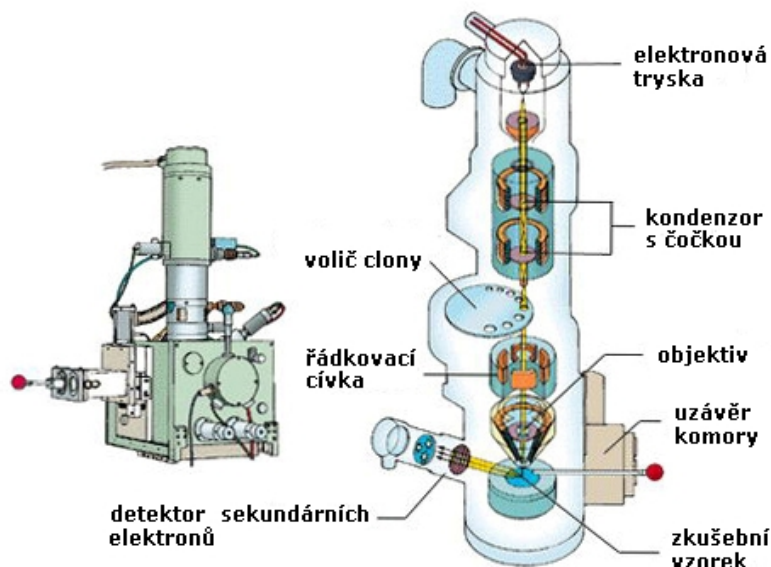
Poté se přistoupí k ředění vzorku, jehož účelem je dosažení vhodné viskozity roztoku oleje se ředidlem. Při správné viskozitě je v magnetickém poli ferrografu vytvářena rovnoměrně hustá stopa otěrových částic. Příliš viskózní olej brzdí částice při jejich sestupu k povrchu podložní folie, a proto nezachytí velkou část otěrových částic. Naopak příliš málo viskózní roztok oleje se ředidlem vyvolává tzv. jamming, tj. překrývání částic přes sebe, což znehodnocuje ferrogram. Příčinou jammingu je nadměrná sedimentační rychlost při usazování částic, kdy velké i malé částice sedimentují poblíž bodu vtoku oleje na podložní folii. Vhodnými ředidly jsou chloroform (tetrachlor), xylén, i technický benzín po ultrafiltraci. Pro potřeby analytické ferrografie je vhodný poměr ředění cca 3 až 4 ml vzorku oleje ku 1 ml ředidla. Silně znečištěné oleje před ředěním se naředí jemně přefiltrovaným olejem stejné značky.

Po protlačení roztoku ferrografem je nutné z folie odstranit zbytky maziva, které se postupně protlačováním, cca 4 až 5 ml ředidla ferrografem odstraňují. Proplachování je možno provádět opakovaně až do úplného odstranění zbytků oleje. Zbytky ředidla se na vzduchu odpaří. Poté se folie vyjme z ferrografu [21].

### **2.6.3 Řádkovací elektronová mikroskopie (REM)**

Elektronový mikroskop je přístroj, který k zobrazení předmětů využívá vlnových vlastností elektronu. Od optického (světelného) mikroskopu, využívajícího pro dosažení požadovaného zvětšení soustavu optických čoček, se liší tím, že se používají nikoli světelné paprsky, ale svazek elektronů [22]. Elektron se chová podobně jako světlo, jeho vlnová délka je ale výrazně kratší a tak je možné sledovat menší předměty než za pomoci světla. Řádkovací elektronový mikroskop (SEM (Scanning electron microscope)) je laboratorní přístroj, který je charakterizován postupným vytvářením obrazu, dosahování zvětšení elektronickou, nikoli

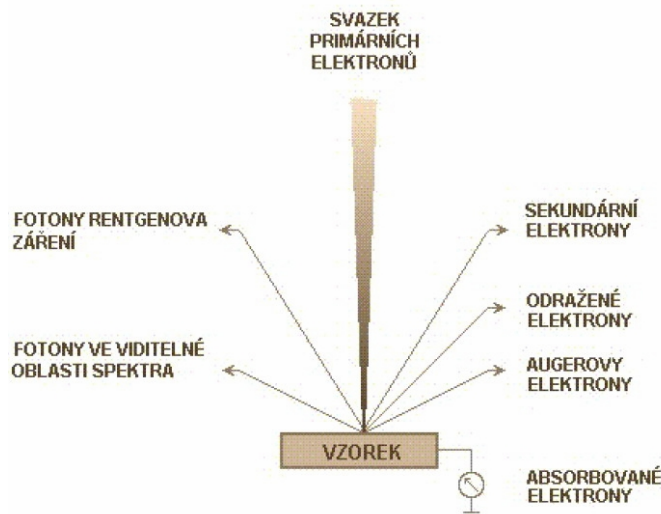
optickou cestou a užitím ostře fokusovaného svazku jako pomocného prostředku k vyvolání fyzikálního signálu, jenž je teprve vlastním zdrojem informací o místě, na něž primární elektronový svazek dopadá (obr 12). Elektrony emitované katodou a urychlované kladným napětím na anodě vytvářejí primární svazek, který je elektromagnetickými čočkami ostře fokusován na povrchu sledovaného vzorku. Vychylovací cívky řádkovacího systému umožňují, aby tento svazek bod po bodu a řádek po řádku systematicky přejížděl (řádkoval) vymezenou oblast podobným principem jaký se využívá v televizní technice. V závislosti na druhu zpracovávaného signálu je možno získat informace nejen o povrchové topografii a morfologii útvarů vytvářejících povrchový reliéf, ale také o lokálních změnách v chemickém složení a o některých fyzikálních vlastnostech vzorku [23].



Obr. 12 Schéma elektronového řádkovacího mikroskopu [24]

### Interakce primárního elektronového svazku s povrchem vzorku

Elektrony primárního elektronového svazku dopadají v REM na povrch pevného vzorku s energií tisíců až desítek tisíc eV. Pronikají do určité hloubky pod povrch a jsou látkou rozptylovány a absorbovány [23]. Svazek elektronů z vhodného zdroje (tzv. elektronová tryska např. žhavené wolframové vlákno) je urychlený napětím až 50 kV je zaostřen na plošku tuhého vzorku (průměr svazku je 1–5  $\mu\text{m}$ ). Při dopadu elektronů dochází současně k několika procesům: část elektronů je absorbována, část odražena (pružné elektronové srážky), dochází k emisi sekundárních elektronů (nepružné srážky) a k emisi rentgenového záření (obr. 13) [25].



Obr. 13 Interakce primárního elektronového svazku s povrchem vzorku [26]

Primární elektrony, které při průchodu hmotou ztratily značnou část své energie, se nakonec pohybují difúzním pohybem a označují se jako elektrony absorbované [23]. Absorbované elektrony tvoří 50-90% celkového proudu elektronů [27]. Nemohou již ionizovat hlubší vrstvy atomového obalu, ale mohou excitovat elektrony na vnějších orbitech. Uvolněné vnější elektrony mají energii nejvýše 50eV a patří do kategorie tzv. pravých sekundárních elektronů (SE – Secondary electrons). Sekundární elektrony jsou emitovány z povrchové vrstvy o tloušťce asi jen 10nm. Horní hranice energetického spektra sekundárních elektronů je 50eV. Jde tedy o elektrony s energií o něco vyšší, než je dostačující k jejich uvolnění z povrchu vzorku. Některé primární elektrony po ztrátě části energie opouštějí vzorek jako odražené elektrony s nižší energií [23]. Odražené elektrony mají energii poněkud menší než elektrony dopadající, ale řádově srovnatelnou, zatímco sekundární elektrony mají energii podstatně nižší. SE se mohou dostat maximálně z hloubky několika nanometrů, protozobrazení SE přináší informaci pouze o povrchové vrstvě [27]. Získávání obrazu pomocí sekundárních elektronů, který by dokumentoval topografické změny na povrchu vzorku, je hlavním a nejčastějším posláním REM. Ze signálů, jež se mohou ke stejnému účelu využít, je vůbec nejvýhodnější neboť poskytuje obraz nejpréhlednější i při nejlepší dosažitelné rozlišovací schopnosti. Emise sekundárních elektronů je tak citlivá na úhel, pod nímž na povrch dopadá primární svazek, že lze stanovit rozdíly v orientaci jednotlivých mikrooblastí kolem 2°. Čím je úhel dopadu primárního svazku menší, tím silnější je emise sekundárních elektronů [23].

Primární elektronový paprsek při kontaktu se vzorkem tedy produkuje nejenom sekundární elektrony, ale i zpětně odražené elektrony (BSE - Backscattered electrons). Ty mají na rozdíl od sekundárních elektronů vyšší energii a daný směr. Všechny emise nad 50 eV jsou považovány za zpětně odražené elektrony [23]. Protože oba tyto typy elektronů charakterizují morfologii povrchu vzorku, jsou registrovány a analyticky využívány. Snímání zpětně odražených elektronů je užitečné při odlišování materiálů, jelikož výtěžek zpětně odražených elektronů vzrůstá s atomovým číslem. Při tomto snímání lze s dobrým kontrastem odlišit prvky, jejichž rozdíl atomových čísel je roven alespoň 3. Fáze s vyšším průměrným protonovým číslem odrážejí elektrony více a odpovídají jim tak na obrazovce světlejší plochy [27]. Obraz povrchových nerovností vytvořený pomocí odražených elektronů je velmi kontrastní a vlivem přímočarého pohybu elektronů prostý jakýchkoli detailů v oblasti stínů. Proto není ovšem tak kvalitní jako obraz pomocí elektronů sekundárních (nejde jen o způsob osvětlení, ale i rozlišovací schopnost) a využívá se pouze k popisu detailů oblastí analyzovaných elektronovým mikroanalýzátorem [23]. Moderní přístroje umožňují

definované mixování signálů jak sekundárních tak i odražených elektronů. Toto dovoluje využití pozitivních vlastností obou režimů a získání tak požadované obrazové informace.

### **Aplikace REM**

REM se uplatňuje především jako mikroskopická technika v nejběžnějším slova smyslu, tedy technika sloužící ke zviditelňování topografických detailů a morfologie fází přítomných ve struktuře vrstev. Ve srovnání se SM a TEM (Transmisní elektronová mikroskopie) má potom REM některé výhody, které se projevují především při studiu povrchových vrstev různého původu. Jednou z předností REM při této aplikaci je možnost volby zvětšení v rozsahu, který pokrývá působnost SM, zasahuje pásma zvětšení TEM a překrývá mezeru zvětšení mezi oběma těmito mikroskopickými technikami s tou výhodou, že přechod od nejmenších zvětšení, tj. asi 10krát, až po největší užitečné, tj. asi 20 000krát, je poměrně plynulý [23].

Při malých zvětšeních, kdy se může REM srovnávat s SM, je hlavní předností REM mimořádná hloubka ostrosti, větší až asi 3000krát než SM. Tato výhoda se přirozeně projevuje i při zvětšeních na úrovni TEM, ale protože i TEM má velkou hloubku ostrosti, není tak významná jako možnost studovat nerovný povrch přímo, bez potřeby zhotovovat repliky. Speciální pracovní možnosti REM mají význam zejména pro identifikaci strukturních fází, tedy pro definici jejich chemického složení a krystalové stavby [23].

### **EDX – Energiově disperzní spektroskopie**

EDX se používá jako přídavné zařízení k řádkovacímu mikroskopu. Smyslem kvalitativní bodové mikroanalýzy je buď v mikroobjemu o velikosti několik málo  $\mu\text{m}^3$  prokázat přítomnost určitého, předem vytypovaného prvku, nebo provést spektrální analýzu. EDX slouží k rychlému určení kvalitativního složení vzorku a s využitím standardů i semikvantitativního složení vzorku [23]. Při bombardování vzorku primárními elektrony vzniká rentgenové záření, jehož detekce je zajištěna energiově disperzním spektrometrem. Výstupem analýzy EDX je spektrum četnosti rentgenového signálu v jednotlivých energetických oknech, což jsou charakteristické píky, které odpovídají jednotlivým prvkům a jejichž výška je úměrná koncentraci daného prvku ve vzorku.

Přednosti energiově disperzní spektroskopie jsou jednoduchá obsluha, rychlé přehledné zpracování naměřených dat a možnost operativně přesně srovnávat získané spektrum nebo jeho část s polohou hlavní spektrální čáry nebo spektrálních čar hledaných prvků [23].

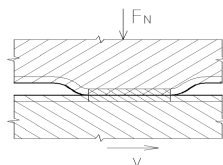
## **2.7 Opotřebení oleje v provozu**

Opotřebení částí strojů je příčinou 70 až 80 % jejich výpadků v provozu. Z toho je 20 % přičítáno korozi a 50 až 60 % fyzickému opotřebení. Opotřebení je důsledek nesprávného mazání. Příčinou nesprávného mazání jsou nejčastěji použití nesprávného maziva, degradace použitého maziva vlivem jeho oxidace, abrazivní a erozivní opotřebení vlivem částic nečistot přítomných v mazivu a přetížení s následkem porušení mazacího filmu.

### **2.7.1 Druhy opotřebení v provozu**

#### **Adhezivní opotřebení**

Adhezivní opotřebení je normálním, žádoucím, mírným a postupným opotřebením spolupůsobících povrchů (obr. 14). Adhezivní otěr je výsledkem normálních kluzných a valivých podmínek třecích dvojic ve stroji.



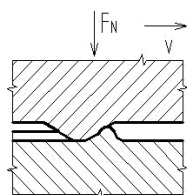
Obr. 14 Princip adhezivního opotřebení [28]

Během záběhu stroje dochází k vyrovnávání nerovností povrchu daných výrobou, jsou ulamovány výstupky a jemné úlomky vyplňují propadlá místa a mikroskopické rýhy. Tím je povrch vyrovnáván a zjemňován. Rozrušováním povrchových struktur dochází ke tvorbě tzv. Beilbyho vrstvy, což je smyková smíšená vrstva krystalitů (tj. mikroskopických krystalků kovů) podobná newtonovské kapalině o vysoké viskozitě (Binghamův plast). Pro oceli dosahuje tloušťka Beilbyho vrstvy cca 1  $\mu\text{m}$ . Tekutost (superplasticita) Beilbyho vrstvy je faktorem, který nejvíce vyrovnává povrch třecí dvojice, neboť můstky Beilbyho vrstvy překrývají jamky a prohlubně povrchu a naopak na výstupcích Beilbyho vrstva chybí. Výstupky jsou ulamovány působením třecích sil. Při normálním tření ve dvojici je Beilbyho vrstva v dynamické rovnováze – stejnou rychlostí, jakou je stírána s povrchu dílu, opět vzniká třením. Na konci životnosti třecí dvojice, a to zejména při únavovém procesu povrchu, se Beilbyho vrstva zhroutlí a je oddělována rychleji, než se tvoří. Proto také roste velikost oddělovaných šupin kovu, a to z původních 5 až 15 mikrometrů na 50 až 200  $\mu\text{m}$ , což je velikost částic před poruchou stroje. Normální částice adhezivního opotřebení jsou hladké, lesklé šupinky se zcela rovným povrchem a oválným okrajem bez vydrolených míst, bez jakýchkoliv rýh a mikrojamek na povrchu. Velikost normálních částic se pohybuje mezi 1 a 20  $\mu\text{m}$ . Částice jsou tenké lístky čistého kovu bez oxidace povrchu. Poměr dominantního rozměru ku tloušťce malých částic je asi 3:1, poměr dominantního rozměru ku tloušťce velkých částic je asi 10:1. Znečištění oleje abrazivy, zejména křemičitany a  $\text{SiO}_2$ , prudce zvýší rychlost separace Beilbyho vrstvy, a to při neměnné rychlosti její tvorby, a proto se součásti rychleji opotřebovávají. Nález většího počtu abrazivních částic na ferrogramu nemusí být provázen výskytem typických částic řezného opotřebení, ale spíše vyšší koncentrací adhezivního otěru. Rovněž velikost částic roste a jejich povrch je poněkud hrubší. Po výměně maziva za čisté se situace zpravidla vrátí do normálních mezí.

### Abrazivní opotřebení

Abrazivní opotřebení vzniká oddělováním částic z funkčního povrchu působením tvrdého a drsného povrchu druhého tělesa, nebo účinkem abrazivních částic. Projevuje se rýhováním povrchu (obr. 15). Abrazivní opotřebení nastává

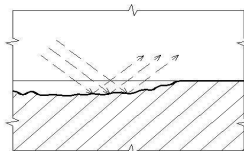
- při interakci dvou těles, kdy tvrdé částice způsobují opotřebení funkčního povrchu součásti stroje (opotřebení zubů rypadel),
- při interakci tří těles, kdy částice (mechanické nečistoty) z okolního prostředí vniknou na funkční povrch pohybových mechanismů (opotřebení pístních kroužků, čepů, kluzných ložisek atd. mechanickými nečistotami v oleji).



Obr. 15 Princip abrazivního opotřebení [28]

### Erozivní opotřebení

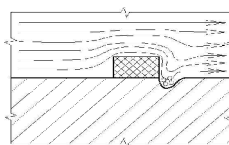
Erozivní opotřebení (narušování povrchů částicemi nesenými proudem média) se projevuje nerovnoměrným porušením funkčního povrchu a často jeho výrazným zvlněním způsobeným turbulencí proudícího média (obr. 16). Poškození může zasahovat do značné hloubky. Setkáváme se s ním např. u čerpadel a potrubí.



Obr. 16 Princip erozivního opotřebení [28]

### Kavitační opotřebení

Kavitační opotřebení vzniká oddělováním a poškozováním povrchu součástí v místech zániku kavitačních dutin (obr. 17). Ke kavitačnímu opotřebení dochází např. u kluzných ložisek, v hydraulických systémech, na vnějších plochách vložek válců spalovacích motorů chlazených vodou atd.

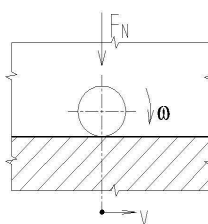


Obr. 17 Princip kavitačního opotřebení [28]

### Únavové opotřebení

Především s únavou valivých ložisek (obr. 18) bývají spojeny tři charakteristické typy částic:

- sferoidní artefakty,
- oblázkovité částice únavového vydrolování,
- lamelární (deskové, lupínkovité) částice.



Obr. 18 Princip únavového opotřebení [28]

Sferoidní artefakty jsou částice s tvarem téměř dokonalé koule. Poprvé byla jejich tvorba dána do souvislosti s únavovým vydrolováním valivých drah kuličkových ložisek. Kuličky vznikají tak, že cyklickým zatěžováním kroužku při odvalování tělísek vznikají v materiálu kroužku smyková napětí, dosahující svých maxim v určité hloubce pod povrchem. V této hladině se začnou tvořit jemné mikrotrhliny ve směru rovnoběžném s povrchem valivé dráhy. Po propojení trhlin a jejich nasycení olejem dochází ke komplikovanému jevu vydrolování a zaoblování částic za cyklického působení velkých hydrodynamických tlaků. Kuličky nemusejí být generovány jen valivými ložisky. Vznikají stejně tak při fretting-korozi, při



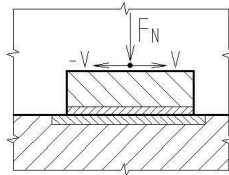
broušení apod., vždy při pomalém růstu únavové trhliny zasahující do olejem smáčeného povrchu. Kuličky mají průměr zpravidla od 1 do 5 mikrometrů.

Oblázkovité částice únavového vydrolování mají hrubý a porézní povrch. Vznikají vypadáváním částic povrchu jako výsledek únavových procesů. Na částicích únavového vydrolování se nenacházejí červené oxidy železa. Detekce částic únavového vydrolování by měla být vždy signálem pro odstávku zařízení z provozu.

Lamelární částice vznikají po průchodu částice místem valivého kontaktu – tedy jejím „rozválcováním“. Jsou to velmi tenké lístkovité částice s poměrem převládajícího rozměru ku tloušťce asi 30 až 50:1 a na jejich povrchu je velké množství mikrojamek a děr. I když se lamelární částice tvoří po celou dobu života zařízení, na počátku únavového vydrolování jejich množství prudce stoupá.

### Vibrační opotřebení

Vibrační opotřebení se projevuje oddělováním částic a poškozováním povrchu materiálu vzájemnými kmitavými tangenciálními posuny funkčních povrchů při působení normálového zatížení (obr. 19). Amplitudy vibrací mají velikost do 100  $\mu\text{m}$ . Dochází k němu u různých pohyblivých uložení, do nichž se přenáší vlastní nebo cizí buzené kmity, např. valivá ložiska a čepy hřídelů.



Obr. 19 Princip vibračního opotřebení [28]

### Kombinace valivého a kluzného tření

Částice generované při odvalování boků zubů ozubených kol po své dělicí kružnici mají mnoho společného s částicemi vytvářenými ve valivých ložiscích. V místech čistě valivého tření, tedy na záběrné čáře, se tvoří hladké a lesklé částice s nepravidelným okrajem, s poměrem hlavního rozměru k tloušťce od 5:1 do 10:1. Drobné rysky na povrchu jsou výsledkem smykových napětí na konci odvalování, způsobujících rozšíření pittingu i na korunu a patu zubu. Zadírání zubů je vyvoláno vysokými kontaktními tlaky na povrchu zubů a velkými kluznými rychlostmi při nedostatečné viskozitě maziva a únosnosti mazacího filmu. Film maziva je prolomen, dochází k silné adhezi a ke kontaktním mikrosvarům zubů. Vytrháváním svařených mikromůstků se vytvářejí charakteristické částice s hrudkovitým, hluboce rozbrázděným povrchem. Na povrchu částic lze často pozorovat „kalicí barvy“ (temper colours) jako důsledek interference světla na fázovém rozhraní kovu a vrstvy jeho oxidu.

K těžkému opotřebení dochází při nenormálním zatížení, které často souvisí s poruchou mazání (absence maziva, nízká viskozita oleje naředěného palivem, příliš vysoká teplota apod.). Ochranná povrchová vrstva maziva se v těchto případech rozrušuje rychleji, než se tvoří. Dochází k bezprostřednímu styku třecích povrchů, ty jsou narušeny do hloubky. Zplodinou opotřebení je ořez velikosti 10 až 100  $\mu\text{m}$ . Proces je destruktivní a může vést zadření motoru (tab. 2).

Tab. 2 Klasifikace druhů opotřebení podle velikosti otěrových částic [29]

normální		- otěr velikosti do 3 $\mu\text{m}$
nenormální	těžké	- otěr velikosti do 10 $\mu\text{m}$
	destruktivní	- otěr velikosti nad 100 $\mu\text{m}$

Toto dělení je užíváno pro opotřebení motorů. Pro ostatní agregáty (např. převody) je klasifikace otěrových částic v jiné, vyšší hladině.

### 2.7.2 Druhy znečištění oleje

#### Nekovové částice

Nekovové částice jsou na ferrogramech rovněž zachytávány, neboť i nemagnetické částice, stejně jako částice paramagnetických kovů podléhají gravitační sedimentaci při proudění oleje nad ferrografickou podložní folií. Jejich sedimentační rychlost se zvýší v případě, že jsou ferromagnetické (např. černý hematit) nebo že na svém povrchu nesou drobný ferromagnetický příděl. Jejich rozdílné sedimentační rychlosti způsobují, že se tyto částice nacházejí po celé délce ferrogramu, zejména však na konci stopy před výtokem oleje do odpadní nádoby.

Zdroje znečištění motorového oleje jsou často částice karbonu z nedokonalého spálení paliva, nečistoty a prach ze vzduchu. Částice prachu jsou obvykle tvrdší než kovové částice a mohou být příčinou velkého abrazivního opotřebení až poškození vnitřních povrchů motoru.

#### Palivo v oleji

Palivo přítomné v oleji snižuje jeho viskozitu a v krajním případě může zmenšit tloušťku olejového mazacího filmu pod kritickou mez. V rámci souboru analýz, kterými se obvykle monitorují motorové oleje v provozu, se přítomnost paliva v oleji projeví v rámci měření jiných parametrů, především viskozity a bodu vzplanutí. Bod vzplanutí bývá považován za kritický, klesne-li pod hodnotu 180 – 190  $^{\circ}\text{C}$  [16].

#### Chladicí kapalina v oleji

Průnik chladicí kapaliny do motorového oleje znamená velmi rychlou degradaci olejové náplně v důsledku tvorby úsad nerozpustných v oleji, v jejichž přítomnosti i samotný olej rychle stárne. Koncentrace chladicí kapaliny v oleji by neměla překročit hodnotu 0,02 % hm. Přítomnost chladicí kapaliny lze prokázat např. IČ – spektrometrií [30].

#### Voda v oleji

Voda v motorovém oleji má korozivní účinky a může způsobit i zadření motoru. Kromě toho vyvolává také kolaps aditiv, neboť omezuje jejich rozpustnost v oleji a podporuje jejich vysrážení z olejové fáze. Obecně přijímanou hranicí, udávající maximální přípustný obsah vody, je 0,1 % hm. Zjišťuje se více způsoby, např. titrací podle K. Fischera, coulometrickou titrací, destilací s toluenem nebo s benzenem a FTIR spektrometrií [30].

### 3. Experimentální část

Experimentální část této práce se zabývá hodnocením opotřebením motorů a motorových olejů. Při servisních prohlídkách byly odebrány olejové filtry a motorové oleje celkem z osmi vozidel. U jízdní soupravy s tahačem Mercedes-Benz Actros 1844 byl během sledovaného období odběr proveden dvakrát. Testovány byly i tři vzorky kompresorových olejů odebraných v Synthesii Pardubice. Jako vhodné a zároveň dostupné metody hodnocení opotřebením byly zvoleny infračervená spektrometrie s Fourierovou transformací (metoda horizontální ATR), analytická ferrografie a elektronová mikroskopie.

#### 3.1 Odběr vzorků

Odběr vzorků motorových olejů prováděli kvalifikovaní pracovníci autoservisů. Vždy byly důsledně dodržovány následující podmínky

- ohřátí motorového oleje běžným chodem motoru na provozní teplotu (min. 65 °C),
- důkladné očištění výpustného šroubu,
- uvolnění výpustného šroubu a odebrání 200 ml vzorku oleje do vzorkovnice o objemu 250 ml,
- důkladné uzavření vzorkovnice,
- vyšroubování olejového filtru pomocí speciálního klíče,
- vyplnění štítku s údaji (číslo vzorku, značka a typ vozidla, rok výroby, objem a označení motoru, celkový počet kilometrů, počet kilometrů před výměnou oleje, značka a typ oleje).

##### 3.1.1 Odběr vzorků z Autoservisu Hybeš

Autoservis Hybeš sídlící ve Dřenicích je autorizovaným prodejcem ŠKODA Auto a je držitelem certifikátu ISO 9001 (nároky kladené na organizaci provádějící servisní práce a opravy) a ekologického osvědčení za šetrný přístup k životnímu prostředí. V rámci servisních prohlídek provedli mechanici, odborně proškolení v servisním středisku Škoda Auto, odběr olejových filtrů a vzorků motorového oleje celkem u šesti automobilů (tab. 3, 4 a 5).

Tab. 3 Odebrané olejové filtry a vzorky olejů v Autoservisu Hybeš

	Vzorek č. 1	Vzorek č. 2
Značka vozidla	Škoda	Škoda
Typ vozidla	Octavia II	Fabia
Rok výroby vozidla	2004	2004
Objem motoru cm <sup>3</sup>	1896 (1,9 TDI)	1198 (1,2 12V HTP)
Celkový počet km	83 824	60 405
Počet km před výměnou oleje	41 491	45 097
Kilometrový proběh oleje	42 333	15 308
Typ oleje	Shell Helix Ultra VX 5W30 – Longlife 3	Shell Helix Plus 5W40

Tab. 4 Odebrané olejové filtry a vzorky olejů v Autoservisu Hybeš

	Vzorek č. 3	Vzorek č. 4
Značka vozidla	Škoda	Škoda
Typ vozidla	Felicia Pickup	Fabia
Rok výroby vozidla	2000	2003
Objem motoru cm <sup>3</sup>	1289 (1,3 MPI)	1896 (1,9 TDI)
Celkový počet km	90 130	105 012
Počet km před výměnou oleje	75 063	90 003
Kilometrový proběh oleje	15 067	15 009
Typ oleje	Shell Helix Super 15W40	Mogul Racing 5W40

Tab. 5 Odebrané olejové filtry a vzorky olejů v Autoservisu Hybeš

	Vzorek č. 5	Vzorek č. 6
Značka vozidla	Mazda	Škoda
Typ vozidla	6	Fabia
Rok výroby vozidla	2004	2004
Objem motoru cm <sup>3</sup>	1999 (2,0 16V)	1198 (1,2 12V HTP)
Celkový počet km	58 483	3 893
Počet km před výměnou oleje	40 052	3 200
Kilometrový proběh oleje	18 431	693
Typ oleje	Castrol Formula SLX 0W30 - Longtec	Mogul GX-FE 10W40

### 3.1.2 Odběr vzorků z Karex a.s.

Karex a.s. je prodejcem a autorizovaným servisem vozidel nákladních vozidel Volvo. Odborně proškolený personál používá pouze originálních náhradních dílů a speciálního servisního nářadí Volvo a zaručují tak nejvyšší kvalitu služeb. Druhý plánovaný odběr nebyl uskutečněn z technických důvodů (výměna oleje byla provedena v jiném servisu).

Tab. 6 Odebraný olejový filtr a vzorek oleje v Karex a.s.

	Vzorek č. V-1
Značka vozidla	Volvo
Typ vozidla	FH 12 500
Rok výroby vozidla	2006
Objem motoru (l)	12,8
Celkový počet km	64 980
Počet km před výměnou oleje	0
Kilometrový proběh oleje	64 980
Typ oleje	OMV Eco Truck Extra 10W40

### 3.1.3 Odběr vzorků z DaimlerChrysler Automotive Bohemia s.r.o.

Společnost Holcim (Česko) a.s., která je předním českým výrobcem stavebních materiálů se sídlem v Prachovicích u Chrudimi, zakoupila pro potřebu přepravy cementu novou jízdní soupravu s tahačem Mercedes-Benz Actros 1844 (obr. 20). Během sledovaného období bylo vozidlo na dvou servisních prohlídkách, které zajišťoval autorizovaný servis DaimlerChrysler Automotive Bohemia s.r.o. Při těchto prohlídkách byl kvalifikovanými pracovníky servisu proveden odběr olejových filtrů a vzorků motorového oleje (tab. 7).

Tab. 7 Odebrané olejové filtry a vzorky olejů v DaimlerChrysler Automotive Bohemia s.r.o.

	Vzorek č. MB-1	Vzorek č. MB-2
Značka vozidla	Mercedes-Benz	Mercedes-Benz
Typ vozidla	Actros 1844	Actros 1844
Rok výroby vozidla	2006	2006
Objem motoru (l)	11,95	11,95
Celkový počet km	100 056	195 791
Počet km před výměnou oleje	0	100 056
Kilometrový proběh oleje	100 056	95 735
Typ oleje	Shell Rimula Ultra 5W30	Shell Rimula Ultra 5W30



Obr. 20 Sledovaná jízdní souprava s tahačem Mercedes-Benz Actros 1844 (vlastní foto)

### 3.1.4 Odběr vzorků kompresorových olejů v Synthesii Pardubice

Vzorky olejů byly odebrány z chladivových pístových kompresorů (tab. 8), sloužících v Synthesii Pardubice k výrobě ledu. Mazání kompresoru je tlakové, kombinované s odstříkáváním. Tlak oleje je zajištěn zubovým čerpadlem ponořeným v oleji. Nasávání je přes jemné sítko sacího filtru a vytlačován přes membránový a magnetický filtr. Dále je mazací okruh vybaven tlakoměrem a teploměrem oleje a dalšími pojistnými prvky. Teplota oleje smí být max. 70 °C, proto je chladicím médiem čpavek. Tlakovým olejem je mazáno uložení klikového hřídele a ojnicí ložiska. Kluzné plochy válce (písty, čepy a kroužky) jsou mazány odstříkem. Kompresory jsou pravidelně udržovány a procházejí servisními a generálními opravami.

Tab. 8 Odebrané vzorky olejů z kompresorů

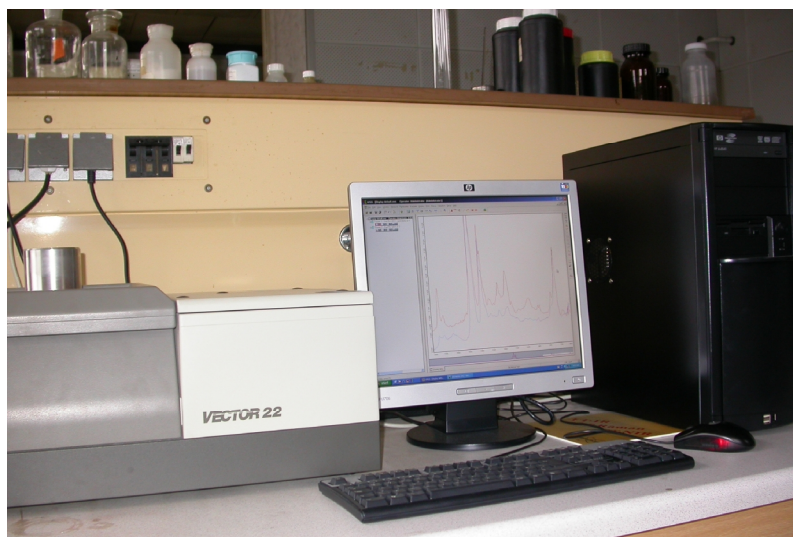
	Vzorek č. K-1	Vzorek č. K-2	Vzorek č. K-3
Výrobce kompresoru	ČKD Choceň (ČKD CHLAZENÍ, s.r.o.)		
Typ kompresoru	UK 811/NF811		
Rok výroby	1989	1990	1990
Počet hodin v provozu	1660,5	1343	1000
Typ oleje	MOGUL Komprimo ONC 68		
Viskozitní specifikace	ISO VG 68		
Výkonová specifikace	ISO 6743/3A		

### 3.2 Metodika experimentálních prací

#### 3.2.1 FTIR spektrometrie

##### Použité přístroje

K analýze odebraných vzorků byl použit spektrometr pro infračervenou oblast s Fourierovou transformací – VECTOR 22 (Bruker) (obr. 21) metodou horizontální ATR. Přístroj je umístěn v laboratoři Univerzitního ekologického centra v areálu Doubravice a je certifikován dle standardů ISO 9001.

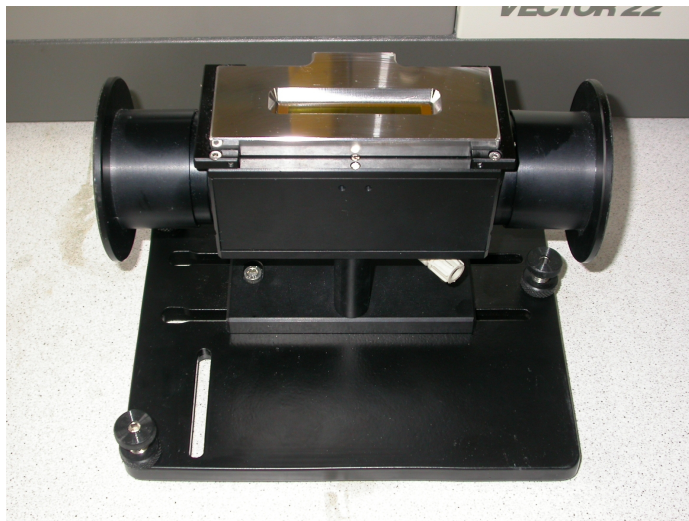


Obr. 21 Pracoviště FTIR spektrometrie (vlastní foto)

##### Základní technické parametry

Spektrometr VECTOR 22 (BRUKER) [31]:

- FTIR spektrometr pro střední infračervenou oblast, spektrální rozsah  $7\,800 - 375\text{ cm}^{-1}$ ,
- spektrální rozlišení  $1\text{ cm}^{-1}$ ,
- poměr signálu k šumu min.  $35\,000 : 1$  ( při rozlišení  $4\text{ cm}^{-1}$  za 1 minutu ),
- vzduchem chlazený detektor DTGS,
- rychlost měření  $1\text{ scan} / \text{sec}$  při rozlišení  $4\text{ cm}^{-1}$ ,
- automatická justáž, dynamické nastavování optiky,
- vlnočtová přesnost min.  $0,01\text{ cm}^{-1}$  při  $2\,000\text{ cm}^{-1}$  bez matematických korekcí,
- ordinátová přesnost min.  $0,1\% T$ ,
- uzavřená a sušená optika.
- ATR krystal ZnSe ve vaničkovém uspořádání (obr. 22)



Obr. 22 Nástavec ATR s krystalem ZnSe (vlastní foto)

#### Nastavení spektrometru:

- spektrální rozsah: 600 – 4 000  $\text{cm}^{-1}$
- rozlišení: 4  $\text{cm}^{-1}$
- počet scanů: 32
- ATR: krystal ZnSe ve vaničkovém uspořádání

#### Pracovní postup FTIR spekter

- 1) Před vlastním měřením FTIR je třeba zapnout zdroj spektrometru a nechat jej stabilizovat po dobu cca 10 – 15 min. Ten se otestuje pomocí funkce Check Signal v menu Measurement.
- 2) V menu Measurement se nastaví požadovaná metoda měření (soubor hatr.xpm) a automaticky se tak nastaví potřebné parametry.
- 3) Jestliže je přístroj připraven k měření, vloží se do nástavce horizontální ATR jednotky krystal ZnSe a zkontroluje se jeho čistota. Pomocí funkce Collect Background v menu Measurement se změří pozadí, aby byl vyloučen vliv nečistot a případné kontaminace povrchu krystalu na měření spektra vzorku.
- 4) Vyjme se krystal z komory spektrometru a nanese se na něj slabou vrstvu vzorku měřeného oleje. Ten je důležité ve vzorkovnici protřepat, aby byl vzorek homogenní. Během nanášení vzorku nesmí docházet k tvorbě vzduchových bublinek, které mohou ovlivnit výsledky měření. Poté krystal vrátíme zpátky do komory. Komora musí být otevřena co nejkratší dobu, aby se zabránilo vniknutí nečistot a vlhkosti z ovzduší laboratoře do komory spektrometru. To by mohlo ovlivnit výsledky měření.
- 5) Pro lepší orientaci ve spektrech je vhodné si v menu Measurement nastavit ke každému vzorku příslušné jméno. Samotné měření se provádí pomocí funkce Collect Sample v menu Measurement. Naměřené spektrum se po skončení měření a proběhnutí matematických transformací objeví na monitoru počítače.
- 6) Před dalším měřením je třeba krystal důkladně vyčistit. Olej se setře pomocí papírové vaty. Následně pak povrch krystalu minimálně třikrát propláchneme n-hexanem ( $\text{C}_6\text{H}_{14}$ ). Z vyčištěného povrchu krystalu se nechá v digestoři odpařit zbylý n-hexan. Tím se z dalšího měření vyloučí píky, které by zbylý n-hexan způsobil.



### Interpretace IČ spekter

Při analýze spekter se vychází ze znalosti vlnových délek (resp. vlnočtů) odpovídajících konkrétním sloučeninám nebo charakteristickým strukturním skupinám. Přehled typických skupin a sloučenin charakteristických pro motorové oleje v Tab. 9.

Tab. 9 Vlnočty charakteristických sloučenin a strukturních skupin [32]

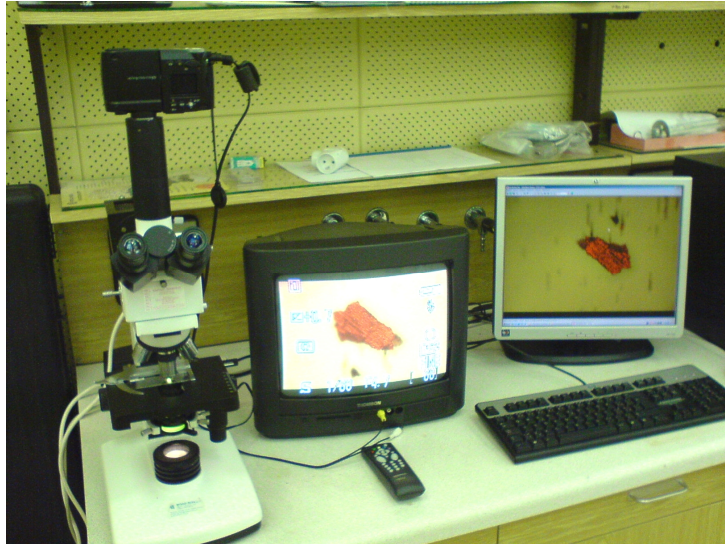
Vlnočt [cm <sup>-1</sup> ]	Sloučenina	Poznámka
3 640 – 3 540	Voda	V esterových olejích
3 600 – 3 150 (max. 3 400)	Voda	V ropných olejích
3 540	Rozklad esterů	
2 000	Saze	
1 800 – 1 670	Oxidační produkty (stárnutí)	
1 748	Estery	Syntetické oleje
1 650 – 1 600	Nitrosloučeniny	
1 180 – 1 120	Sírné sloučeniny	Sírné přísady, síra z paliva
1 070, 1 040 (dvojice)	Glykol (Ethylenglykol)	Chladicí kapalina
1 025 – 960	Protiotěrové přísady	ZnDDP, TCP
815 – 805	Nafta	
755 – 748	Petrolej	Lehčí složky

### 3.2.2 Ferrografická analýza

Cílem ferrografické analýzy je vyseparování částic z použitých olejů. Vzorek zkoumaného maziva stéká po šikmé podložce, která je umístěna v magnetickém poli. Největší částice se usazují na počátku podložky a dále se částice usazují postupně podle své velikosti a tvaru. Separace částic se provádí na ferrografu REO 1 (REO Trade, s.r.o. Ostrava). Takto připravené ferrogramy se podrobují zkoumání a následně vyhodnocují.

Vyhodnocení ferrogramů se provádí na bichromatickém trinokulárním mikroskopu H 6000 (výrobce Intraco Micro Tachlovice). Mikroskop je vybaven červeným filtrem pro reflexní osvětlení a zeleným filtrem pro transmitanční osvětlení. Na tento mikroskop je pomocí opického tubusu závitěm upevněn digitální fotoaparát Nikon CoolPix 4500, ten je pak dále spojen A/V kabelem s televizorem Thomson. Pomocí této soustavy je možné detailně studovat jednotlivé ferrogramy s možností přímého snímání. Nalezené částice je poté možné vyhodnotit porovnáním s atlasy otěrových částic. Pro export fotografií z fotoaparátu se využívá jeho propojení s počítačem pomocí USB kabelu. Uspořádání pracoviště pro vyhodnocování ferrogramů je dokumentováno na obr. 23.





Obr. 23 Pracoviště pro vyhodnocování ferrogramů (vlastní foto)

### Použité přístroje

#### Základní technické parametry

Ferrograf REO 1 (REO Trade) [33]:

- napájení 110 V/60 Hz 50VA
- hmotnost 4.0 kg
- provozní teplota okolí 18 – 30 °C
- rozměry 280 x 220 x 280 mm
- měřicí rozsah 0 – 500 μm
- doba měření 15 – 20 min.

Nikon Coolpix 4500 [34]:

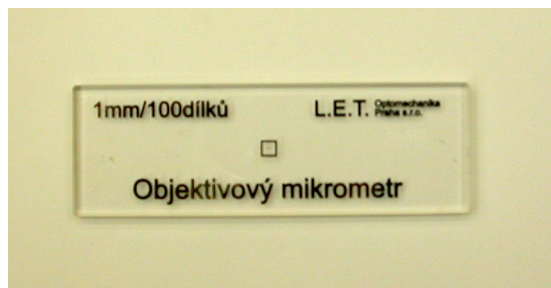
- CCD 1/1,8“ s vysokou hustotou, celkový počet obrazových bodů 4,13 milionů,
- objektiv Zoom Nikon se čtyřnásobným rozsahem; ohnisková vzdálenost  $F = 7,85 - 32$  mm (ekv. u kinofilmu 38 – 155 mm); světelnost  $f/2,6 - f/5,1$ ,
- digitální zoom 4x,
- zaostřovací rozsah 30 cm/ 1'1“ až ∞; 5 zaostřovacích polí; bodové zaostřování,
- monitor 1,5“ nízkoteplotní polysilikonový TFT LCD s regulací jasu; 110 000 pixelů,
- formáty souborů – komprimované JPEG, nekomprimované TIFF-RGB,
- volitelně PAL nebo NTSC,
- rozměry 130 x 73 x 50 mm
- hmotnost 360 g bez baterie a paměťové karty,
- provozní podmínky: teplota 0 – 40 °C, vlhkost pod 85 %, bez kondenzace.

Mikroskop H 6000

- napájení 220 V/50 Hz,
- zvětšení 4x, 10x, 25x, 40x,
- zelený filtr pro podsvícení,
- červený filtr pro osvětlení ze strany okuláru.

### Objektivový (předmětový) mikrometr

Objektivový mikrometr se používá jako délkový standard pro určení měřítka zobrazení na mikrofotografiích. Je to destička o velikosti podložního sklíčka na níž je mikrometrická stupnice, kde je jeden mm rozdělen na 100 dílků. Jeden dílek stupnice tak odpovídá 0,01 mm, tj. 10  $\mu\text{m}$ . Stupnice je opatřena krycím chránícím sklem (obr. 24).



Obr. 24 Objektivový mikrometr (vlastní foto)

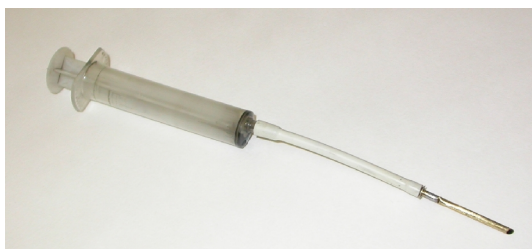
### Příprava ferrogramu

- 1) Do přístroje nad magnetickým polem se vsune plastová fólie o rozměrech 30 x 78 mm. K tomu slouží vodící drážky, jež mají malý sklon (pro rovnoměrný odtok oleje).
- 2) Pro odvod maziva z podložky je určena šikmo seříznutá hadička, která se provleče držákem v přední části ferrografu (obr. 25) a vhodně natočí tak, aby se seříznutí shora dotýkalo fólie.
- 3) Vzorek oleje ve vzorkovnici se ohřeje ve vodní lázni na teplotu 65 – 70 °C. Protřepáním po dobu cca 2 min vzorek zhomogenizuje.
- 4) Nasaje se do injekční stříkačky celkovém objemu 5 ml. Nasátého vzorku nesmí být větší množství než 3 ml, protože by to znemožnilo použití autoposuvu. Některé vzorky motorového oleje je třeba naředit čistým olejem, aby bylo dosaženo optimální viskozity.
- 5) Olej v injekční stříkačce se spolu s nasazenou šikmo seříznutou trubičkou (obr. 27) zasune do držáku v zadní části přístroje. Začátek přiváděcí hadičky se nastaví tak, aby byla cca 0,5 mm nad povrchem fólie. Olej nesmí z přiváděcí hadičky kapat, ale musí rovnoměrně téci.
- 6) Rovnoměrné nanášení je uskutečněno pomocí hrotu autoposuvu, který se zpustí stisknutím tlačítka START na čelním panelu přístroje. Olej rovnoměrně teče po podložce, kde na jejím konci je odváděn pomocí odváděcí trubičky.
- 7) Po úplném vyprázdnění injekční stříkačky (konec autoposuvu) se stisknutím tlačítka RETURN vrací autoposuvem hrot do výchozí polohy. Posuv mechaniky se může v každém okamžiku zastavit stiskem tlačítka RETURN.
- 8) Stejný postup se opakuje tentokrát s injekční stříkačkou naplněnou technickým benzínem. Ten vymyje olej z podložky s ferrografickou stopou. Při zvlášť znečištěném vzorku se promývání opakuje.
- 9) Podložka se nechá oschnout a po vyjmutí z přístroje se nanesená ferrografická stopa podrobí mikroskopické analýze.

V případě slabé stopy se provádí nanášení oleje vícekrát (u ferrogramů použitých v této práci se osvědčilo nanášení oleje jednou opakovaně), nebo se prodlouží doba chodu autoposuvu ze 4 na 8 minut, a to přepínačem na horním víku přístroje. Pro čištění ferrogramů a příslušenství byl použit technický benzín (výrobce Severochema).



Obr. 25 Ferrograf REO 1 (vlastní foto)



Obr. 26 Injekční stříkačka se šikmo seříznutou trubičkou (vlastní foto)

### 3.2.3 Analýza olejových filtrů

#### Použité přístroje

Morfologie vybraných částic vyseparovaných z olejových filtrů byla studována na elektronovém rastrovacím mikroskopu Tescan VEGA TS 5130 SB (obr. 27), který je umístěn v laboratoři dislokovaného pracoviště DFJP v České Třebové.

VEGA TS 5130 SB je počítačem plně řízený vysokovakuový rastrovací elektronový mikroskop s malou komorou a ručním eucentrickým stolkem (obr. 28).



Obr. 27 Pracoviště rastrovací mikroskopie v laboratoři DFJP v Č. Třebové (vlastní foto)



Obr. 28 Rastrovací elektronový mikroskop Tescan Vega TS 5130SB (vlastní foto)

**Základní sestava mikroskopu VEGA TS 5130:**

- SE detektor (ET typ),
- vysunovací BSE detektor,
- TV kamera pro pohled do komory,
- měření absorbovaného proudu,
- akustická kontrola dotyku.

Tab. 10 Základní specifikace VEGA TS 5130 SB [35]

Rozlišení	Ve vysokovakuovém módu (SE)	3 nm při 30 kV
Pracovní vakuum	Mód vysokého vakua	$1 \times 10^{-2}$ Pa
Zvětšení	při 30kV/30mm 4x až 1 000 000 x	
Urychlovací napětí	200 V až 30 kV	
Elektronová tryska	Wolframová žhavená katoda	
Proud ve stopě	1 pA až 2 $\mu$ A	
Rastrování	Rastrovací rychlost od 200 ns do 10 ms na pixel, nastavitelná po krocích nebo plynule	
Komora	Vnitřní průměr	$\varnothing 160$ mm
	Šířka vrat	120 mm
Stolek vzorku	Typ	Eucentrický
	Posuvy	X = 40 mm - ruční
		Y = 24 mm - ruční
		Z = 27 mm - ruční
		Z' = 6 mm - ruční
	Rotace	360° kontinální - ruční
Náklon	-90° - eucentrický - ruční	
	+90° - eucentrický - ruční	

**Ultrazvuková lázeň Bandelin Sonorex**

- napájení 220 V/50 Hz,
- odběr proudu 1 A
- příkon 320 W
- pracovní frekvence 35 kHz

**Přístroj pro demagnetizaci**

- zařízení zhotovené z trafopájký (obr. 36)

**Odsávací aparatura s vodní vývěvou****Přípravek na otevírání filtrů vlastní konstrukce (viz str. 49)**



Ferrografie je založena na principu separace otěrových částic z opotřebeného oleje. Analýza motorových olejů je však ovlivněna tím, že největší částice obsažené v motorovém oleji jsou zachycovány v olejovém filtru. Tyto částice mají největší význam z hlediska hodnocení technického stavu motoru. Proto byly v rámci experimentální části práce podrobeny olejové filtry (tab. 3 až 7) experimentálnímu zkoumání, s cílem co nejšetrněji a nejefektivněji uvolnit zachycené částice. Při analýze olejových filtrů pak byly navrženy a ověřeny dva způsoby separace částic opotřebení, které zjednodušují doposud používanou metodiku.

### Vyjmutí filtrační vložky a odstranění konstrukčních částí

Pro analýzu olejového filtru je zapotřebí nejprve zajistit přístup k filtrační vložce. Ta je u uzavřeného filtru chráněna košem filtru, který je uzavřen víkem filtru. K tomuto účelu byl vyroben otvírací přípravek, která rozdělí koš filtru na dva díly (obr. 29). Filtrační vložku pak bez obtíží vyjmout. U otevřených filtru tato operace není nutná, a další pracovní postup je stejný u obou typů filtru. Papírová vložka filtru je na obou základnách zakončena dvěma víčky (obr. 30), zevnitř je fixována kostrou s otvory pro průtok oleje. Materiálem konstrukčních částí může být jak kov, tak i plast – k jejich ručnímu odstranění je zapotřebí ostrého nože. Vyjmutou papírovou vložku je nutno ještě podélně rozříznout, protože konce filtračního materiálu jsou k sobě zpravidla sepnuty.



Obr. 29 Oddělení víka filtru (vlastní foto)



Obr. 30 Oddělení papírové filtrační vložky (vlastní foto)



Obr. 31 Ultrazvuková lázeň Bandelin Sonorex s kádinkou, v níž je v rozpouštědlové směsi umístěna rozřezaná filtrační vložka (vlastní foto)

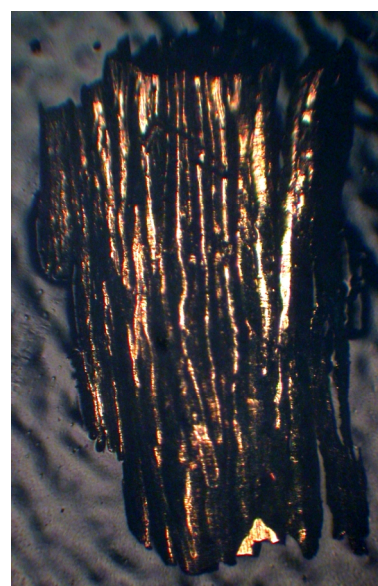
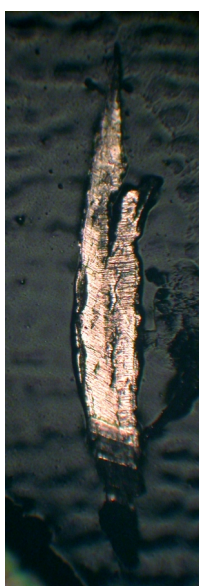
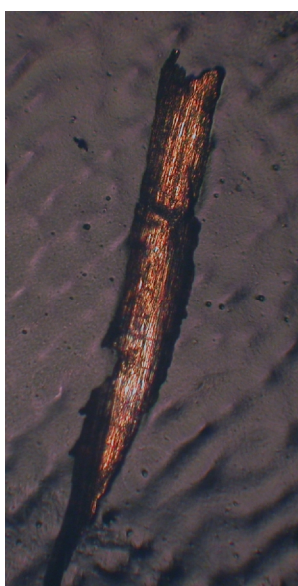
**Filtrační vložky z osobních automobilů.**

Filtrační vložky byly pro snadnější manipulaci dále rozřezány na menší části o rozměrech cca 6 x 3 cm. Ty byly ponořeny do směsi petroleje a technického benzínu (1:1) po dobu 14 dní. Uvolnění částic zachycených na filtračních vložkách bylo provedeno pomocí ultrazvukové lázně Bandelin Sonorex, ve které byly vystaveny působení ultrazvuku po dobu 3 hodin (obr. 31). Při separaci bylo využito silných magnetů (na bázi FeNdB – typ N35, ABC Magnet, Kralupy nad Vltavou) (obr. 32). Kádinka byla nad tyto magnety přemístěna a jednotlivé části filtrační vložky z ní byly vybrány tak, aby v ní zůstala rozpouštědlová směs a na dně vyseparované částice z olejového filtru. Za stálého působení magnetů byla směs slita do připravené nádoby a v odsávací aparatuře s vodní vývěvou přefiltrována přes jemný filtrační papír (bylo tak možno zachytit i částice, které se neusadily na dně nádoby, a sediment na filtru účinně propláchnout technickým benzínem).

Vybrané částice byly pozorovány i na bichromatickém mikroskopu H6000 (obr. 33).



Obr. 32 Magnet na bázi FeNdB (vlastní foto)



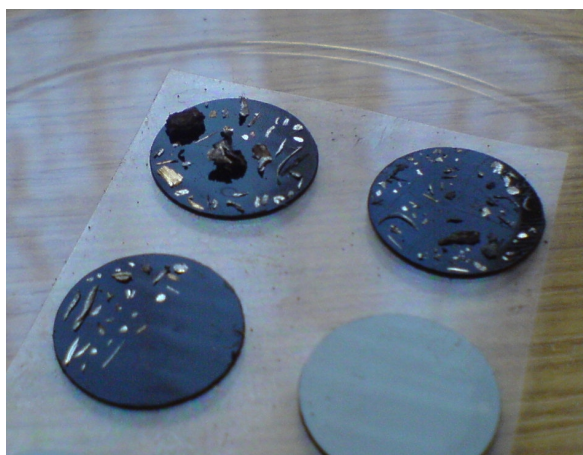
Obr. 33 Částice z olejového filtru umístěné na grafitové podložce pod bichromatickým mikroskopem H6000



### Filtrační vložky z nákladních automobilů.

Pro uvolnění částic z filtračních vložek nákladních automobilů byla použita jednodušší metoda: filtrační vložka byla rozdělena na tři části a každá z nich byla promývána v lázni z technického benzínu po dobu 30 minut. Vzhledem velkému znečištění filtrační vložky olejem bylo nutné lázeň během tohoto časového intervalu 5x vyměnit. Po takto důkladném vyčištění filtrační vložky od zbytků oleje byly všechny tři části vyjmuty a vysušeny na vzduchu. Na filtrační vložce zůstaly zachyceny dobře pozorovatelné částice, které byly pomocí pinzety přemístěny na grafitovou podložku (obr. 34).

Výhodou této metody je především její rychlost a jednodušší manipulace s vyseparovanými částicemi, jelikož odpadá problém s jejich zmagnetizováním a shlukováním. Nevýhodou je naopak její značná náročnost na množství použitého rozpouštědla.



Obr. 34 Umístění částic na grafitových podložkách pro pozorování na REM (vlastní foto)



Obr. 35 Detail vyseparovaných částic (vlastní foto)

### Demagnetizace

Částice kovového otěru, u nichž došlo v průběhu jejich izolace ke zmagnetizování, byly demagnetizovány průchodem cívkou v zařízení zhotoveném z trafopáčky (obr. 36). Experimentálně byl určen optimální čas průchodu cívkou 30 s; kratší časy nevedou k dostatečné demagnetizaci. Demagnetizaci je nezbytné provést u všech částic vybraných pro studium v REM. Bez této úpravy je nelze pozorovat, protože se v obraze jeví jako intenzivně zářící, tj. zcela bílé, nadměrně jasné objekty. Při jejich uvolnění z podložky by mohlo dojít k poškození vnitřního vybavení mikroskopu.



Obr. 36 Demagnetizace izolovaných částic (vlastní foto)

## Otvírací přípravek

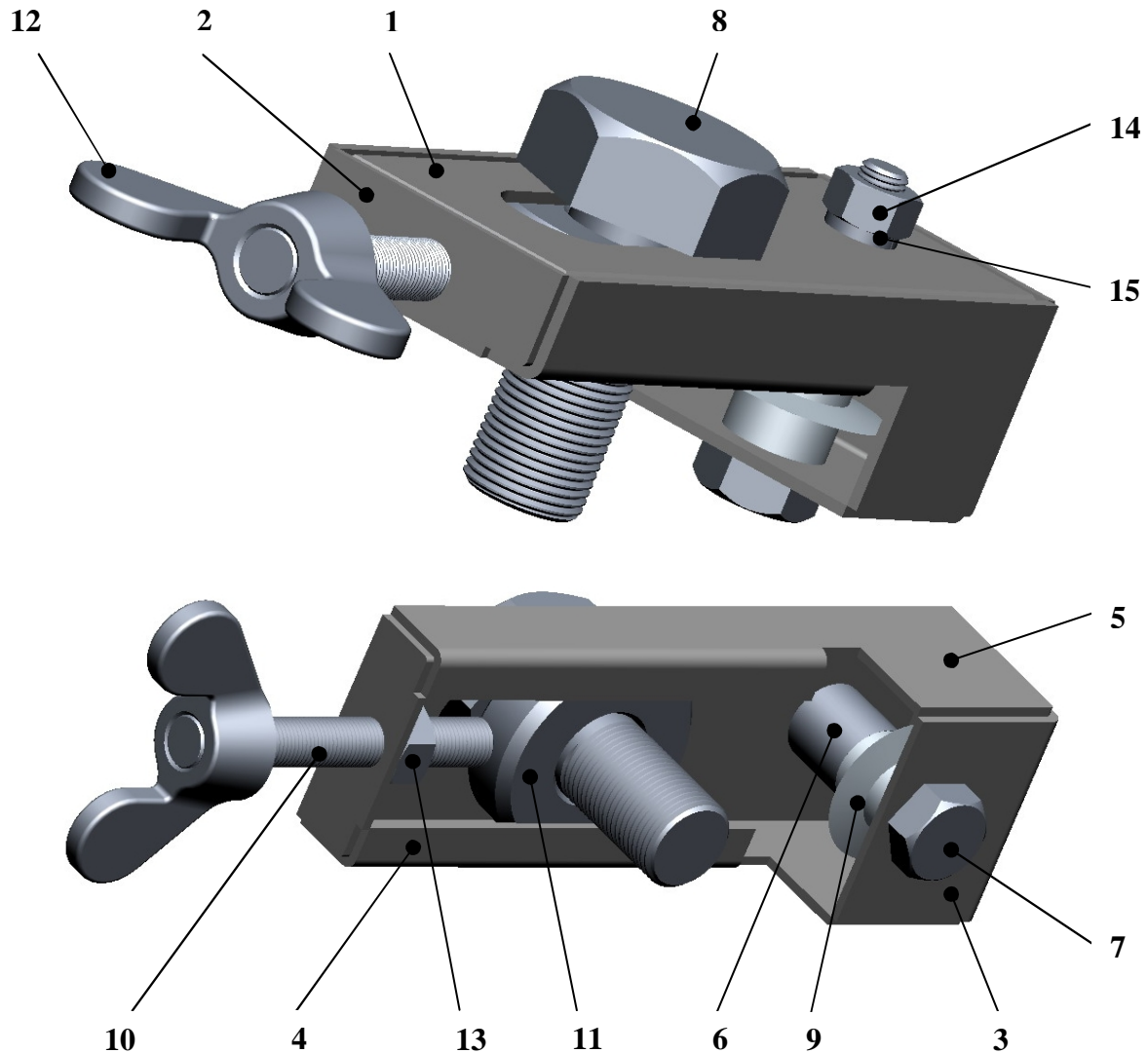
Olejoyé filtry lze z hlediska přístupu k filtrační vložce rozdělit filtry do dvou skupin.

- 1) Filtry otevřené, kde je vložka snadno oddělitelná od ostatních konstrukčních částí olejového filtru (obr. 30).
- 2) Filtry s filtrační vložkou uzavřenou v hliníkovém koši, který je slisován s víkem filtru. Lisovaný spoj i použité materiály koše a víka filtru musí být kvalitní, protože jsou vystaveny vysokým tlakům při studených startech a vysokých otáčkách motoru.

V rámci diplomové práce bylo proto potřebné navrhnout způsob, jak vyjmout filtrační vložku z takto uzavřeného filtru, aniž by došlo k její kontaminaci částicemi z konstrukce filtru. K tomuto účelu bylo nutno navrhnout otvírací přípravek splňující rovněž podmínku dostatečné univerzálnosti vzhledem ke skutečnosti, že koše filtrů mají rozdílné průměry. Zásadní podmínkou pak byla nutnost zajistit, aby při otvírání filtru nevnikaly do vložky nečistoty zvenčí a částice vznikající v průběhu jeho otevírání. Filtr doléhá vnější stranou víka filtru k bloku motoru a zajišťuje tak kromě vstupu a výstupu oleje jeho zatěsnění. Filtr se k motoru šroubuje závitem ve výstupním otvoru.

Při konstrukci otvíracího přípravku byl využit vnitřní závit ve víku filtru. Ten slouží k uchycení přípravku pomocí centrálního šroubu a zároveň je i jeho osou rotace při otvírání filtru. Požadavek na čistotu řezu a nulový průnik nečistot do koše filtru byl zajištěn řezným kolečkem z nástrojové oceli, které se do materiálu koše postupně vtlačuje, čímž dochází k jeho rozdělení. V místě kontaktu řezného kolečka a koše filtru tak nevzniká řez jako při použití pilky, nýbrž dojde k zeslabení stěny koše v důsledku plastické deformace. Při použití této technologie je nezbytné zajistit, aby na otáčení přípravku a s ním spojené odvalování řezného kolečka nebyla vynaložena příliš velká síla. Proto musí být po každém otočení přípravku řezné kolečko znovu lehce přitlačeno a tento postup musí být opakován, dokud není koš filtru rozdělen. Dostatečně jemné přitlačení řezného kolečka je zajištěno stavěcím šroubem s jemným závitem, který jedním svým koncem dosedá na vodící část a posunuje jí v podélné ose vodící drážky spolu s centrálním šroubem blíže k řeznému kolečku. Tím dojde k přiblížení filtru, uchyceného na centrálním šroubu, k řeznému kolečku (analogický způsob přiblížení má např. frézka, kdy je zajištěn posuvný pohyb obrobku k rotačně uchycenému nástroji – fréze. Na druhém konci stavěcího šroubu je pro snadnější nastavení přitlačné síly mezi košem filtru a řezným kolečkem umístěna ještě křídlatá matice. Řezné kolečko bylo zapotřebí umístit pod hranu zalisování, z čehož vyplývá jednak tvar bočnic, které z profilu mají tvar "L", ale také použití vymezovacího kroužku a upevňovacího šroubu. Ten umožní v případě potřeby jednoduché vyjmutí řezného kolečka za účelem naostření. Univerzálnost použití otvíracího přípravku je pak zajištěna podélnou drážkou ve vodící základně. V ní se pohybuje centrální šroub a umožňuje tak přípravek použít na filtry o průměru od 70 do 160 mm. Vodící část, která se pohybuje mezi oběma bočnicemi, má za úkol kromě lepšího vedení šroubu také zvýšit tuhost celého centrálního upevňovacího mechanismu. Pro větší tuhost přípravku jako celku byly všechny plechové části vyrobeny z 2 mm silného plechu.



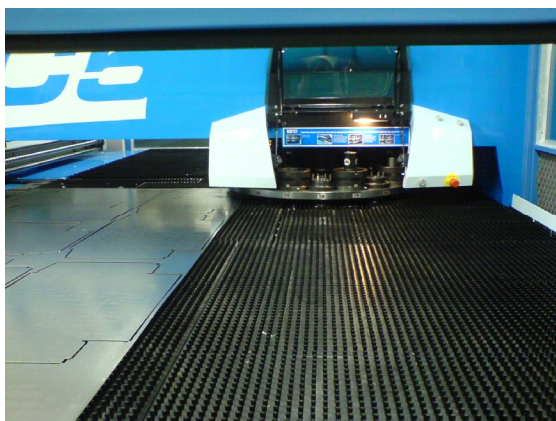


Obr. 37 3D model otvácího přípravku

**Legenda:** 1 – vodící základna; 2 – stavící plech; 3 – čelní plech; 4 – levá bočnice; 5 – pravá bočnice; 6 – vymežovací kroužek; 7 – upevňovací šroub; 8 – centrální šroub; 9 – řezné kolečko; 10 – stavící šroub; 11 – vodící část; 12 – křídlatá matice; 13 – stavící matice; 14 – upevňovací matice; 15 – pružná podložka.

Před výrobou přípravku byl nejprve nakreslen v programu Pro/ENGINEER Wildfire 2.0 (producent PTC) jeho 3D model (obr 37). V současnosti je používanějším programem na 3D modely pouze CATIA. Výhodou programu Pro/ENGINEER je jeho příjemné uživatelské rozhraní. Jednotlivé dílenské výkresy a výkres sestavy byly nakresleny v programu AutoCAD. Produkt firmy Autodesk je používán ve všech strojírenských firmách. Oba programy jsou dostupné na Dopravní fakultě Jana Pernera v Pardubicích. Kompletní výkresová dokumentace je obsažena v příloze.

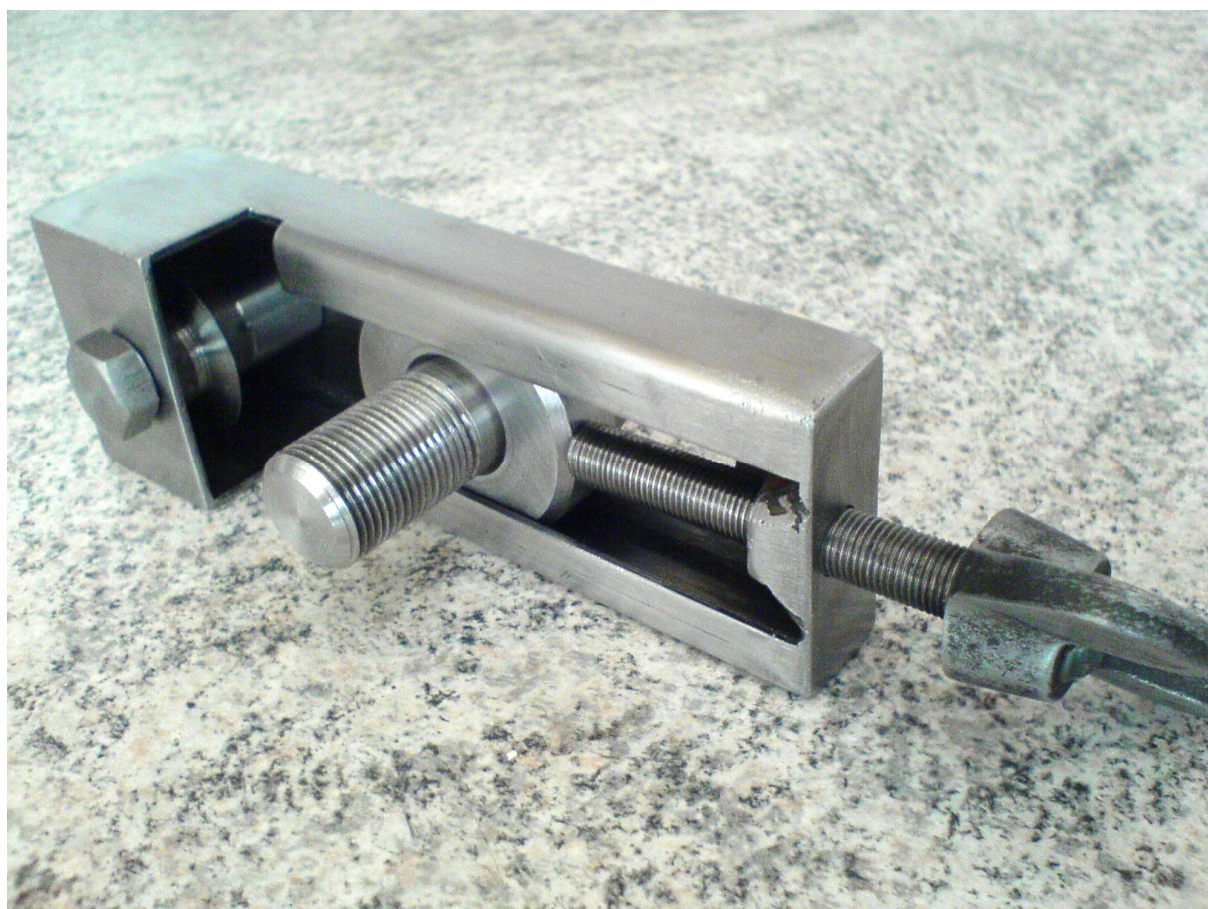
Výroba otvácího přípravku byla realizována ve spolupráci s firmou VD Cyklos Choltice na vysekávacím CNC lisu FINN POWER (obr. 38). Zde byly vysekány všechny plechové části, které byly posléze naohýbány na hydraulickém ohraňovacím CNC lisu SAFAN (obr. 39). Jednotlivé plechové díly byly při kompletaci přípravku svařeny. Svary pak byly dále z hygienických a estetických důvodů zabroušeny (obr. 40).



Obr. 38 Vysekávací CNC lis FINN  
POWER (vlastní foto)



Obr. 39 Hydraulický ohraňovací CNC lis  
SAFAN (vlastní foto)



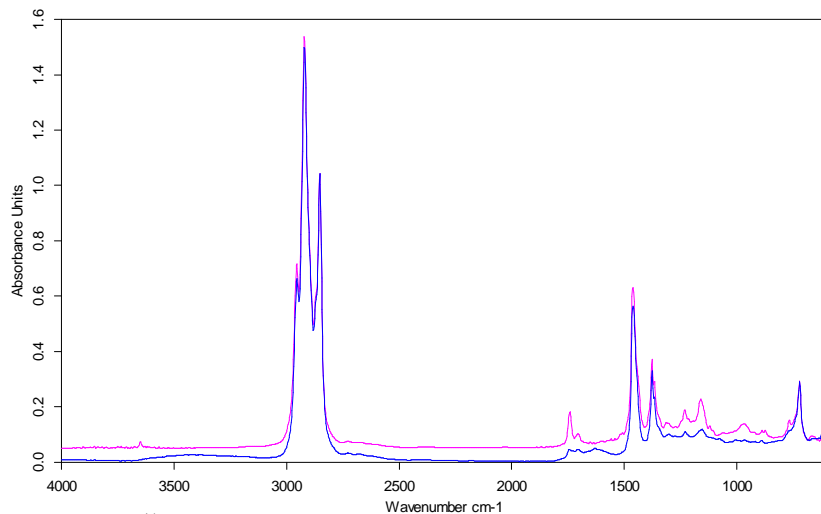
Obr. 40 Otvírací přípravek se zabroušenými svary (vlastní foto)

Přípravek byl použit k otevírání filtrů v rámci diplomové práce. Bude ponechán k dalšímu používání v laboratořích odd. EADD KJPSD DFJP.

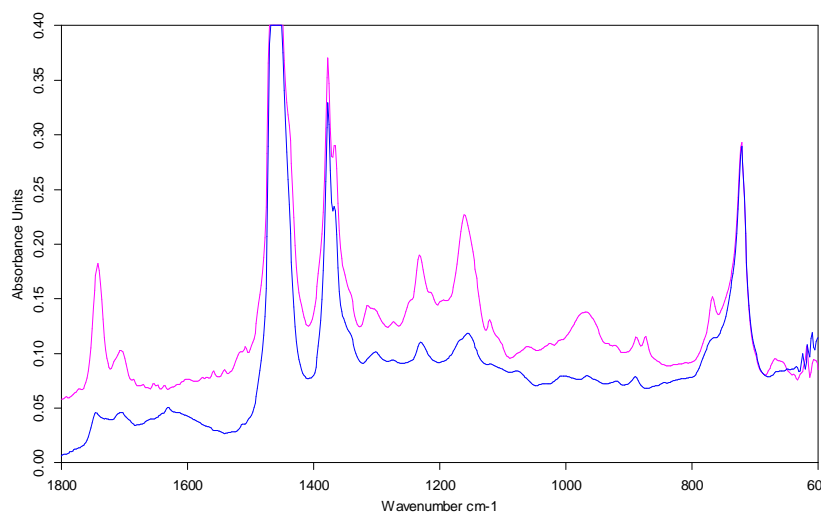
### 3.3 Výsledky měření a jejich interpretace

#### 3.3.1 Výsledky FTIR spektrometrie

##### Shell Longlife 5W30 VX



Obr. 41 IČ spektra motorového oleje Shell Longlife 5W30 VX



Obr. 42 Detail IČ spekter motorového oleje Shell Longlife 5W30 VX

Tab. 11 Motorové oleje Shell Longlife 5W30 VX

Číslo vzorku	Značka a typ vozidla	Typ oleje	Kilometrový běh
— Vzorek č. 1 nový	—	Shell Longlife 5W30 VX	nový olej
— Vzorek č. 1	Škoda Octavia II 1,9 TDI	Shell Longlife 5W30 VX	42333

U vzorku č. 1, který byl odebrán ze Škody Octavie II, byla posuzována vhodnost výměnné lhůty motorového oleje (jedná se o vozidlo s prodlouženým servisním intervalem, který je doporučen výrobcem) při provozu s olejem typu Longlife.

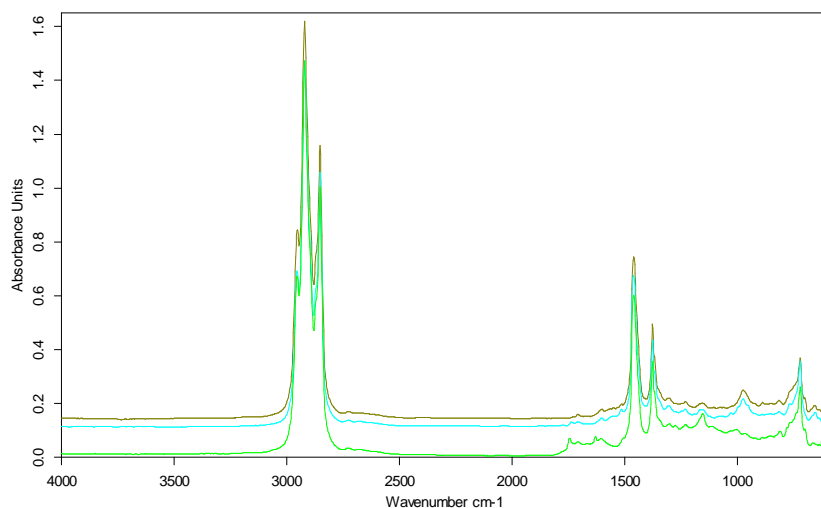
U nového oleje se vyskytuje charakteristický pík v oblasti  $1748\text{ cm}^{-1}$ , což je způsobeno jednak obsahem esterových složek používaných u syntetických olejů, jednak přítomností modifikátorů viskozity. Vysoké píky v oblasti  $1800 - 1200\text{ cm}^{-1}$  jsou důsledkem vysokého obsahu aditiv na bázi kyslíkatých sloučenin fosforu a síry v novém oleji. U opotřebeného oleje pík prakticky vymizel – to je projev výrazné degradace oleje v důsledku vyčerpání



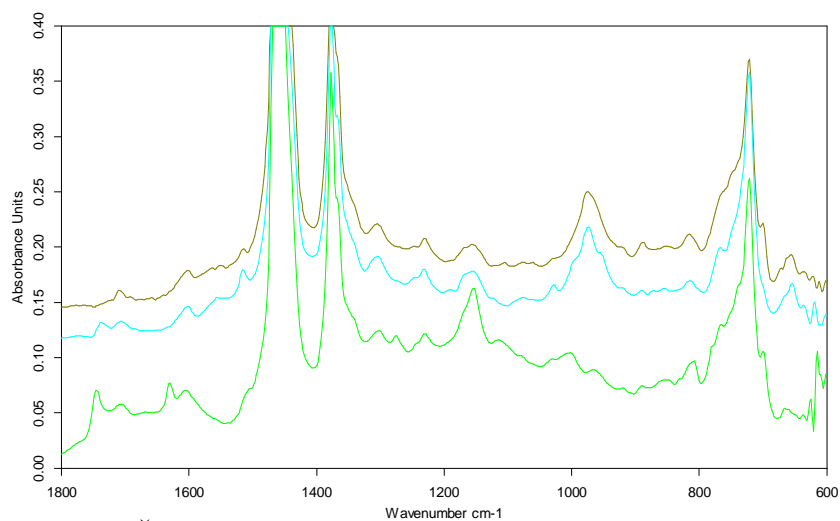
velmi důležitých protiotěrových přísad (ZnDDP – diethyldithiofosfátu zinečnatého s hlavním píkem v oblasti  $1\,025 - 960\text{ cm}^{-1}$ ).

Olej Shell Longlife 5W30 VX vykazuje výrazné opotřebení, přičemž zejména úplné vyčerpání protiotěrových přísad a rozpad modifikátorů viskozity by měl vést ke zkrácení servisního intervalu maximálně na 30 tisíc km. Tím by se mohlo předejít zhoršování počínajících netěsností mezi pístem a válcem, jimiž dochází k profuku spalných plynů (pík nitrosloučenin v oblasti  $1\,650 - 1\,600\text{ cm}^{-1}$ ).

### Shell Helix Plus 5W40 a Shell Helix Plus 10W40



Obr. 43 IČ spektra motorových olejů Shell Helix Plus 5W40 a 10W40



Obr. 44 Detail IČ spekter motorových olejů Shell Helix Plus 5W40 a 10W40

Tab. 12 Motorové oleje Shell Helix Plus 5W40 a 10W40

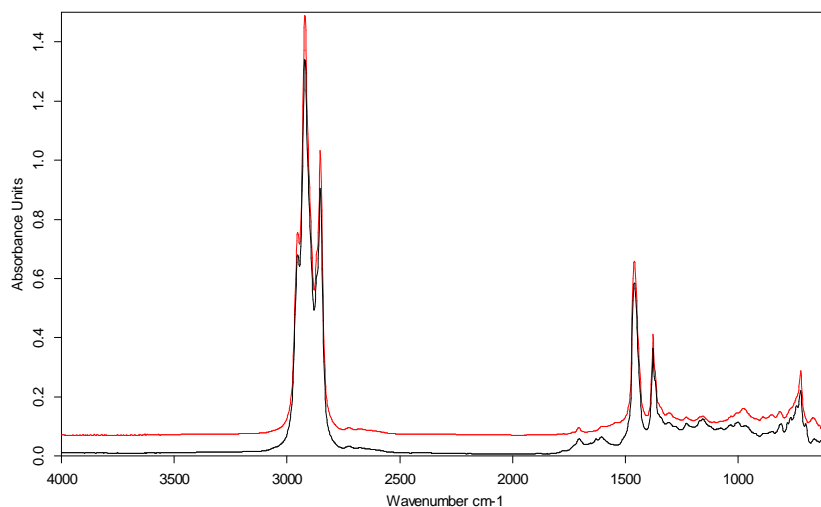
Číslo vzorku	Značka a typ vozidla	Typ oleje	Kilometrový běh
— Vzorek č. 2 nový	—	Shell Helix Plus 5W40	nový olej
— Vzorek č. 2 nový	—	Shell Helix Plus 10W40	nový olej
— Vzorek č. 2	Škoda Fabia 1,2 HTP	Shell Helix Plus 5W40	15300

U motorového oleje Shell Helix Plus 5W40 je podle výrobce je použit syntetický olejový základ Shell XHVI, který je doplněn systémem vybraných aditiv. V porovnání s běžně

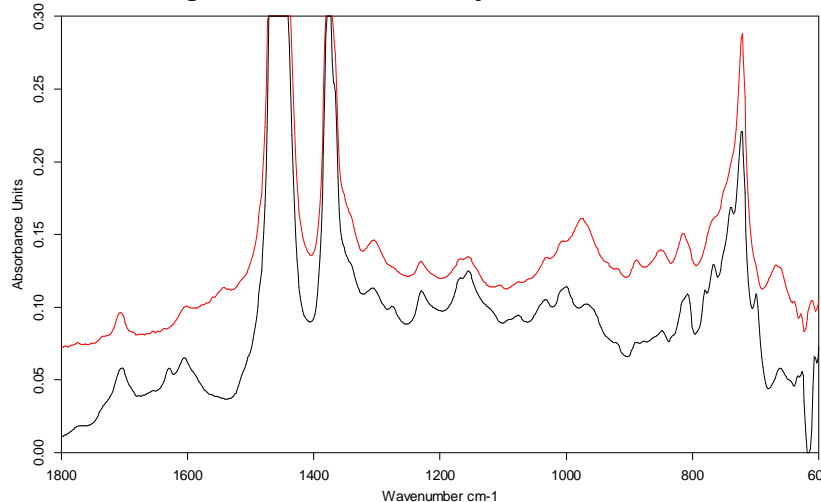
používaným polosyntetickým olejem Shell Helix Plus 10W40 zde nejsou žádné výraznější změny a oba oleje jsou si charakterem spektra velmi podobné. Olej byl použit ve vozidle Škoda Fabia 1,2 HTP a po ujetí 15300 km vykazuje pík v oblasti  $1\ 800 - 1\ 670\ \text{cm}^{-1}$ , který je zapříčiněn termooxidačními procesy způsobující nárůst obsahu karbonylových sloučenin. V oblasti  $1\ 650 - 1\ 600\ \text{cm}^{-1}$  se zde objevují nitrosloučeniny. To je důsledkem počínající netěsnosti pístních kroužků, čemuž nasvědčuje i zvýšený obsah sirných sloučenin, které se dostávají do oleje z paliva (pík v oblasti  $1\ 180 - 1\ 120\ \text{cm}^{-1}$ ). Z oleje byly takřka vyčerpány i všechny protiotěrové přísady (oblast  $1\ 025 - 960\ \text{cm}^{-1}$ ).

Vzhledem k zjištěným údajům lze doporučit zkrácení servisního intervalu, protože je vozidlo provozováno pravděpodobně v městském provozu. Větší pozornost by měla být při údržbě věnována těsnosti motoru a stavu pístních kroužků.

### Shell Helix Plus 15W40



Obr. 45 IČ spektra motorového oleje Shell Helix Plus 15W40



Obr. 46 Detail IČ spekter motorového oleje Shell Helix Plus 15W40

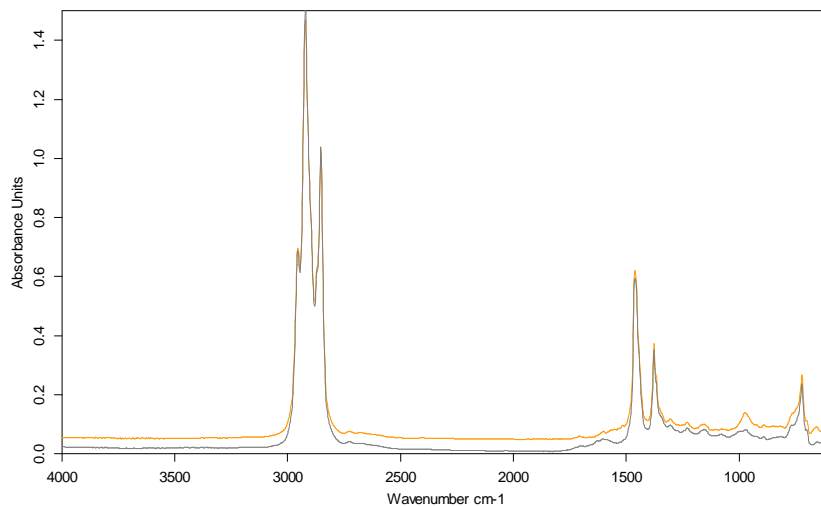
Tab. 13 Motorové oleje Shell Helix Plus 15W40

Číslo vzorku	Značka a typ vozidla	Typ oleje	Kilometrový běh
— Vzorek č. 3 nový	—	Shell Helix Plus 15W40	nový olej
— Vzorek č. 3	Škoda Felicia Pickup 1,3 MPI	Shell Helix Plus 15W40	15030

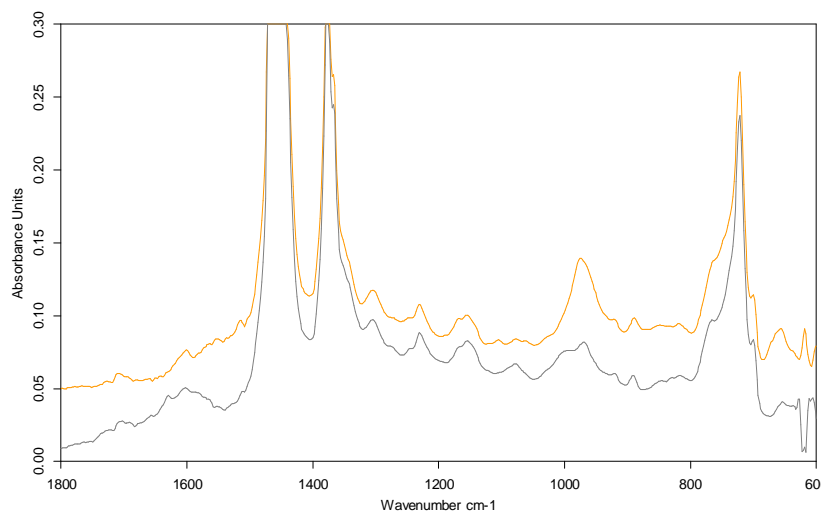
Vzorek č. 3 vzhledem k svému proběhu vykazoval v oblasti  $1\,025 - 960\text{ cm}^{-1}$  relativní dostatek protiotěrových přísad ZnDDP. To způsobeno využitím vozidla převážně v mimoměstském provozu. Zhoršení kvality vykazoval olej v oblastech  $1\,650 - 1\,600\text{ cm}^{-1}$  (nitrosloučeniny) a  $1\,180 - 1\,120\text{ cm}^{-1}$  (sirné sloučeniny); příčinou je netěsnost mezi pístem a válcem.

Na vozidle Škoda Felicia Pickup 1,3 MPI lze vzhledem k jeho využití a zbylým protiotěrovým přísadám zachovat stávající servisní interval, případně i jej prodloužit na 20 tisíc km. Netěsnost se u 7 let starého vozidla dala očekávat a je pravděpodobně způsobena opotřebením pístních kroužků. Tato oblast by měla být nadále sledována.

### Mogul Racing 5W40



Obr. 47 IČ spektra motorového oleje Mogul Racing 5W40



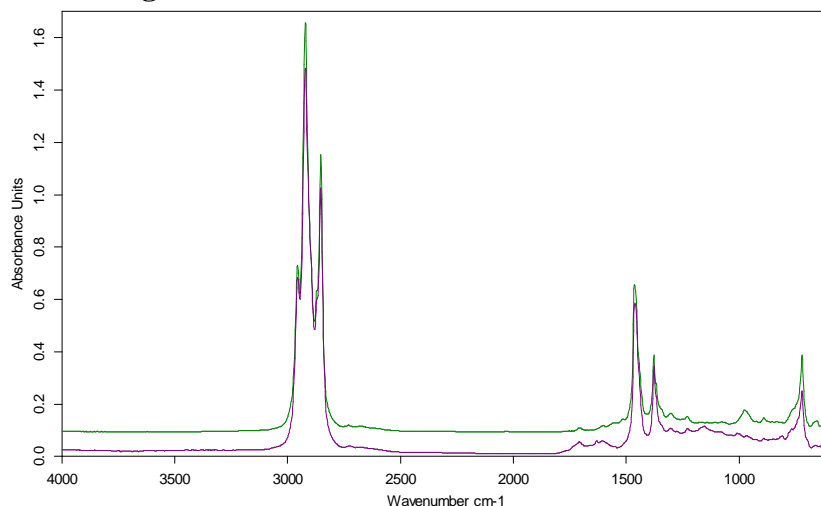
Obr. 48 Detail IČ spekter motorového oleje Mogul Racing 5W40

Tab. 14 Motorové oleje Mogul Racing 5W40

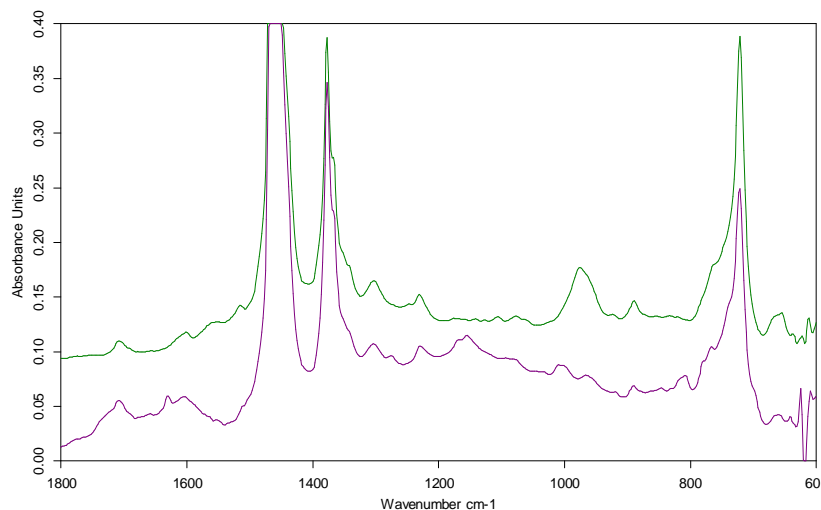
Číslo vzorku	Značka a typ vozidla	Typ oleje	Kilometrový běh
— Vzorek č. 4 nový	—	Mogul Racing 5W40	nový olej
— Vzorek č. 4	Škoda Fabia 1,9 TDI	Mogul Racing 5W40	15012

Ve vozidle Škoda Fabia 1,9 TDI byl použit motorový olej Mogul Racing 5W40. Obě spektra se od sebe lišila pouze ve dvou oblastech. První oblastí jsou nitrosloučeniny ( $1\ 650 - 1\ 600\ \text{cm}^{-1}$ ), vyskytující se i přes vysoký počet najetých kilometrů pouze v mírně zvýšeném množství. Druhou oblastí jsou protiotěrové přísady ( $1\ 025 - 960\ \text{cm}^{-1}$ ), jejichž obsah sice poklesl, ale které jsou i po 15 tis. km v dostatečném zbytkovém množství obsaženy v oleji. Spojení Škoda Fabia 1,9 TDI a oleje Mogul Racing 5W40 lze považovat za bezproblémové a motor i po 105 tis. km má jen minimální netěsnost. Délka servisního intervalu se jeví také jako optimální.

### Castrol SLX 0W30 Longtec



Obr. 49 IČ spektra motorového oleje Castrol SLX 0W30 Longtec



Obr. 50 Detail IČ spekter motorového oleje Castrol SLX 0W30 Longtec

Tab. 15 Motorové oleje Castrol SLX 0W30 Longtec

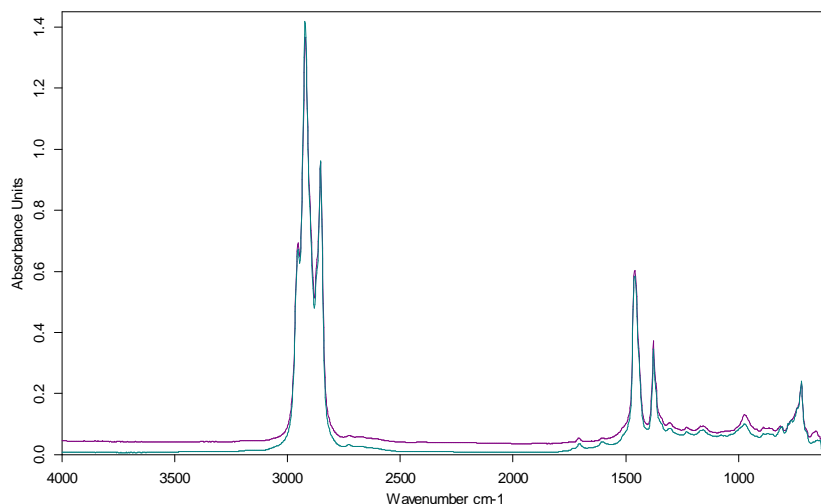
Číslo vzorku	Značka a typ vozidla	Typ oleje	Kilometrový běh
— Vzorek č. 5 nový	—	Castrol SLX 0W30 Longtec	nový olej
— Vzorek č. 5	Mazda 6 2,0	Castrol SLX 0W30 Longtec	18431

Spektra vzorků č. 5 vykazují významné rozdíly. Olej Castrol SLX 0W30 Longtec je sice výrobcem charakterizován jako vhodný pro prodloužené servisní intervaly, nicméně při

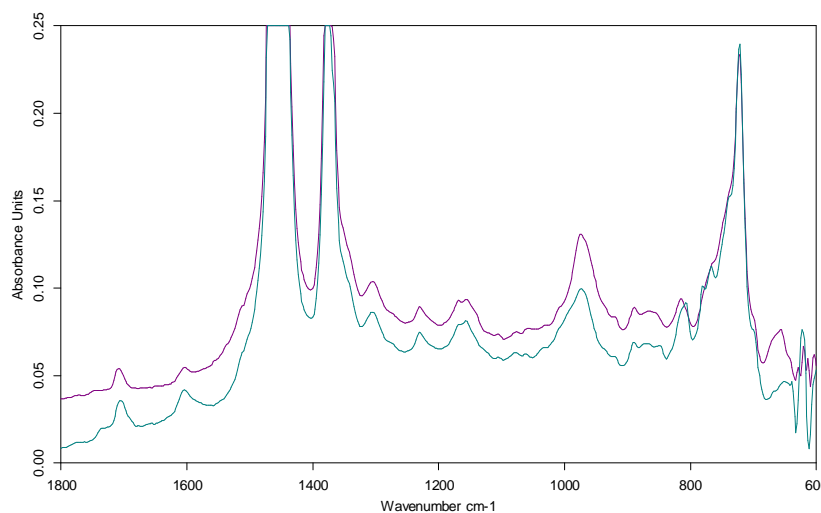
použití v daném vozidle vykazuje již po 18431 km značné opotřebení. Jednak došlo k úplnému vyčerpání protiotěrových přísad ZnDDP ( $1\,025 - 960\text{ cm}^{-1}$ ), jednak se zde v důsledku termooxidačních procesů a tedy zvýšeného výskytu oxidačních produktů objevuje pík v oblasti  $1\,800 - 1\,670\text{ cm}^{-1}$ . Obě spektra se výrazněji liší rovněž píky nitrosloúčenin ( $1\,650 - 1\,600\text{ cm}^{-1}$ ) a sirnýmich sloučenin ( $1\,180 - 1\,120\text{ cm}^{-1}$ ).

U vozidla se vzhledem k celkovému počtu kilometrů již projevuje netěsnost motoru. Těto závadě by bylo vhodné nadále věnovat zvýšenou pozornost. Ačkoli je ve vozidle použit špičkový syntetický vysoce výkonný motorový olej typu Longlife (Castrol SLX 0W30 Longtec) renomované značky, který navíc doporučuje i automobilka Mazda jako výrobce vozidla, nemá olej již po 18 tis. km žádné protiotěrové přísady. Proto lze doporučit změnu značky oleje (při dodržení požadavku na jeho výkonovou i viskozitní klasifikaci). Výměna by mohla vést k úsporám provozních nákladů, protože Castrol SLX 0W30 Longtec patří s cenou 682 Kč za litr k nejdražším na trhu.

### Paramo Mogul 10W40



Obr. 51 IČ spektra motorového oleje Paramo Mogul 10W40



Obr. 52 Detail IČ spekter motorového oleje Paramo Mogul 10W40



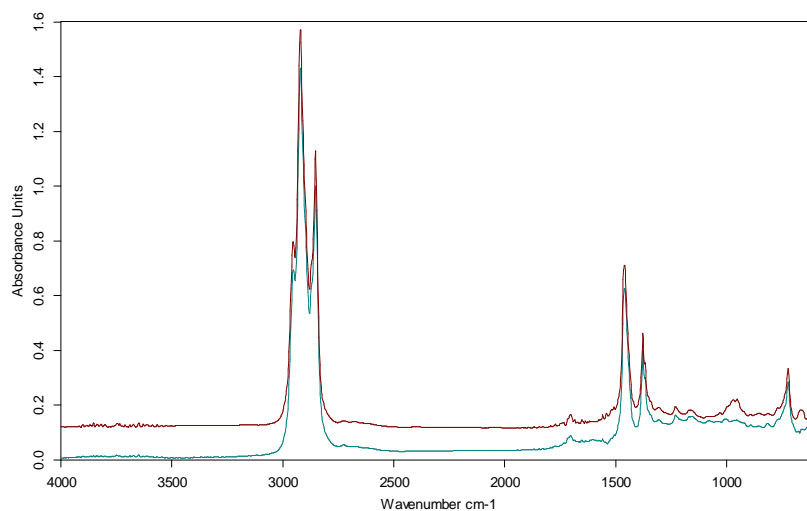
Tab. 16 Motorové oleje Paramo Mogul 10W40

Číslo vzorku	Značka a typ vozidla	Typ oleje	Kilometrový běh
— Vzorek č. 6 nový	—	Paramo Mogul 10W40	nový olej
— Vzorek č. 6	Škoda Fabia 1,2 HTP	Paramo Mogul 10W40	693

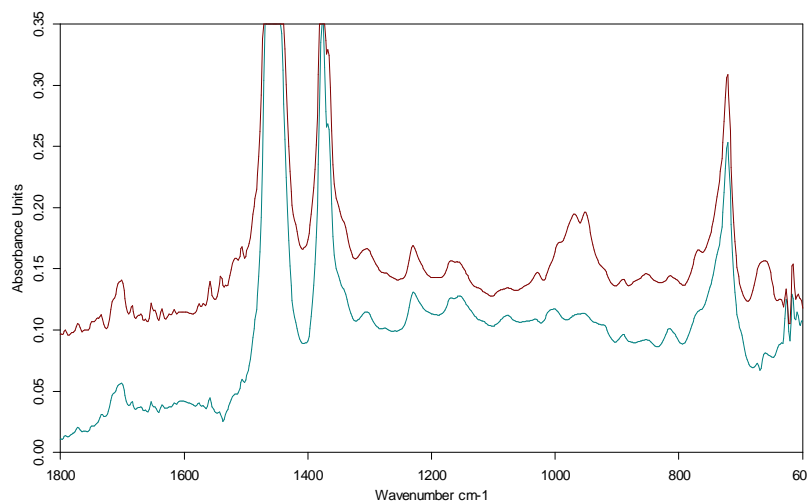
U vzorku č. 6 se spektra nového a opotřebeného oleje takřka shodují. To je způsobeno jen omezeným využíváním vozidla (za 3 roky najeto pouze 3893 km). Výrobce je doporučen servisní interval 12 měsíců nebo 15 tisíc km, má vozidlo za posledních 12 měsíců kilometrový proběh jen necelých 700 km.

Majiteli vozidla tak vznikají každý rok zbytečné náklady spojené s výměnou téměř nepoužitého oleje. Údaje uvedené v servisní knížce však mohou hrát důležitou roli při případném prodeji vozidla.

### OMV Eco Truck Extra 10W40



Obr. 53 IČ spektra motorového oleje OMV Eco Truck Extra 10W40



Obr. 54 Detail IČ spekter motorového oleje OMV Eco Truck Extra 10W40

Tab. 17 Motorové oleje OMV Eco Truck Extra 10W40

Číslo vzorku	Značka a typ vozidla	Typ oleje	Kilometrový běh
— Vzorek č. V-1 nový	—	OMV Eco Truck Extra 10W40	nový olej
— Vzorek č. V-1	Volvo FH 12 500	OMV Eco Truck Extra 10W40	64 980

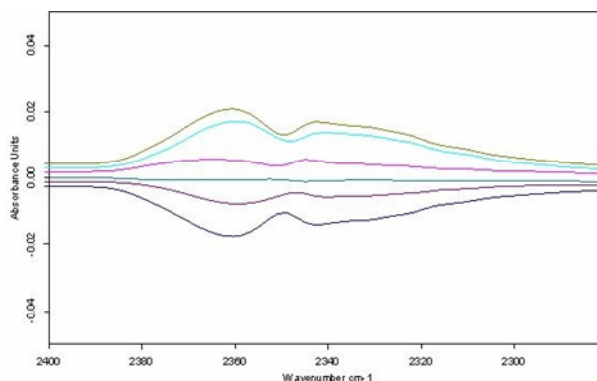
U vozidla jsou zcela vyčerpána protioděrová aditiva (diethyldithiofosát zinečnatý) – v oblasti vlnočtu kolem 1025 – 950  $\text{cm}^{-1}$  došlo k výraznému poklesu absorbance. Olej neplní svoji ochrannou funkci, dochází ke zvýšenému opotřebení, zvyšuje se riziko zadření.

Spektra nevykazují jiné projevy degradace či kontaminace oleje: neprojevil se nárůst absorbance v oblasti 1610 – 1590  $\text{cm}^{-1}$ , který souvisí s přítomností nitrosloučenin, pronikajících z profuku spalných plynů při netěsnosti pístové skupiny. Nárůst absorbance v oblasti 1700 – 1730  $\text{cm}^{-1}$ , který je projevem termicko-oxidační degradace oleje, v tomto případě rovněž nebyl prokázán. Vzorky oleje nebyly kontaminovány vodou (oblast 3600 – 3150  $\text{cm}^{-1}$  nevykazuje žádné změny), chladicí směsí na bázi etylénglykolu (1100 – 1030  $\text{cm}^{-1}$ ) ani karbonovými úsadami (oblast pásma 2000  $\text{cm}^{-1}$  je rovněž beze změn), nevyskytuje se v něm palivo (815 – 805  $\text{cm}^{-1}$ ).

Vzhledem k vyčerpání protioděrových lze uživateli doporučit zkrácení servisního intervalu.

### Softwarová úprava spekter

V rozmezí 2250 – 2400  $\text{cm}^{-1}$  se u spekter měřených metodou HATR objevuje dvojitý pík (obr. 55), který odpovídá přítomnosti  $\text{CO}_2$ . Oxid uhličitý se nereprodukovatelně dostává do komory vzorku z ovzduší laboratoře. Softwarově lze tento pík nahradit přímkou pomocí funkce Straight line generation v menu Manipulate řídicího programu OPUS (tento postup je běžně používán pro zvýšení přehlednosti spekter, je doporučován zejména pro úpravu do publikací; byl použit u spekter, uvedených v této práci v kap. 3.3.1).



Obr. 55 Detail reálného spektra v oblasti (2400 – 2280  $\text{cm}^{-1}$ ) s dvojitým píkem oxidu uhličitého

Tab. 18 Nové motorové oleje na IČ

Číslo vzorku	Typ oleje	Číslo vzorku	Typ oleje
— Vzorek č. 1 nový	Shell Longlife 5W30 VX	— Vzorek č. 4 nový	Paramo Mogul 5W40
— Vzorek č. 2 nový	Shell Helix Ultra 5W40	— Vzorek č. 5 nový	Castrol SLX 0W30
— Vzorek č. 3 nový	Shell Helix Plus 15W40	— Vzorek č. 6 nový	Paramo Mogul 10W40

### 3.3.2 Výsledky ferrografické analýzy

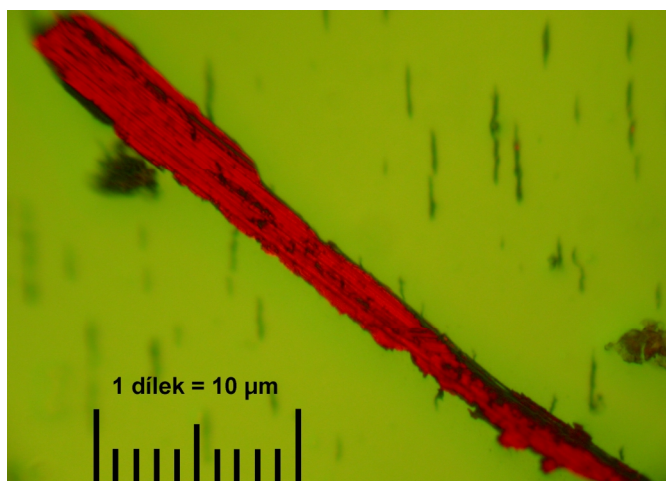
Výsledkem ferrografické analýzy motorových olejů provedené na přístroji REO 1 byly získané ferrogramy. Ty byly podrobeny zkoumání na bichromatickém mikroskopu H 6000. Postupně byly prozkoumávány jednotlivé ferrogramy a pořízeny fotografie z počátku a konce ferrogramu a také fotografie vybraných částic a nečistot. Fotodokumentace byla zhotovena digitálním fotoaparátem Nikon Coolpix 4500. Částice byly vyhodnoceny porovnáním s atlasem otěrových částic pro ferrografii firmy Reo Trade, s.r.o. Byly hodnoceny zejména morfologické vlastnosti částic (velikost, tvar, obrys, barva).

Částice jsou na ferrogramu uspořádány od největších magnetických částic, jejichž výskyt je zejména ve vstupní oblasti ferrogramu (57 mm od konce), až po nejmenší (menší než 2 – 3  $\mu\text{m}$ ), přibližně 53. mm. Ve vstupní oblasti se zachytí největší magnetické částice, protože magnetická síla, která je přitahuje, je úměrná jejich velikosti. Pokud zůstává tvar částic stejný, je jejich pohyb dolů po fólii závislý na velikosti, řízené poměrem objemu částice vůči její ploše. S rostoucí vzdáleností od vstupní oblasti klesá i koncentrace a velikost částic (až na částice < 0.5  $\mu\text{m}$ ). Největší analytický význam má tedy část stopy o délce 5 mm, jež obsahuje většinu kovových magnetických částic. Magnetické částice (zejména ze slitin železa) jsou seřazeny do pruhů (tzv. řetízků – strings) sledujících siločáry seskupení magnetů umístěného pod fólií. Tyto řetízky jsou kolmé na směr toku kapaliny. Při zhotovování obrazových záznamech byl používán objektivový mikrometr (obr. 24). V další části této kapitoly jsou prezentovány vybrané ferrogramy. Kompletní fotodokumentace je obsažena na přiloženém CD ve složce Ferrogramy.

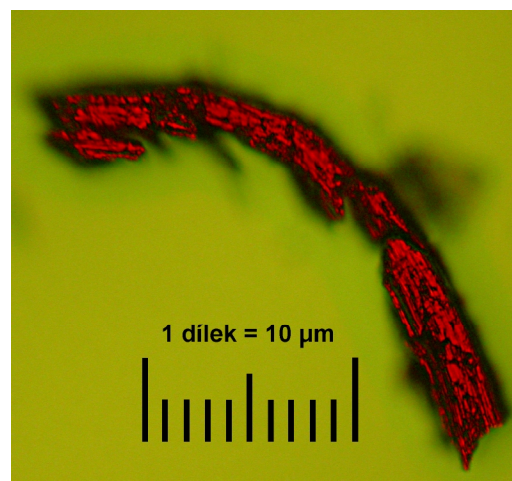
#### Úprava fotografií

Fotografie byly v případě nutnosti dodatečně mírně doostřeny a bylo k nim přidáno měřítko velikosti částic. K tomuto účelu byl použit software Adobe Photoshop 7.0 CE.

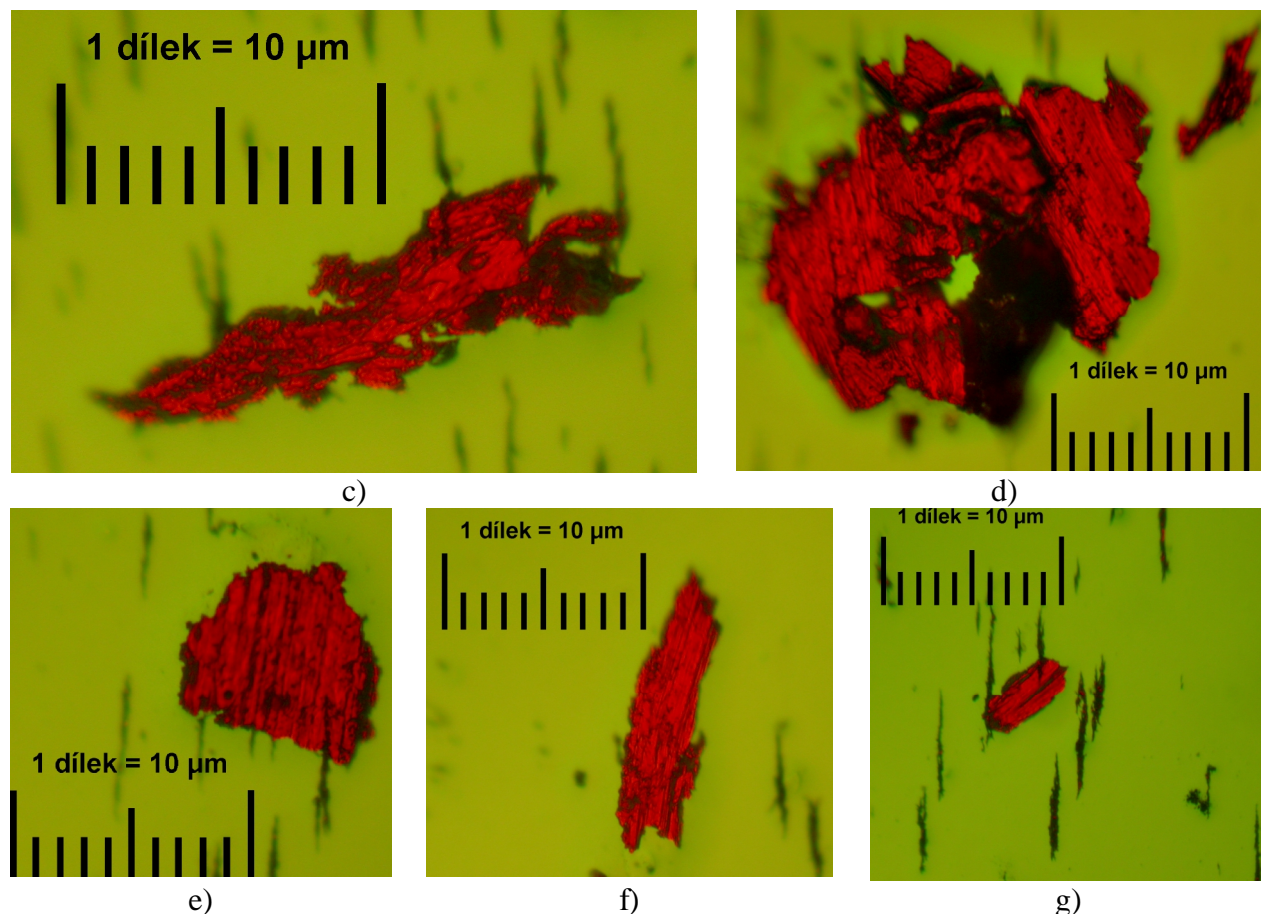
#### Vzorek č. 1



a)



b)



Obr. 56 Ferrogram motorového oleje Shell Helix Ultra VX 5W30 – Longlife, Škoda Octavia II 1,9 TDI, kilometrový proběh oleje 42 333 km, celkem ujeté 83 824 km

- a); b) částice typické pro třítělovou abrazi
- c); d) částice únavového opotřebení s vydrolenou oblastí
- e); f) typické lamelární částice vzniklé v místě valivého kontaktu
- g) řetízky adhezivního opotřebení se zachycenou lamelární částicí

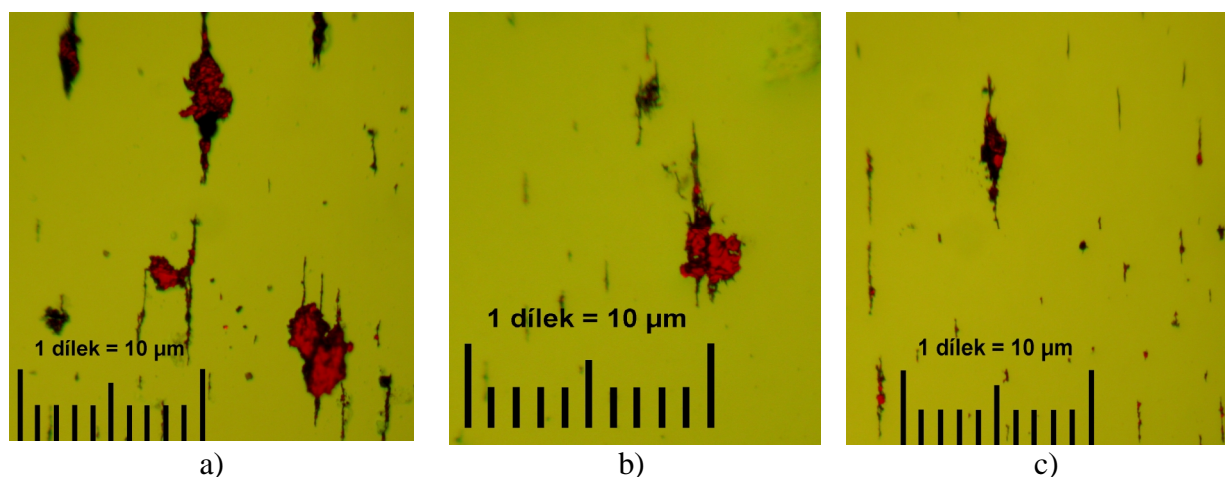
Analyzovaný vzorek oleje byl odebrán z vozidla Škoda Octavia II, které mělo prodloužené servisní intervaly. Pro mazání byl použit výrobcem doporučený motorový olej (Shell Helix Ultra VX 5W30 – Longlife 3).

Ferrografická stopa obsahovala mimořádně velké množství lamelárních částic, které se sice tvoří po celou dobu života zařízení, avšak na počátku únavového vydrolování jejich množství prudce stoupá; k tomu došlo i v tomto případě. Lamelární částice vznikají po průchodu místem valivého kontaktu a na jejich povrchu je pak často velké množství mikrojamek a děr (obr. 56 d). Výskyt většího počtu abrazivních částic v oleji je v tomto případě spojen i přítomností částic třítělové abrace. Při ní vznikají zpravidla velmi dlouhá a široká lístkovité útvary, jejichž povrch je zbrzděn podélnými rýhami (obr. 56 a, b).

Pro uživatele by měla být prvním krokem ke zlepšení třecích poměrů v motoru především častější výměna olejové náplně – to potvrzuje kromě výsledků ferrografické analýzy i infračervená spektrometrie. Dále by měl uživatel věnovat větší pozornost i vzduchovému filtru, přes který se do motoru dostává spolu s nasávaným vzduchem i křemičitý prach. Pokud by se v dalším provozu neomezila tvorba lamelárních částic i při menším kilometrovém proběhu, pak dochází pravděpodobně k únavovému rozpadu Beilbyho vrstvy. To by vyžadovalo pečlivou kontrolu všech třecích dvojic v motoru a ložisek.



## Vzorek č. 2

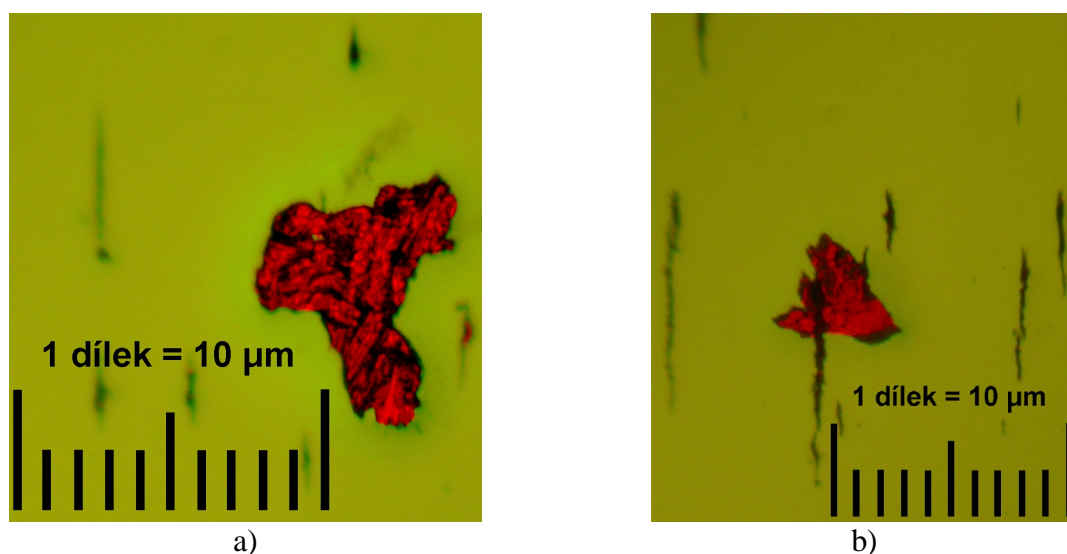


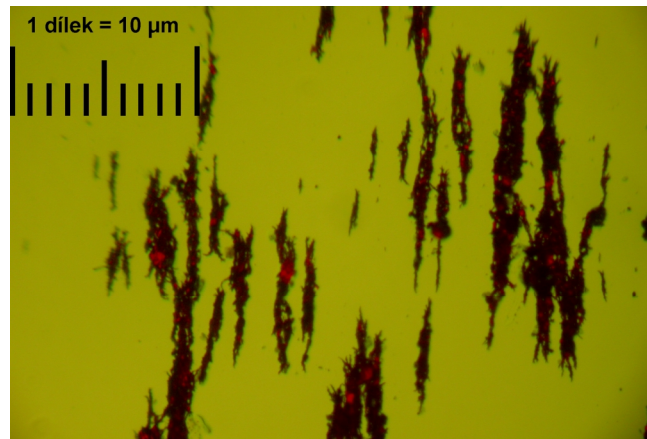
Obr. 57 Ferrogram motorového oleje Shell Helix Plus 5W40, Škoda Fabia 1,2 HTP, kilometrový proběh oleje 15 308 km, celkem ujetu 60 405 km

- a) lamelární částice zachycené v řetězcích částic adhezivního otěru
- b) částice typická pro mezní opotřebení na konci ferrogramu
- c) řetězky submikronového ferromagnetického otěru

Lamelární částice (obr. 57 a) se ve vzorku č. 2 vyskytovaly jen ojediněle, i jejich malé rozměry nasvědčují tomu, že třecí poměry v motoru jsou velmi dobré a Beilbyho vrstva je v dynamické rovnováze. Ve ferrogramu byla četnost a velikost řetězců adhezivního opotřebení (obr. 57 c) menší, než je tomu v obvyklých případech. Adhezivní opotřebení je normálním postupným opotřebením spolupůsobících povrchů, adhezivní otěr je výsledkem normálních kluzných a valivých podmínek třecích dvojic ve stroji. Jeho tvorba do značné míry spojena se znečištěním oleje abrazivou. Celkově velmi nízký obsah otěrových částic v oleji svědčí o kvalitní péči o vozidlo ze strany uživatele. Použití motorového oleje Shell Helix Plus 5W40 ve vozidle Škoda Fabia 1,2 HTP je jeví jako optimální.

## Vzorek č. 3





c)

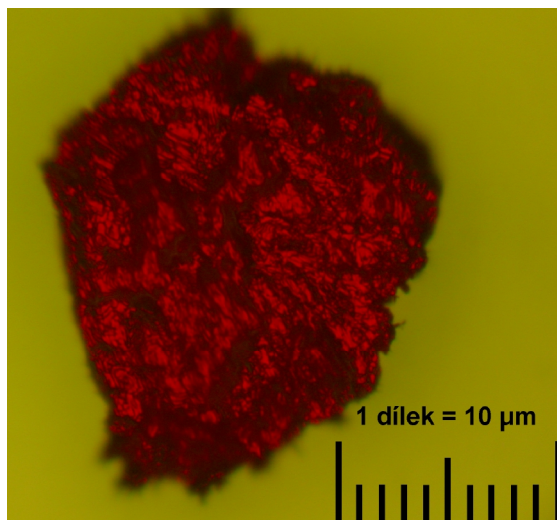
Obr. 58 Ferrogram motorového oleje Shell Helix Super 15W40, Škoda Felicia Pickup 1,3 MPI, kilometrový proběh oleje 15 067 km, celkem ujetu 90 130 km

- a) typická částice způsobená valivým třením (se zaostřením na její povrch)
- b) lamelární částice s vydrolenou oblastí
- c) řetízky adhezivních částic na začátku ferrogramu

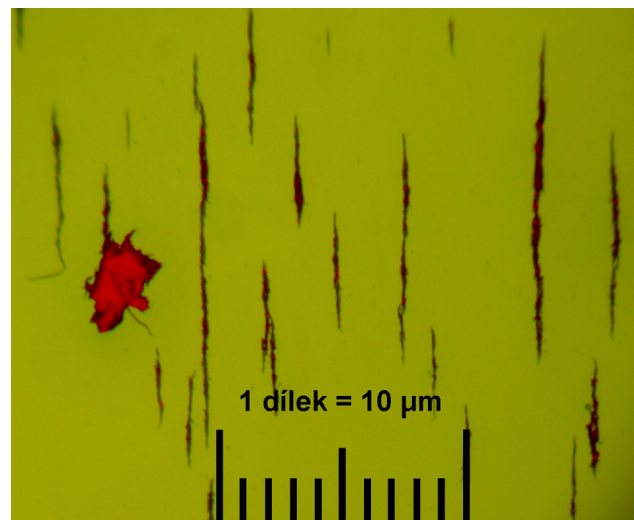
Ferrogram motorového oleje Shell Helix Super 15W40 odebraný ze 7 let starého vozidla Škoda Felicia Pickup obsahoval větší koncentraci řetízku adhezivních částic (obr. 58 c). To je může být způsobeno lokálně zhoršeným mazáním nebo vnikáním křemičitého prachu spolu s nasávaným vzduchem. Lamelární částice (obr. 58 b) se sice na ferrogramu vyskytovaly, ale jejich množství a velikost lze vzhledem k stáří vozu považovat za přijatelné.

Po výměně oleje za nový se tvorba otěru zpravidla vrátí do normálních mezí. Po vyhodnocení výsledků infračervené spektrometrie byla zjištěna přítomnost zbytkových protiotěrových přísad. Stávající výměnný interval lze proto ponechat s doporučením dále důsledně provádět kontrolu olejové náplně a ferrograficky monitorovat výskyt částic typických pro mezní resp. únavové opotřebení.

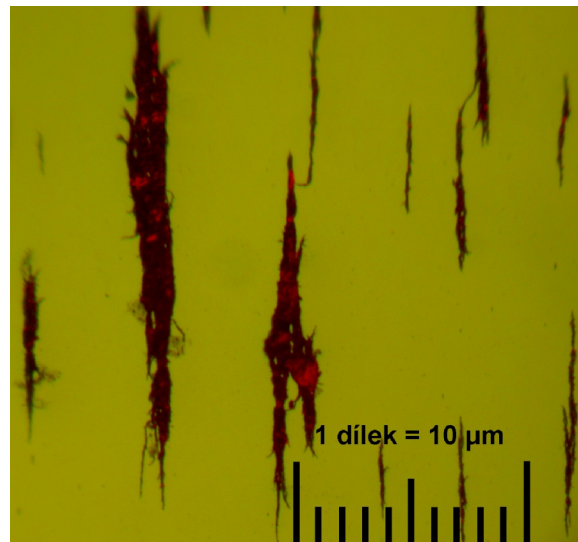
#### Vzorek č. 4



a)



b)



c)

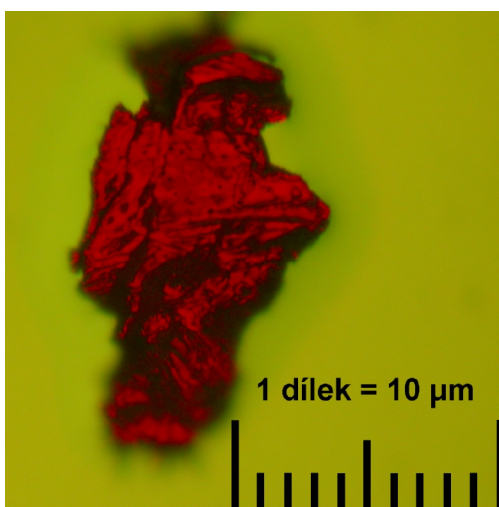
Obr. 59 Ferrogram motorového oleje Mogul Racing 5W40, Škoda Fabia 1,9 TDI, kilometrový proběh oleje 15 009 km, celkem ujetu 105 012 km

- a) velká plochá částice (se zaostřením na její povrch s četnými nerovnostmi)
- b) řetízky adhezivního opotřebení se zachycenou lamelární částicí
- c) řetízky adhezivního částic na začátku ferrogramu

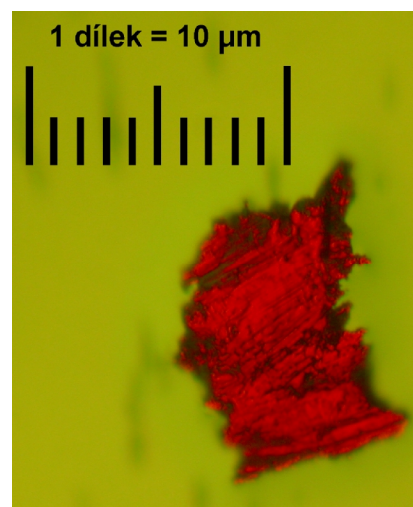
Syntetický motorový olej Mogul Racing 5W40 použitý ve vozidle Škoda Fabia 1,9 TDI obsahoval po 15 tis. km jen malý počet lamelárních částic, typických pro kombinaci abrazivního a únavového opotřebení. Znečištění oleje abrazivy může prudce zvýšit rychlost separace Beilbyho vrstvy při neměnné rychlosti její tvorby, a proto se součásti rychleji opotřebovávají. Rovněž velikost částic roste a jejich povrch je hrubší (obr. 59 a).

Uživatel by měl čistotě oleje věnovat zvýšenou pozornost (i v souvislosti se stavem vzduchových filtrů např. při provozu v prašném prostředí). Výměnný interval není nutno vzhledem jinak k malému opotřebení a výsledkům IČ-analýzy zkracovat. Celkově stav oleje svědčí o kvalitní servisní péči a vhodně zvolené olejové náplni.

#### Vzorek č. 5

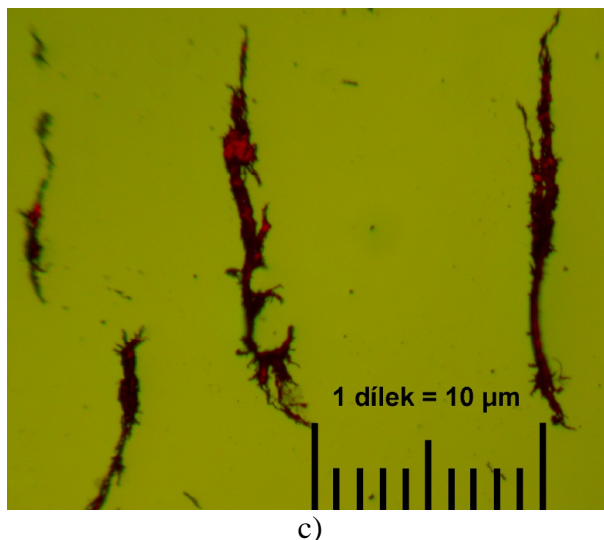


a)



b)





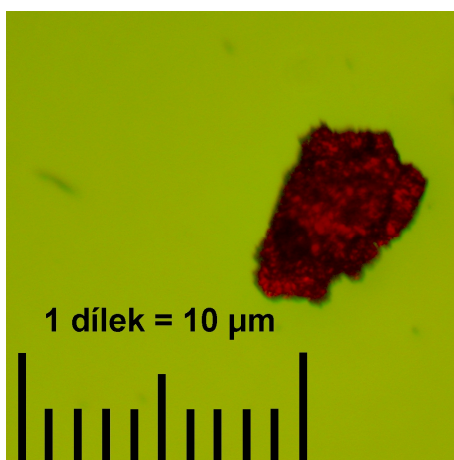
Obr. 60 Ferrogram motorového oleje Castrol Formula SLX 0W30 - Longtec, Mazda 6 2,0 16V, kilometrový proběh oleje 18 431 km, celkem ujetu 58 483 km

- a) velká částice mezního opotřebení s vydrolenými oblastmi (se zaostřením na její povrch)
- b) lamelární částice únavového opotřebení s vydrolenou oblastí
- c) řetízky adhezivních částic

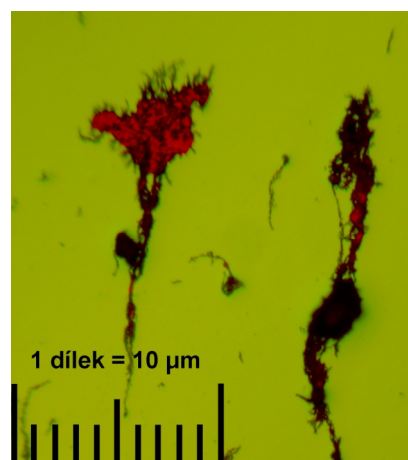
Ve vozidle Mazda 6 byl použit špičkový syntetický motorový olej Castrol Formula SLX 0W30 – Longtec 3. Nález většího počtu částic abrazivních na ferrogramu nemusí být provázen výskytem typických částic řezného opotřebení (obr. 56 a, b), ale spíše vyšší koncentrací adhezivního otěru (obr. 60 c). Lamelárních částice (obr. 60 b) se tvoří po celou dobu života zařízení, ale jejich zvýšené množství, které by nasvědčovalo únavovému opotřebení, se na ferrogramu nevyskytovalo.

Ferrografická analýza sice neprokázala zvýšené množství lamelárních částic, které by bylo možno očekávat na základě výsledků IČ-spektrometrie. IČ-analýza prokázala úplné vyčerpání protiotěrových přísad již po 18 tis. km proběhu. Proto lze doporučit změnu značky oleje při dodržení požadavku výrobce na jeho výkonovou i viskozitní klasifikaci.

#### Vzorek č. 6

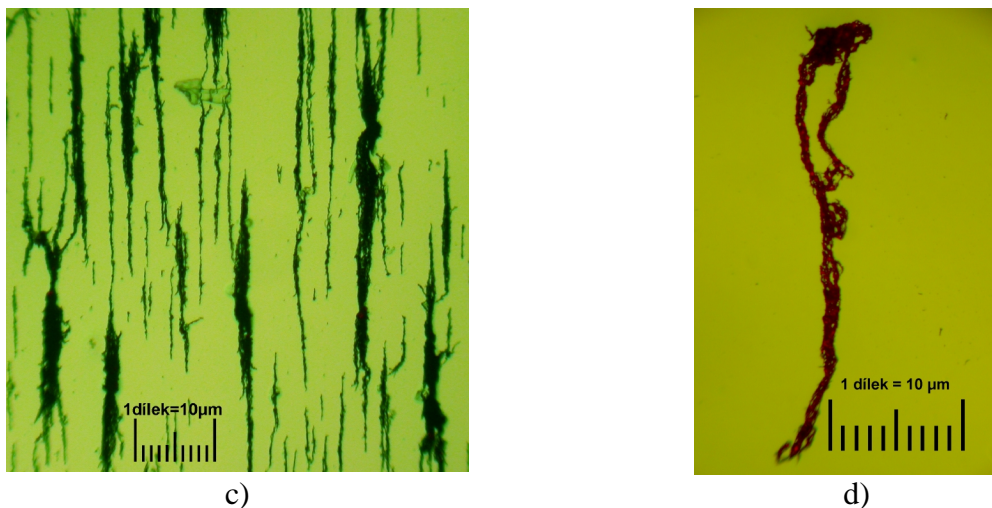


a)



b)



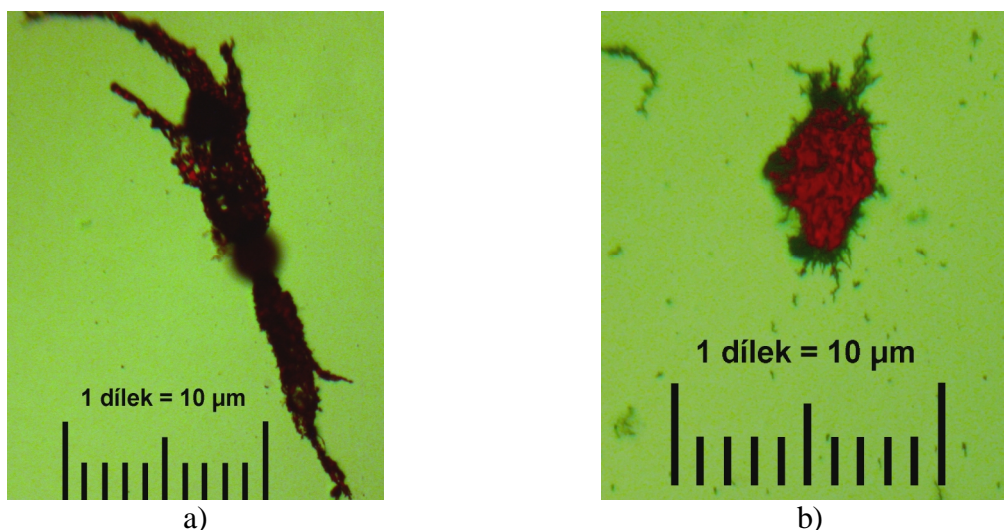


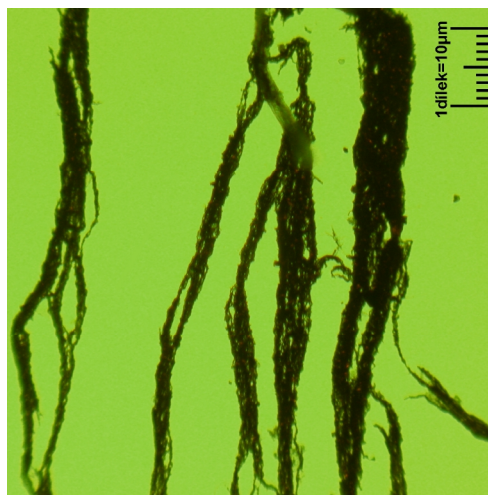
Obr. 61 Ferrogram motorového oleje Mogul GX-FE 10W40, Škoda Fabia 1,2 HTP, kilometrový proběh oleje 693 km, celkem ujetu 3 893 km

- lamelární částice s hrubším povrchem
- řetízky adhezivního opotřebení se zachycenou lamelární částicí
- řetízky adhezivního částic na začátku ferrogramu, fotografováno se zeleným filtrem v transmitantním osvětlení
- detail řetízku submikronového ferromagnetického otěru

Vzorek č. 6 se od předchozích liší tím, že se jedná o vozidlo v záběhu. Pro toto období je charakteristické, že v jeho průběhu dochází k vyrovnávání nerovností povrchu daných výrobou, jsou ulamovány výstupky a jemné úlomky vyplňují propadlá místa a mikroskopické rýhy. Povrch je tak vyrovnáván, snižuje se jeho drsnost. S procesy tohoto druhu souvisí výskyt lamelárních částic na obr. a) obsažených ve ferrogramu. V důsledku extrémně malého kilometrového proběhu (693 km) se však ve ferrogramu vyskytovaly tyto částice pouze ojediněle. Řetízky částic adhezivního opotřebení (obr. 61 c), které jsou typické pro přizpůsobování povrchů třecích dvojic, se objevovaly u tohoto vzorků s běžnou četností. Uživatel může prodloužit servisní výměnný interval jak na základě ferrografického hodnocení, tak i vzhledem k výsledkům IČ analýzy, která u odebraného oleje neprokázala po jeho ročním používání žádné známky degradace ani kontaminace.

#### Vzorek č. V-1





c)

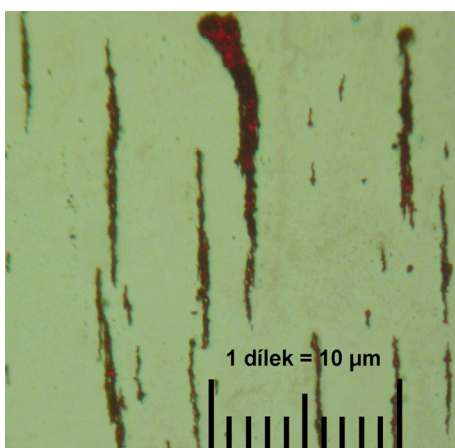
Obr. 62 Ferrogram motorového oleje OMV Eco Truck Extra 10W40, Volvo FH 12 500, kilometrový proběh oleje 64 980 km, celkem ujeté 64 980 km

- a) kulička únavového opotřebení zachycená shlukem řetízků adhezivních částic
- b) lamelární částice se zaostřením na její povrch
- c) dlouhé řetízky adhezivního opotřebení na začátku ferrogramu

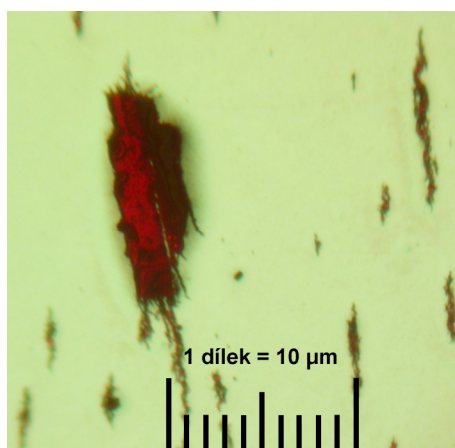
Ferrogram motorového oleje OMV Eco Truck Extra 10W40 obsahoval velké množství řetízků adhezivních částic, které ale byly u vozidla záběhu předpokládány. Naopak sferoidní artefakty (obr. 62 a) se na ferrogramech příliš často neobjevují a většinou důsledkem únavového opotřebení valivých ložisek. Vzhledem k faktu, že má vozidlo najeto pouze 65 tis. km je jejich výskyt výsledkem nadměrného zatížení třecích dvojic.

Prvním krokem ke zlepšení by mělo být pro uživatele zkrácení výměnného intervalu a především ohleduplnější zacházení k agregátu. Další sledování průběhu opotřebení lze jen doporučit.

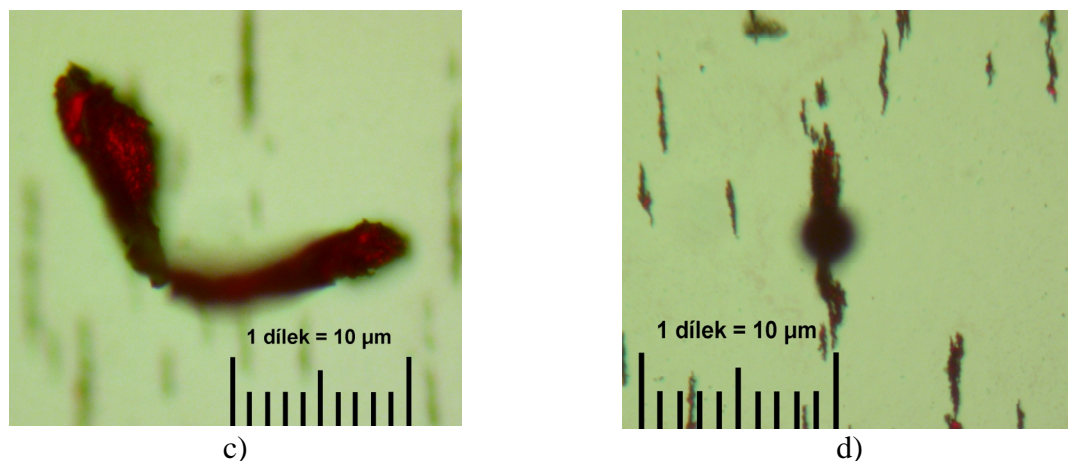
#### Vzorek č. MB-1



a)



b)



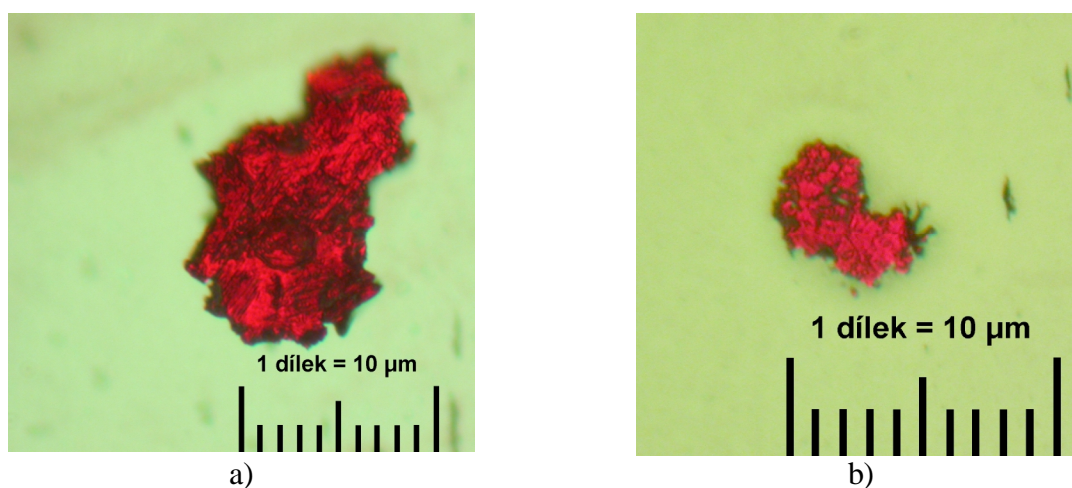
Obr. 63 Ferrogram motorového oleje Shell Rimula Ultra 5W30, Mercedes-Benz Actros 1844, kilometrový proběh oleje 100 056 km, celkem ujetu 100 056 km

- a) řetízky adhezivního opotřebení
- b) lamelární částice únavového opotřebení s vydrolenou oblastí
- c) plasticky deformovaná částice řezného opotřebení
- d) kulička únavového opotřebení zachycená řetízky adhezivního opotřebení

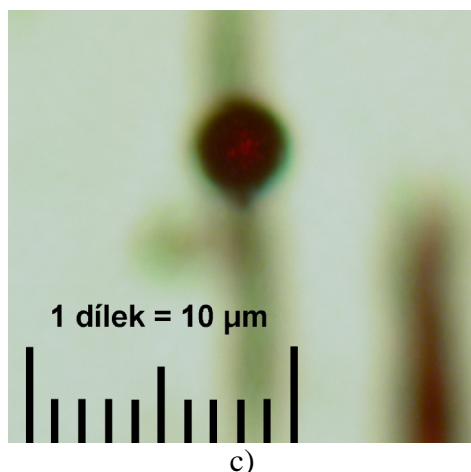
Syntetický motorový olej Shell Rimula Ultra 5W30 odebraný při první servisní prohlídce z dlouhodobě sledovaného vozidlo Mercedes-Benz Actros 1844 obsahoval zvýšený obsah řetízků adhezivního opotřebení (obr. 63 a), ten lze však vysvětlit tím, že bylo sledované vozidlo v záběhu. Obsahoval však i lamelární částice a sferoidní artefakty. Samotné lamelárních částice by nemusely být následkem únavového opotřebení, protože se tvoří po celou dobu řízení, ale výskyt kuliček únavového opotřebení nasvědčuje o opaku. Částice abarizivního opotřebení zase souvisí s vnikáním křemičitého prachu spolu s nasávaným vzduchem.

Doporučení pro uživatele je zaměřeno především na péči o vzduchový filtr, který nebyl během takto dlouhého proběhu ani jednou vyčištěn nebo vyměněn. To je i vzhledem k faktu, že je vozidlo také provozováno v prašném prostředí cementárny zarážející. Vnikáním křemičitého prachu do motoru se zamezí jeho správné funkci, sníží se tlak oleje ve válcích a projeví se celkové opotřebení a snížení výkonu celého motorového agregátu.

#### Vzorek č. MB-2







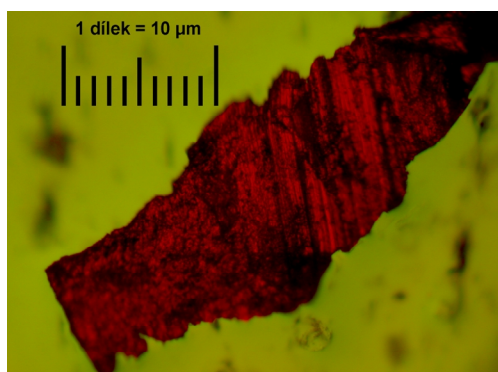
Obr. 64 Ferrogram motorového oleje Shell Rimula Ultra 5W30, Mercedes-Benz Actros 1844, kilometrový proběh oleje 95 735 km, celkem ujetu 195 791 km

- a) lamelární částice vzniklá v místě valivého kontaktu se stopou po sferoidním artefaktu
- b) částice únavového opotřebení s množstvím mikrojamek a děr
- c) kulička únavového opotřebení se zaostřením na její povrch

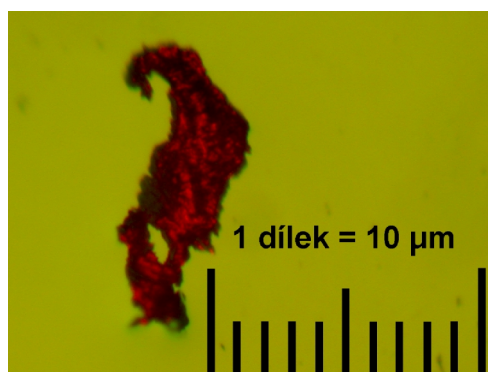
Při druhé servisní prohlídce sledovaného vozidla Mercedes-Benz Actros 1844 již olej neobsahoval částice abrazivního opotřebení. Výměna motorového oleje spojená s výměnou olejového a vzduchového filtru v rámci servisní prohlídky byla k zamezení jejich tvorby dostačující. Olej opět obsahoval sferoidní artefakty a lamelární částice únavového opotřebení. Jejich rozměry a množství však v porovnání s první servisní prohlídkou vzrostly. Největší kulička únavového opotřebení zachycená na ferrogramu měla velikost 4  $\mu\text{m}$  (obr. 64 c) a svědčí o rozvoji únavové trhliny některé z třecích dvojic.

Uživatelé lze po druhé servisní prohlídce doporučit, aby sledování vozidla pokračovalo při zkráceném servisním intervalu 50 tis. km. spolu s včasnou kontrolou ložisek, které jsou pravděpodobnou příčinou výskytu sferoidních artefaktů v motorovém oleji.

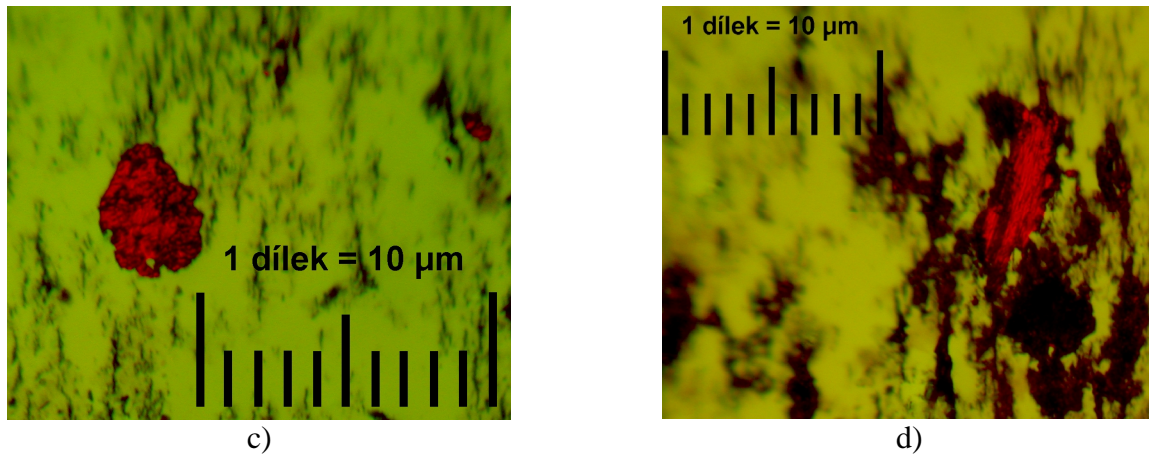
#### Vzorek č. K-1



a)



b)



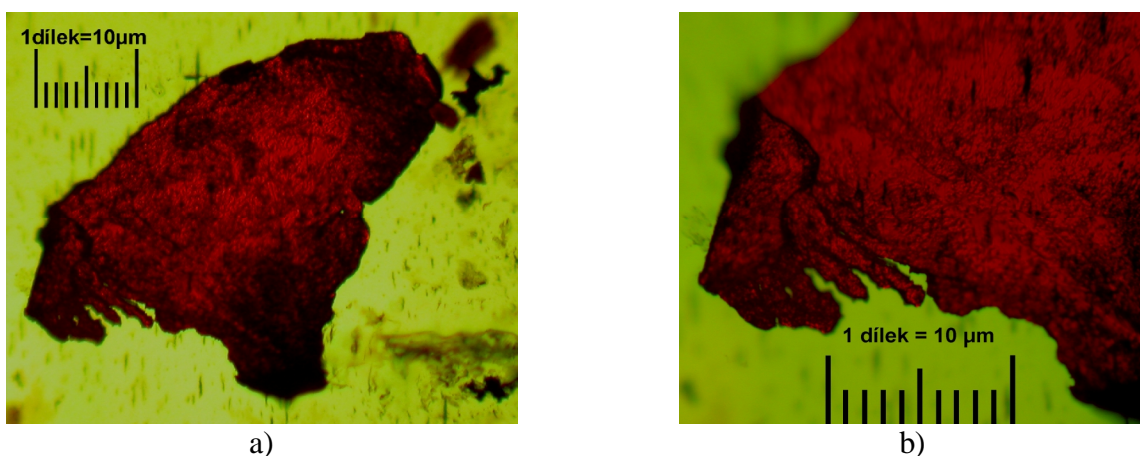
Obr. 65 Ferrogram kompresorového oleje MOGUL Komprimo ONC 68, 1660,5 provozních hodin

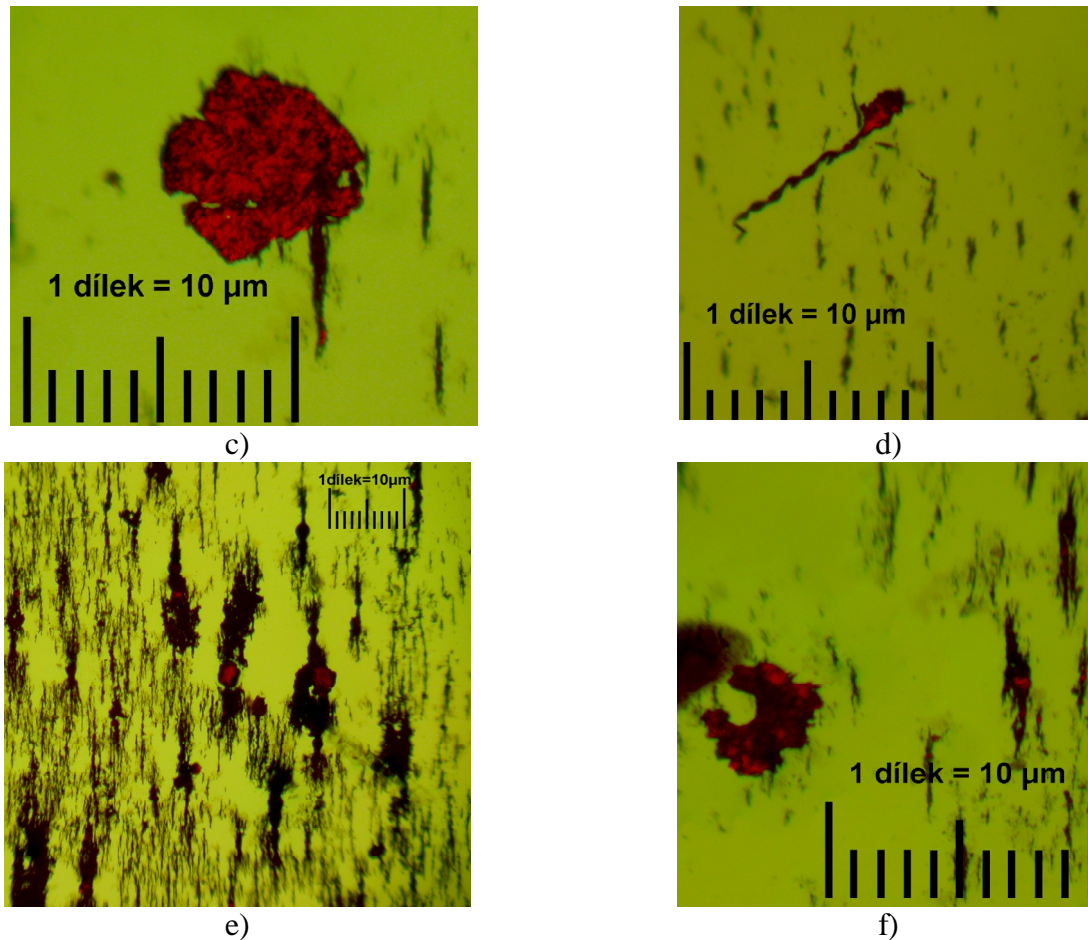
- typická částice způsobené valivým třením se zaostřením na jejích povrch
- částice mezního opotřebení s vydrolenými okraji a plasticky deformovaným koncem
- typická částice únavového opotřebení
- lamelární částice s vydrolenými okraji zachycená v řetízcích adhezivního opotřebení

Při ferrografické analýze se na ferrogramu objevily kromě typických řetízků abrazivního opotřebení také lamelární částice, jak se zaobleným okrajem tak i s vydrolenou oblastí (obr. 65 b). Na obr. 65 a) je pak velká částice s rýhami typickými pro valivé tření.

Lze tedy doporučit častější výměnu olejové náplně a včasnou odstávku kompresoru s důkladnou kontrolou zaměřenou především na ložiska. Pokud by byla ložiska v dobrém stavu, může být příčinou výskytu částice valivého opotřebení zubové čerpadlo, spolu s nedostatečným nebo nefunkčním filtračním systémem. Tuto domněnku potvrzuje i fakt, že byl vzorek oleje při vizuální kontrole čirý.

#### Vzorek č. K-2





Obr. 66 Ferrogram kompresorového oleje MOGUL Komprimo ONC 68, 1343 provozních hodin

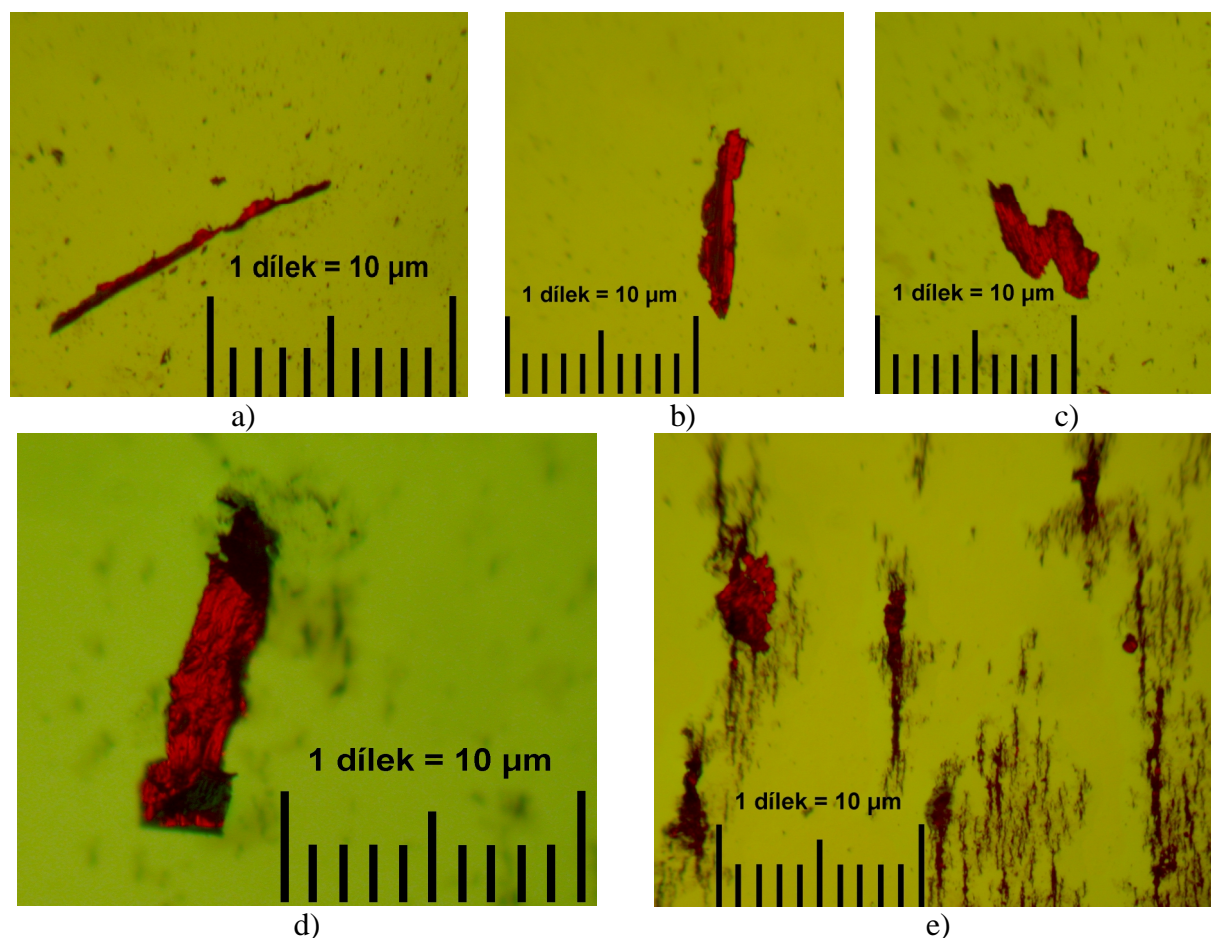
- a); b) typická částice způsobené valivým třením s detailem vydrolené oblasti
- c) typická částice únavového opotřebení s vydrolenou oblastí, vzniklou v průběhu procesu mezního opotřebení
- d) částice řezného opotřebení spirálového tvaru
- e) řetízky adhezivních částic na začátku ferrogramu
- f) částice vzniklá kombinací únavového a abrazivního (řezného) opotřebení

Na ferrogramu kompresorového oleje K-2, který byl v provozu 1343 hodin, se objevily velké částice únavového opotřebení (obr. 66 a), které souvisejí s rozpadem Beíbyho vrstvy. Na obr. 66 d) je pak typická řezná částice spirálového tvaru. Tyto částice vznikají, když povrch tvrdšího členu třecí dvojice proniká do měkčího členu třecí dvojice a odděluje z něj třísky. Přítomnost třísek řezného opotřebení i abraze ukazuje na nenormální třecí poměry v zařízení.

Pro doporučení změny výměnného intervalu by byla potřeba kromě ferrografické analýzy také zkouška oleje na infračervené spectromerii. To je podmíněno dodáním opotřebeného vzorku oleje společně s novým olejem stejného typu. Při výměně oleje lze ale doporučit použití nejprve proplachovacího oleje, ten by zbavil kompresor ulpívajících nečistot a nový olej by pak plnil svoji funkci po delší dobu svého provozu.



## Vzorek č. K-3



Obr. 67 Ferrogram kompresorového oleje MOGUL Komprimo ONC 68, 1000 provozních hodin

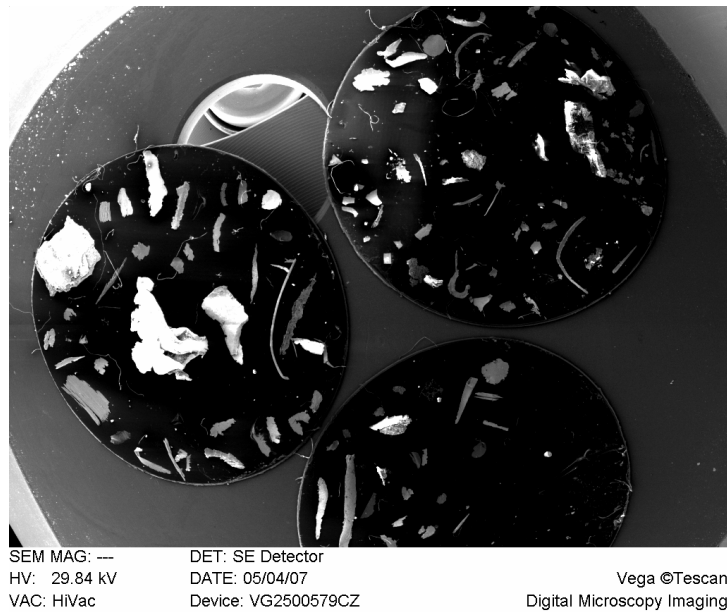
- a); b) částice vzniklé abrazivním opotřebením
- c) plochá částice únavového opotřebením
- d) lamelární částice zachycená na konci ferrogramu
- e) řetízky adhezivních částic spolu s typickou lamelární částicí

Kompresorový olej K-3 měl nejmenší počet provozních hodin. To se ale neprojevilo na ferrogramu, kde byl zvýšený výskyt jak abrazivního opotřebením tak i lamelárních částic. Velké částice způsobené valivým třením se zde sice nevyskytovaly, naopak částice abrazivního opotřebením se zde vyskytovali ve velkém množství (obr. 67 a, b). Tyto částice jsou způsobeny tříbodovou abrazí, kdy zrno abraziva penetruje nejprve povrch měkčího členu a poté odděluje třísku z tvrdšího členu třecí dvojice.

Jako první krok se vždy osvědčuje výměna maziva. Pokud neodstraní tvorbu třísek, je nezbytné odstavit zařízení a nalézt zdroj vysokého řezného opotřebením v mazací soustavě. I v tomto případě lze doporučit kontrolu oleje na IČ a stejný postup při výměně oleje, jako v předcházejícím případě.

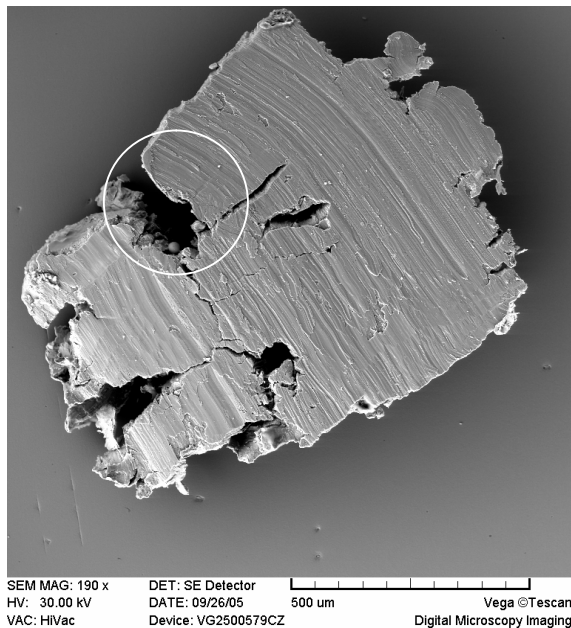
### 3.3.3 Výsledky analýzy olejových filtrů

Demagnetizované částice byly před pozorováním v REM promyty technickým benzínem. Pomocí pinzety umístěny na oboustrannou kruhovou grafitovou podložku o průměru 12 mm. Pro základní orientaci bylo použito zobrazení FISH EYE (obr. 68), další pozorování a dokumentace byla prováděna v režimu RESOLUTION.

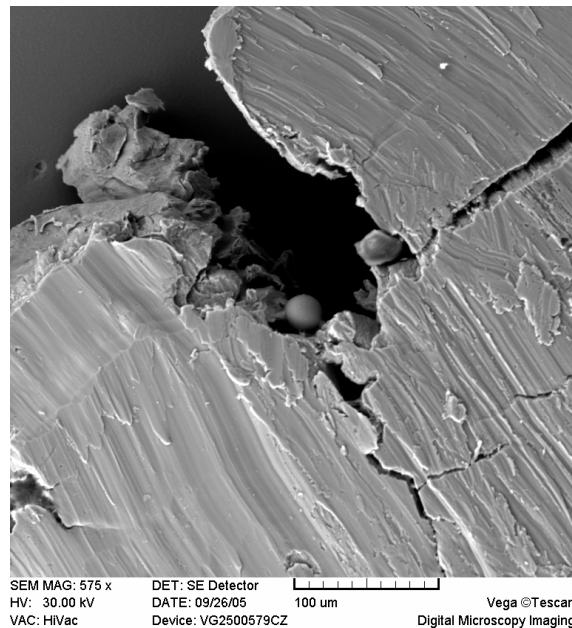


Obr. 68 Vyseparované částice z olejových filtrů připravené pro studium jejich morfologie na REM

### Vzorek č. 1

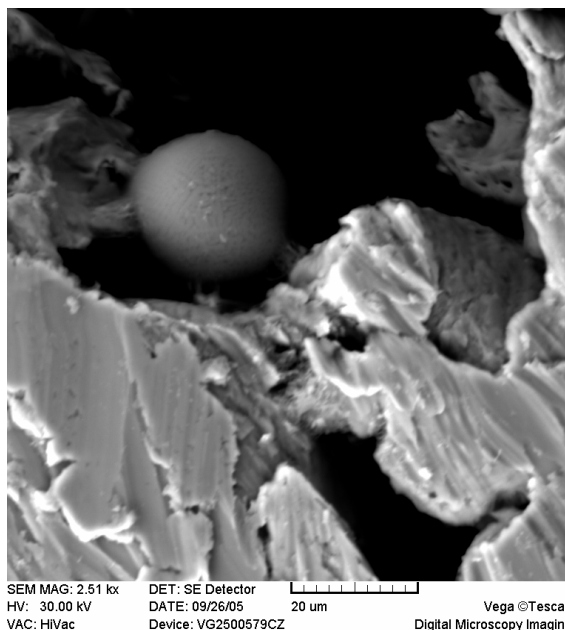


Obr. 69 Lamelární částice únavového opotřebení se zřetelnou trhlinou, v jejímž čele je lokalizována sféroidní částice



Obr. 70 Stopy po kontaktu se součástí z tvrdšího materiálu, detail sféroidů (detail obr. 69)

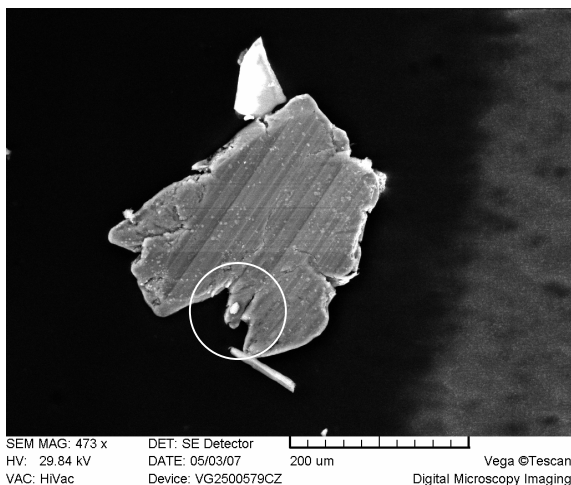




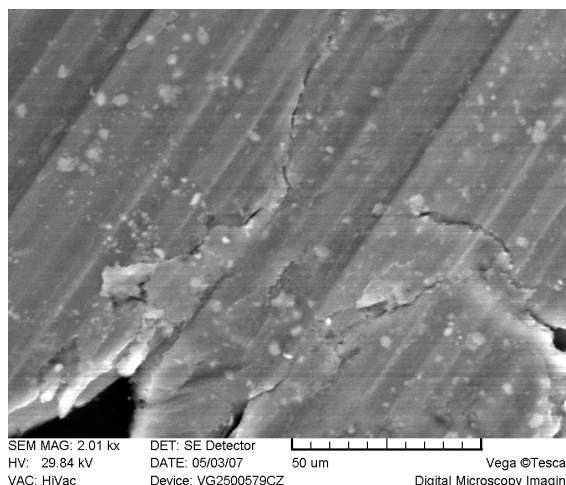
Obr. 71 Sferoidní artefakt typický pro únavové opotřebení, průměr kuličky je rozměrově blízky rozevření čela trhliny v místě dokončení plastického přetvoření materiálu a stabilizace normálních napětí (detail obr. 69)

Olejový filtr obsahoval velké množství lamelárních částic, které jsou typické pro únavové opotřebení a souvisejí s rozpadem Beilbyho vrstvy. Vznikají po průchodu místem valivého kontaktu, čemuž odpovídá i jejich velmi malá tloušťka. Únavovému opotřebení ložisek odpovídá i výskyt sferoidních artefaktů (obr. 71). Jejich velikost napovídá, že byly generovány velkou trhlinou a proto by kontrole ložisek měla být věnována největší pozornost.

## Vzorek č. 2



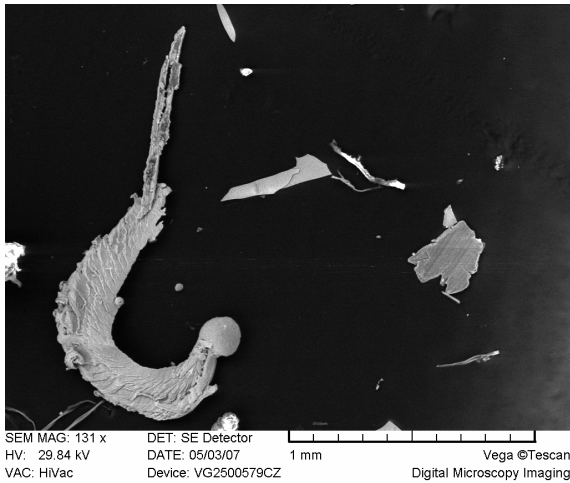
Obr. 72 Tenká lamelární částice vzniklá v místě valivého kontaktu



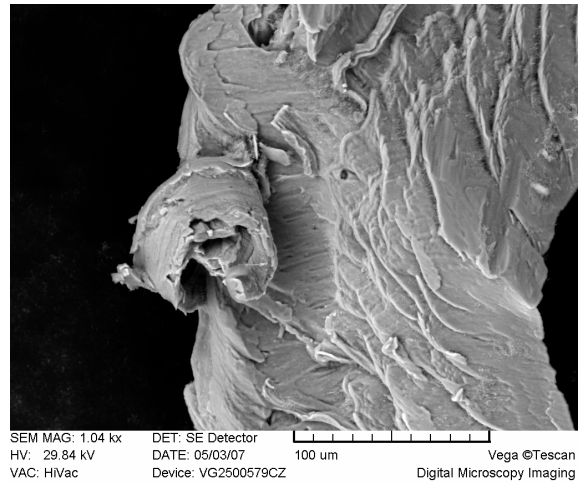
Obr. 73 Detail šíření trhlin z vydrolené oblasti a stopy po kontaktu se součásti z tvrdšího materiálu (detail obr. 72)

Výskyt částic únavového opotřebení podobných jako na obr. 72 byl spíše sporadický, což napovídá velmi dobré péči o motor. Tento názor podporuje i fakt, že velmi dobré výsledky vykazoval i motorový olej na ferrografické analýze.

## Vzorek č. 3



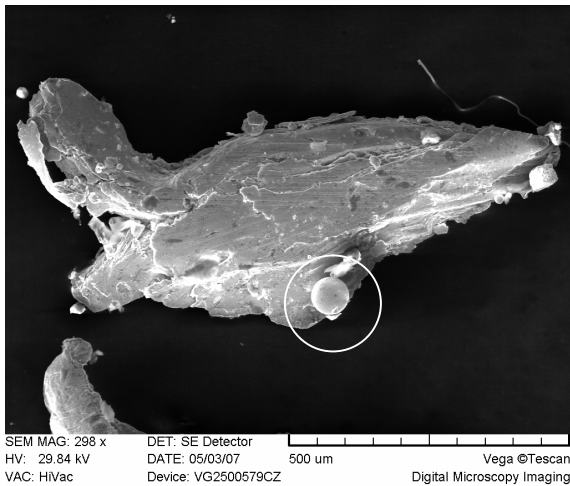
Obr. 74 Měkká tvárná částice ložiskové kompozice, na jejímž zakončení a výstupku je dobře pozorovatelný sferoidní artefakt



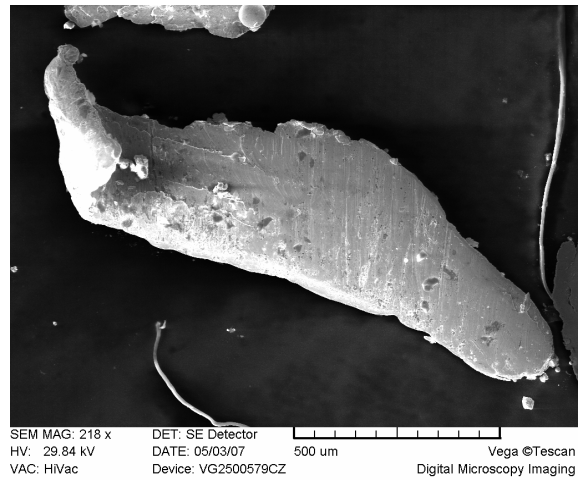
Obr. 75 Stopa řezného opotřebení, vznikající, když povrch jednoho členu třecí dvojice proniká do povrchu druhého a odděluje z něj třísku (detail obr. 74)

Ferrogram motorového oleje nevykazoval velké množství lamelárních částic, ale při analýze olejového filtru byla vyseparována částice ložiskové kompozice o velikosti 1 mm (obr. 74). Na jejím konci byl abnormálně veliký sferoidní artefakt o velikosti 150  $\mu\text{m}$ . To je fakt, který by měl vést k brzké odstávce vozidla a kontrole ložisek. Potvrdila se tak správnost použití analýzy olejových filtrů při hodnocení technického stavu motoru.

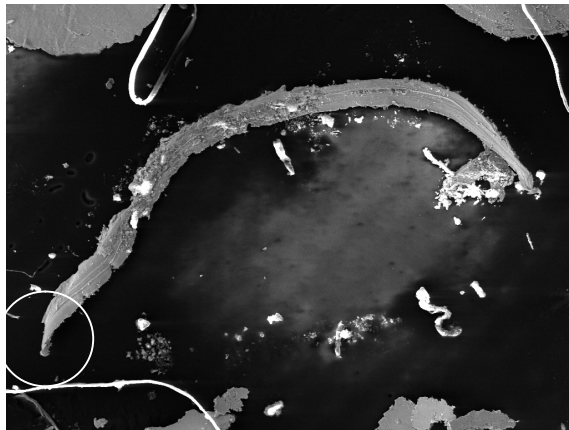
## Vzorek č. 4



Obr. 76 Částice, na jejímž povrchu je kulička únavového opotřebení

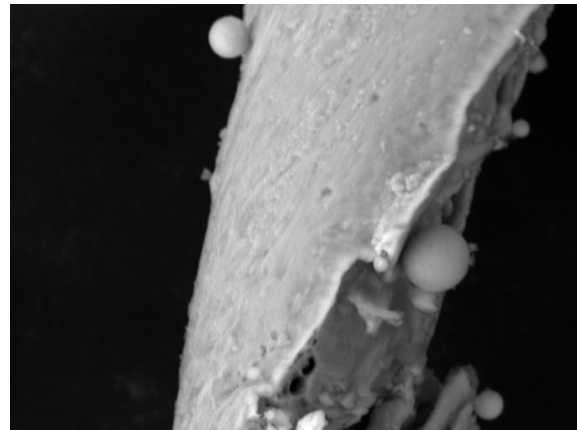


Obr. 77 Částice únavového opotřebení, jejíž konec je plasticky deformován



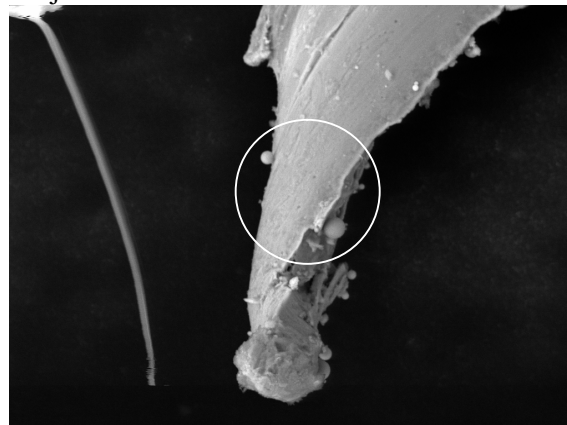
SEM MAG: 135 x DET: SE Detector  
 HV: 29.84 kV DATE: 05/03/07 1 mm Vega ©Tescan  
 VAC: HiVac Device: VG2500579CZ Digital Microscopy Imaging

Obr. 78 Dlouhá částice řezného opotřebení, která vznikla v důsledku vniknutí zrna abraziva do části ložiska; zrno penetrovalo do povrchu měkčího členu a poté odděluje třísku z tvrdšího členu třecí dvojice



SEM MAG: 4.34 kx DET: SE Detector  
 HV: 29.84 kV DATE: 05/03/07 20 um Vega ©Tescan  
 VAC: HiVac Device: VG2500579CZ Digital Microscopy Imaging

Obr. 79 Sferoidní artefakty, jejichž velikost nepřesahuje 5  $\mu\text{m}$ , pocházejí z únavové mikrotrhliny některého z dílů valivých ložisek (detail obr. 78)

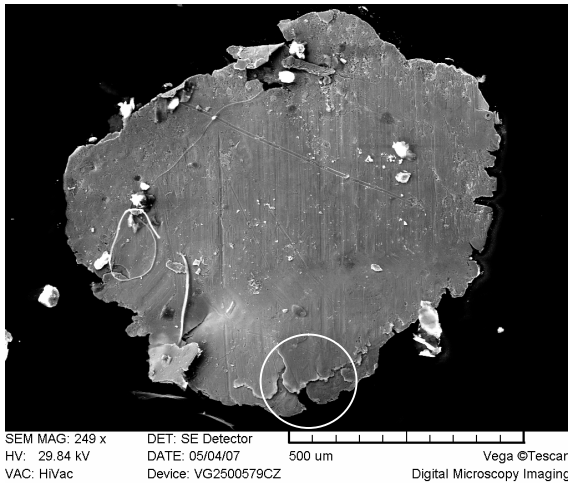


SEM MAG: 1.42 kx DET: SE Detector  
 HV: 29.84 kV DATE: 05/03/07 100 um Vega ©Tescan  
 VAC: HiVac Device: VG2500579CZ Digital Microscopy Imaging

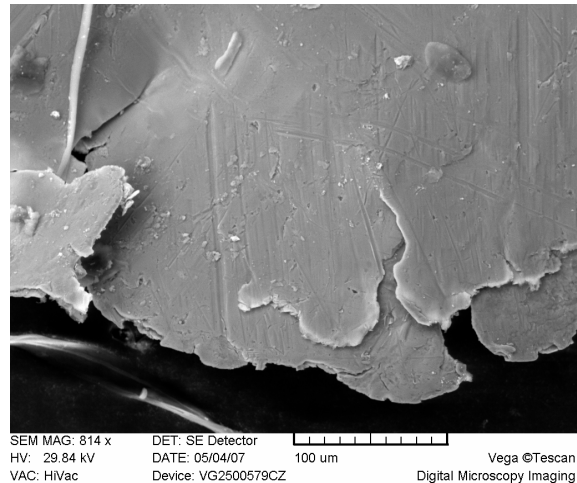
Obr. 80 Konec částice, na jejímž povrchu jsou stopy abraze (detail obr. 78)

Olejový filtr obsahoval mimořádně velké množství částic únavového opotřebení. Některé z nich měly i větší tloušťku než je běžné a odpovídají spíše únavovému vydrolování. To by napovídalo pokročilé únavě ložisek. Tím by byl vysvětlen i výskyt 2 mm dlouhé řezné částice, na jejímž konci jsou kuličky únavového opotřebení (obr. 78). Kontrola ložisek je v tomto případě na místě a měla by proběhnout v co nejkratším časovém horizontu. Analýza olejového filtru tak našla opodstatnění i v tomto případě.

## Vzorek č. 5



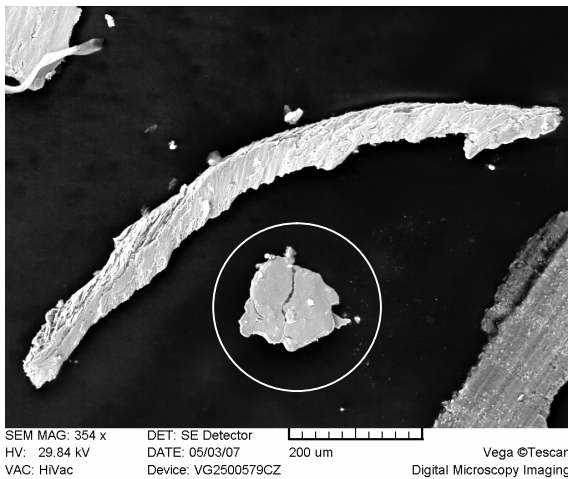
Obr. 81 Tenká lamelární částice vznikající v průchodu částice místem valivého kontaktu



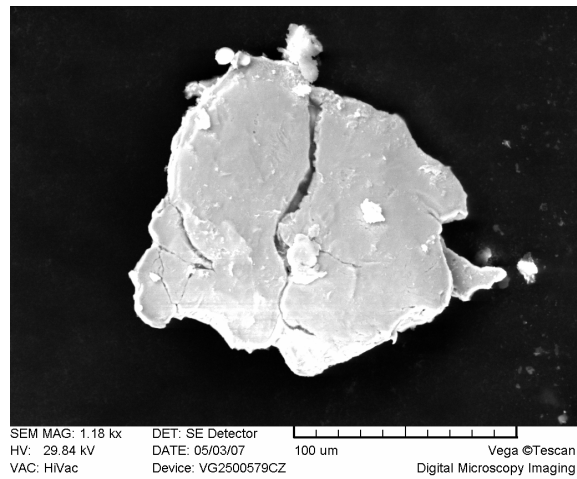
Obr. 82 Oddělování menší lamelární částice, které je způsobeno vysokým kontaktním napětím (detail obr. 81)

Při analýze olejového filtru z Mazdy 6 byl ojedinělý výskyt lamelárních částic únavového opotřebení (obr. 81). Potvrdila v tomto případě výsledek ferrografické analýzy. Jediným negativem tak je výsledek oleje při analýze infračervenou spektrometrií, kde vykazoval olej vyčerpání protiotěrových přísad při malém kilometrovém proběhu, ačkoli použitý olej splňuje požadavky pro prodloužené servisní intervaly.

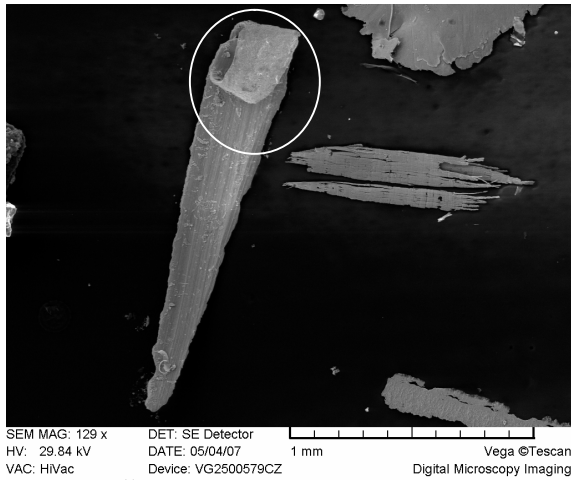
## Vzorek č. MB-1



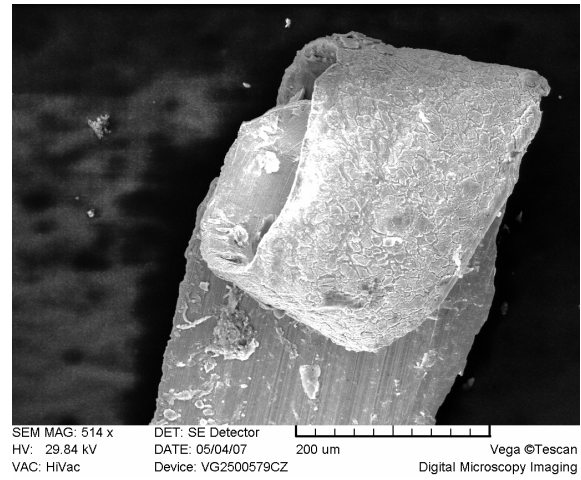
Obr. 83 Částice řezného opotřebení spolu s lamelární částicí únavového opotřebení



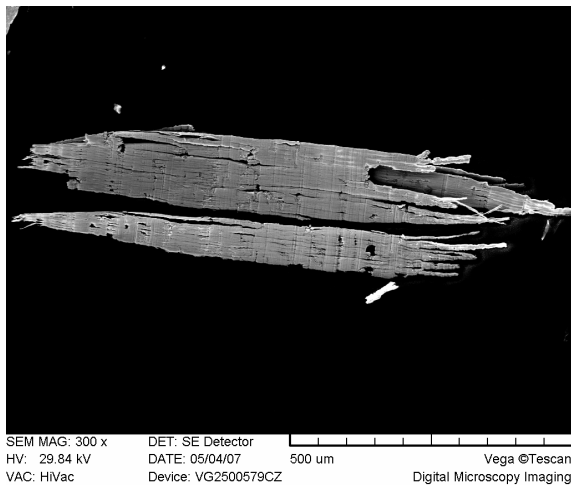
Obr. 84 Detail lamelární částice s hlubokou povrchovou trhlinou (detail obr. 83)



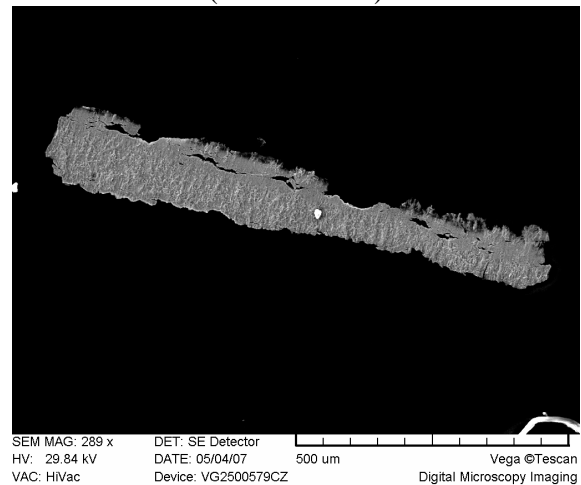
Obr. 85 Částice typická pro třibodovou abrazi



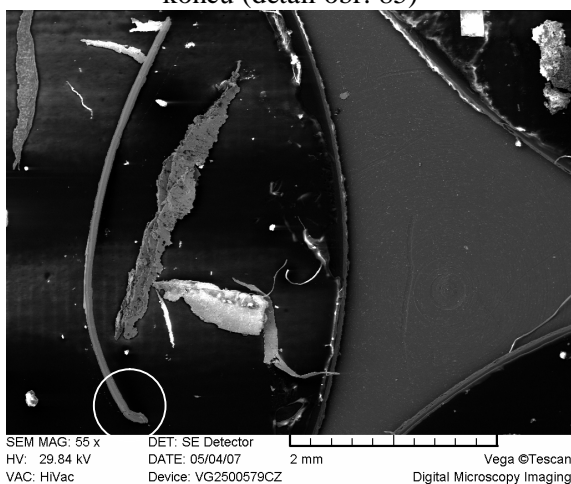
Obr. 86 Spirálovité zakončení částice tvárného materiálu, z něž se tříška odděluje (detail obr. 85)



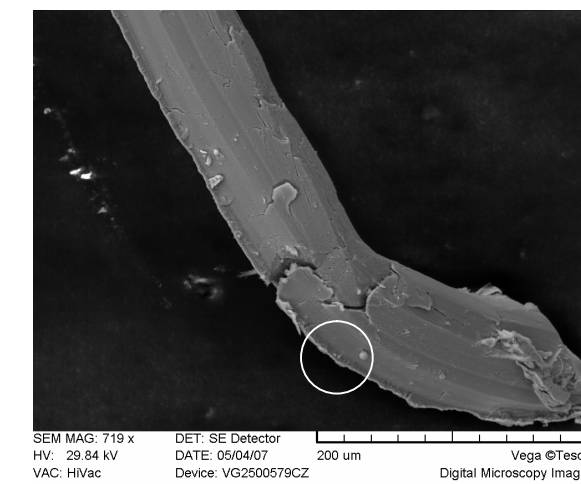
Obr. 87 Dvojice lamelárních částic, jejichž povrch obsahuje hluboké rýhy a trhliny ve velkém množství, až došlo k roztřepení jejich konců (detail obr. 85)



Obr. 88 Lamelární částice na níž je velké množství trhlin a mikrojamek, neobsahuje však rýhy způsobené abrazivním opotřebením



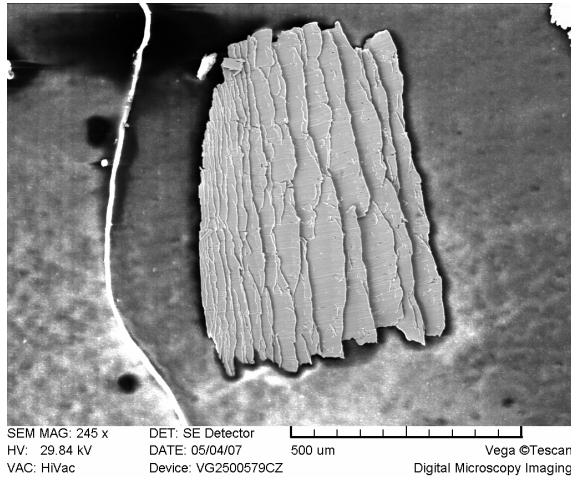
Obr. 89 Detail podložky s vyseparovanými částicemi (velká, 4 mm dlouhá štíhlá částice podobná drátku vznikla pravděpodobně v době záběhu adhezí a mírnou abrazí, při vzájemném přizpůsobování povrchů)



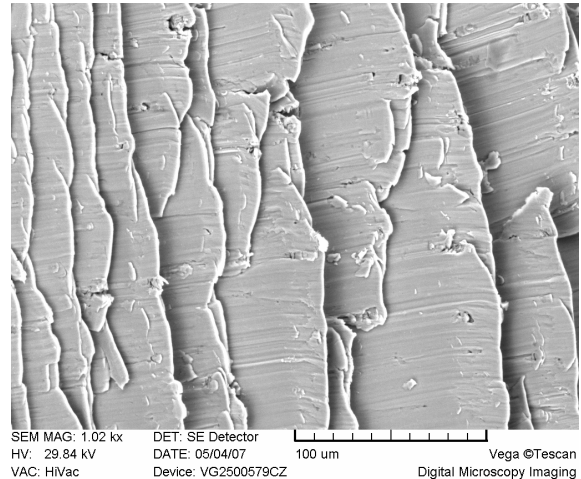
Obr. 90 Na konci štíhlé částice je sferoidní artefakt vznikající při pomalém růstu únavové trhliny zasahující do olejem smáčeného povrchu stopy po abrazivním opotřebením v důsledku působení vysokých tlaků na styku třecích ploch (detail obr. 89)

Hodnocení analýzy olejového filtru z vozidla Mercedes Benz Actros 1844 je ovlivněno faktem že první servisní prohlídka proběhla až po 100 tis. km. Ve filtru tak byly nalezeny jednak částice, které vznikly v době záběhu, a jednak částice řezného opotřebení (obr. 83), které vznikají jako důsledek vnikání křemičitého prachu spolu s nasávaným vzduchem. K zamezení tvorby těchto částic většinou postačuje výměna oleje a lepší péče o vzduchový filtr, pokud by se však tím jejich tvorba neodstranila, bylo by třeba obstarat vozidlo a nalézt zdroj zvýšeného řezného opotřebení v mazací soustavě.

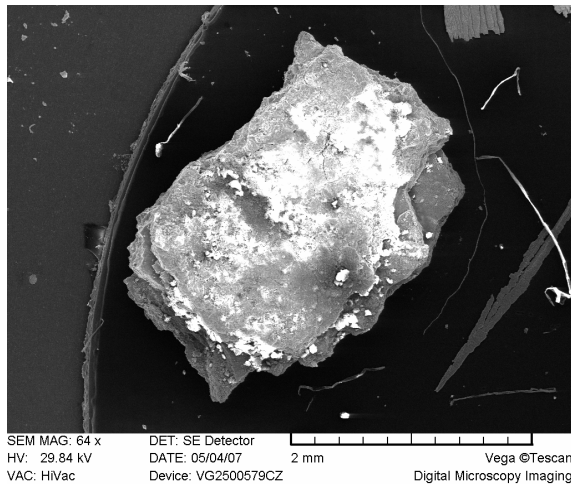
### Vzorek č. MB-2



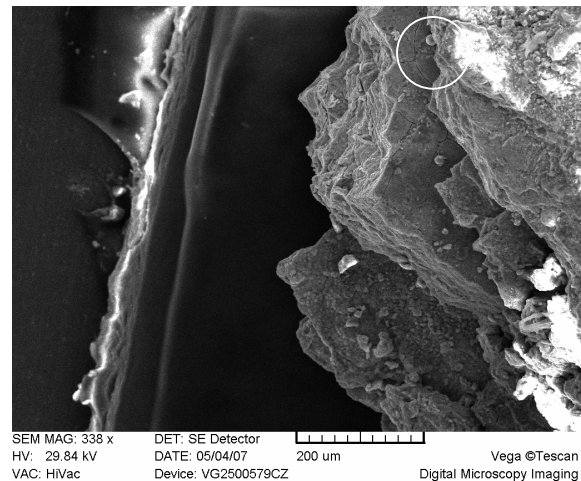
Obr. 91 Částice ložiskové kompozice



Obr. 92 Detail povrchu částice, která vznikla postupným oddělováním tvárného materiálu (detail obr. 91)

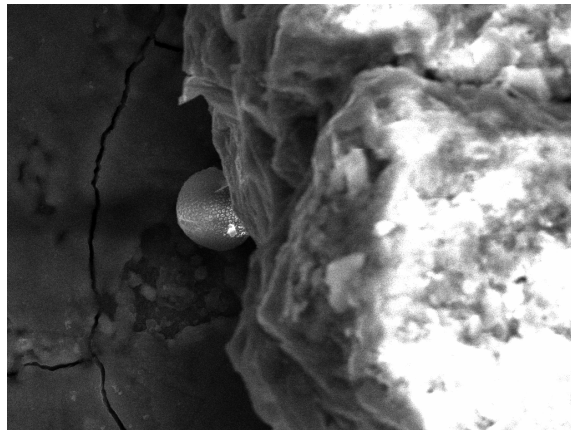


Obr. 93 Trojrozměrná ostrohranná částice únavového vydrolování („Chunky-type“)



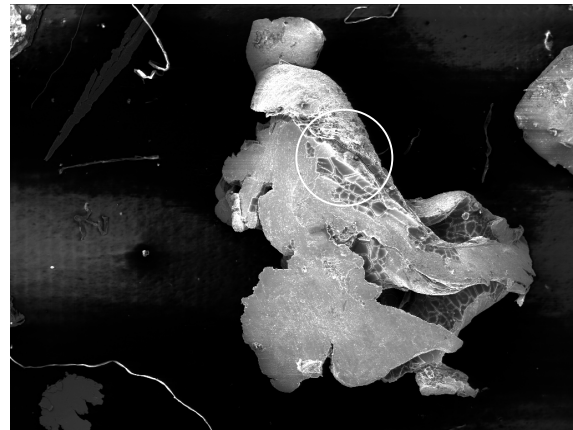
Obr. 94 Detail povrchu částice únavového vydrolování se sferoidním artefaktem (detail obr. 93)





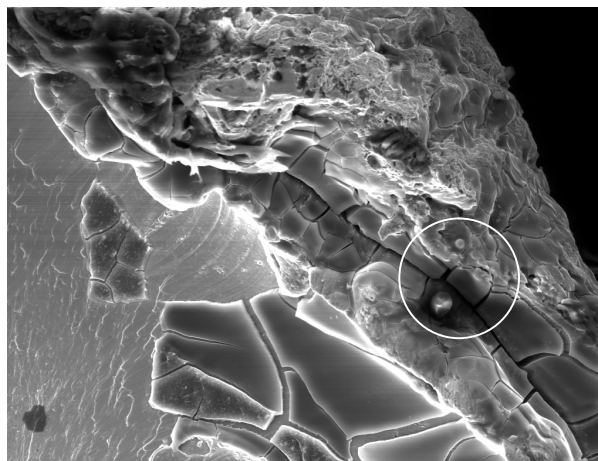
SEM MAG: 2.51 kx DET: SE Detector  
 HV: 29.84 kV DATE: 05/04/07  
 VAC: HiVac Device: VG2500579CZ  
 50 um Vega ©Tescan  
 Digital Microscopy Imaging

Obr. 95 Detail kuličky o průměru 10  $\mu\text{m}$ , která byla generována poměrně hrubou trhlinou (detail obr. 93)



SEM MAG: 62 x DET: SE Detector  
 HV: 29.84 kV DATE: 05/04/07  
 VAC: HiVac Device: VG2500579CZ  
 2 mm Vega ©Tescan  
 Digital Microscopy Imaging

Obr. 96 Shluk plasticky deformovaných lamelárních částic

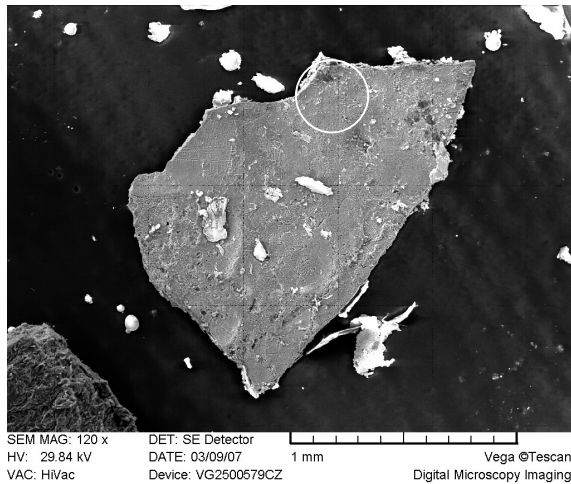


SEM MAG: 421 x DET: SE Detector  
 HV: 29.84 kV DATE: 05/04/07  
 VAC: HiVac Device: VG2500579CZ  
 200 um Vega ©Tescan  
 Digital Microscopy Imaging

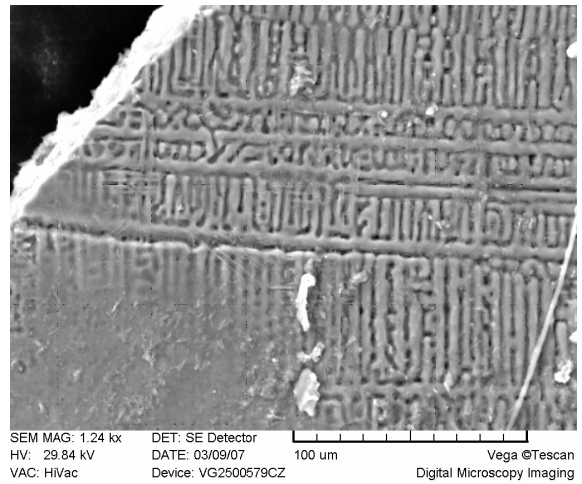
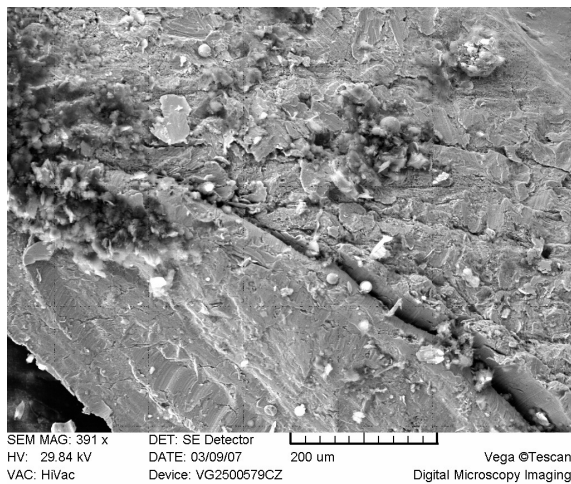
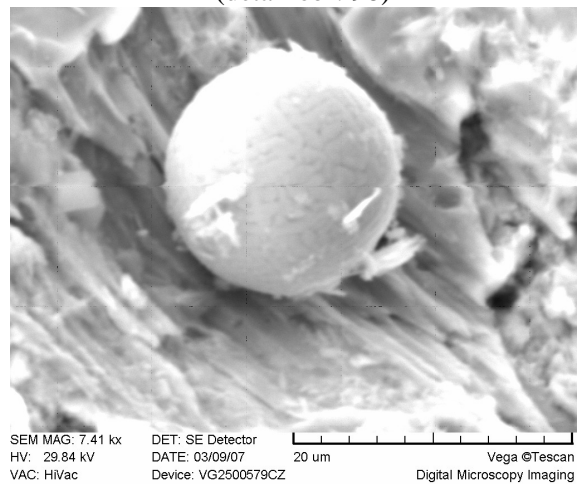
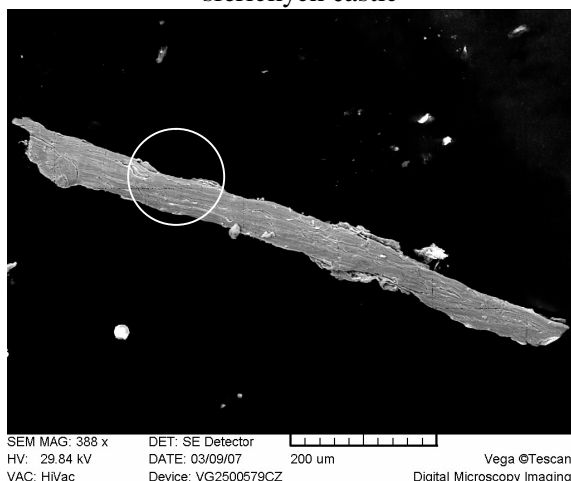
Obr. 97 Detail povrchu částice s kuličkami únavového opotřebení (detail obr. 96)

Po druhé servisní prohlídce sledovaného vozidla, se již v olejovém filtru nevyskytovaly částice řezného opotřebení a výměna olejové náplně a vzduchového filtru byla k zastavení jejich vzniku dostačující. Olejový filtr obsahoval částice ložiskové kompozice (obr. 91) a částice únavového vydrolování vzhledově podobné hrubým kamínkům s porézním povrchem. Výskyt částic únavového vydrolování by měl vést k odstávce vozidla z provozu.

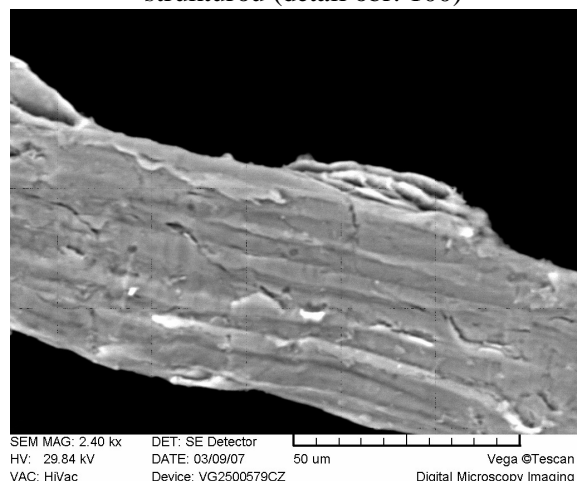
## Vzorek č. V-1



Obr. 98 Tenká lamelární částice

Obr. 99 Oblast s dendritickou strukturou  
(detail obr. 98)Obr. 100 Oblast s velmi početným výskytem  
sférických částicObr. 101 Sférická částice s jemnou povrchovou  
strukturou (detail obr. 100)

Obr. 102 Dlouhá částice řezného opotřebení



Obr. 103 Detail povrchu částice (detail obr. 102)

V olejovém filtru nákladního automobilu Volvo FH 12 500 byly obsaženy nejenom lamelární částice, ale i částice řezného opotřebení (obr. 102). Sferoidní artefakty (obr. 101) jsou pravděpodobně důsledkem lokálního přehřátí některé z třecích dvojic a jejich nedokonalého mazání.

### 3.4 Morfologické studium sférických otěrových částic

#### 3.4.1 Morfologie částic únavového opotřebení

Částice únavového opotřebení jsou morfologicky značně rozdílné.

##### **Sférické částice (spherical debris)**

Sférické částice patří mezi hlavní typy částic vznikajících v důsledku únavového opotřebení valivého charakteru. Zpravidla vznikají v důsledku únavy Beilbyho vrstvičky vnitřních nebo vnějších povrchů ložisek. Rozměry sféroidů jsou relativně malé (2–20  $\mu\text{m}$ ). Řada autorů uvádí, že jediný valivý element je schopen produkovat 6–7 milionů sféroidů do doby, než dojde k jeho poruše. Kuličky, jejichž průměr nepřesahuje 20  $\mu\text{m}$ , mohou vznikat opakovaným zatěžováním povrchu součástí. Při tom v materiálu dochází ke vzniku smykového napětí, které dosahuje maxima v definované hloubce pod povrchem. Zde se začnou vytvářet jemné mikrotrhliny ve směru rovnoběžném s povrchem. Po propojení trhlin a jejich nasycení olejem dochází ke složitým jevům uvolňování a zaoblování částic za cyklického působení vysokých hydrodynamických tlaků při otevírání a stačování trhliny. Podle [21] se uplatňuje i proces minimalizace povrchové energie částice, jehož výsledkem je její kulový tvar. Kulovité útvary vznikají při pomalém růstu únavové trhliny zasahující do olejem smáčeného povrchu.

##### **Laminární částice**

Laminární částice vznikají nejčastěji při opakovaném průchodu oleje a jím unášených částic mazaným systémem; tento proces má za následek plastickou deformaci částic (např. mezi valivým prvkem a dráhou kroužku). Rozválním sféroidů i jiných třírozměrných částic vznikají tenké ploché lupínky nepatrné tloušťky, jejichž délka se pohybuje typicky od 40 do 250  $\mu\text{m}$  a šířka od 10 do 50  $\mu\text{m}$ . Částice mají hladký povrch a nepravidelné okraje. Přítomnost těchto částic je zpravidla doprovázena výskytem sféroidů; souvisí s nástupem postupné poruchy valivého ložiska.

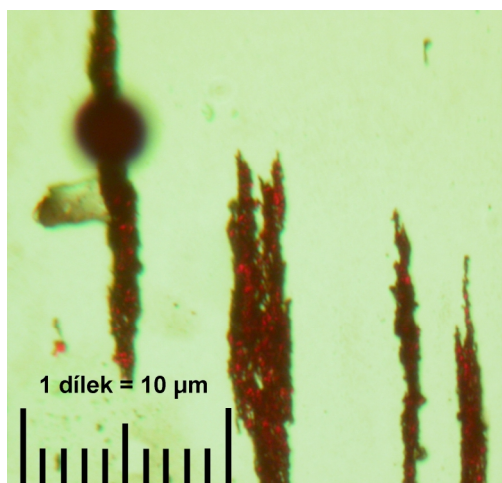
##### **Únavové částice**

Únavové částice jsou typické i pro poškození ozubených kol. Zde se jedná o trojrozměrné částice se srovnatelnou délkou, šířkou i tloušťkou, jejichž povrch je nepravidelný, rýhovaný s nepravidelně členěnými okraji. Rozměry těchto částic se pohybují od 10 do 150  $\mu\text{m}$ . Člení se dále do dvou skupin:

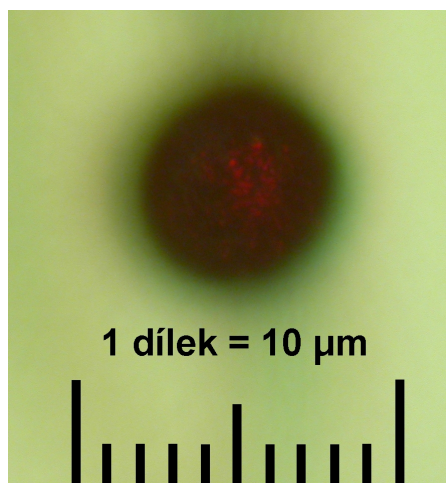
- Typ „chunky“ – částice o velikosti 10–80  $\mu\text{m}$  mají nepravidelně členitý povrch, mnohdy se jedná o mikrohranolky, na povrchu mívají vměstky sekundárního původu.
- Typ „scuffing“ (vysokoteplotní otěr) vzniká na bocích zubů ozubených kol za působení vysokých tlaků a teplot. Materiál částic bývá tepelně ovlivněn, což se projevuje zbarvením částic.

#### 3.4.2 Sférické částice

V rámci této práce byla pozornost zaměřena zejména na sférické částice. Byly nalezeny jak ve ferrogramech (obr. 104 a 105), tak zejména ve vzorcích určených pro morfologickou analýzu na REM.



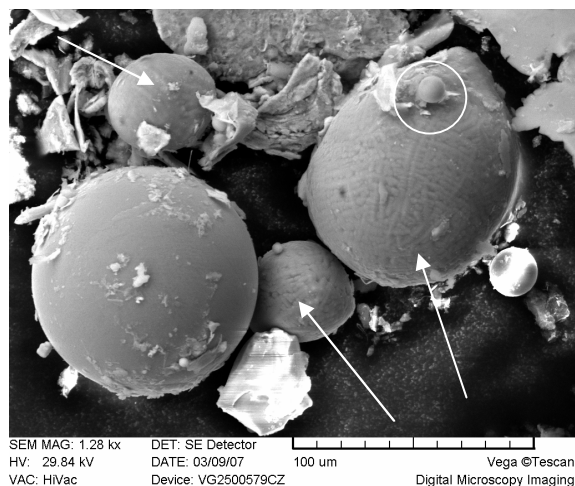
Obr. 104 Sférická částice zachycená řetízky adhezivních částic na začátku ferrogramu vzorku č. MB-2



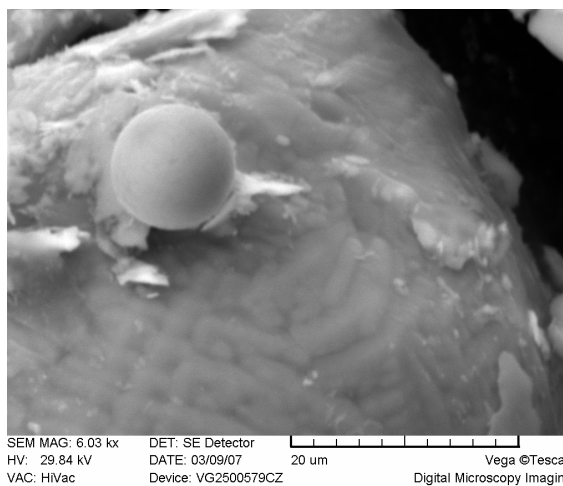
Obr. 105 Sferoidní artefakt o velikosti 6  $\mu\text{m}$  se zaostřením na jeho povrch (ferrogram vzorku č. MB-2)

Při studiu sféroidů na REM byly nalezeny jak plně symetrické kulovité částice odpovídající popisu v atlasech a odborných článkách [36 až 40], tak i částice, u nichž nebyl v doposud publikovaných dostupných informačních zdrojích nalezen morfologický ekvivalent.

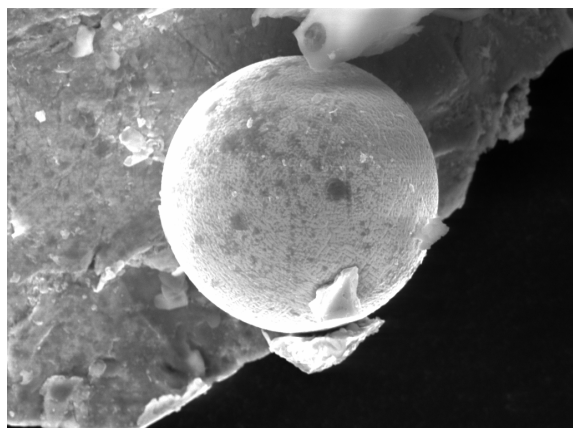
Z běžně se vyskytujících sférických částic bylo možno poměrně často pozorovat ty, které jsou lokalizovány v podpovrchových trhlinách vznikajících pravděpodobně výše popsáním mechanismem. Mají hladký povrch, což odpovídá výše popsané teorii vzniku v podpovrchové únavové trhlině (obr. 106).



Obr. 106 Sféroidy z motorového oleje (vzorek č. V-1) – vlevo velká částice o průměr cca 90  $\mu\text{m}$  s hladkým povrchem (další částice mají na povrchu dendritickou strukturu)



Obr. 107 Malá hladká kulovitá částice (průměr cca do 10  $\mu\text{m}$ ) zachycená na velkém sféroidu s povrchem tvořeným dendrity (detail obr. 106)



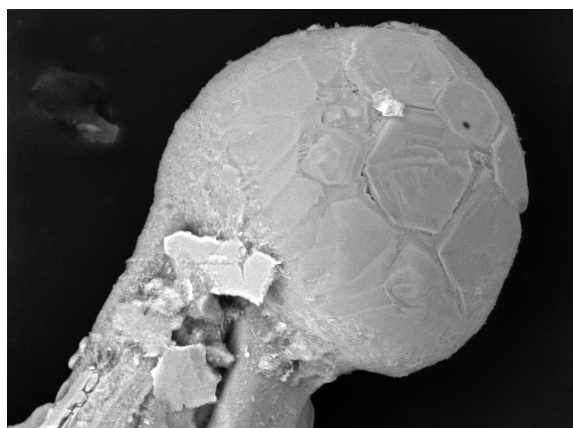
SEM MAG: 2.24 kx DET: SE Detector  
 HV: 29.84 kV DATE: 05/03/07 50 um Vega ©Tescan  
 VAC: HiVac Device: VG2500579CZ Digital Microscopy Imaging

Obr. 108 Sféroidy z motorového oleje (vzorek č. 4), povrch má dendritickou strukturu (detail obr. 73)



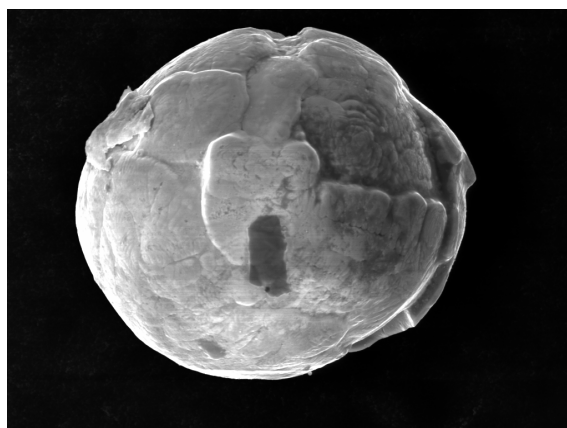
SEM MAG: 2.00 kx DET: SE Detector  
 HV: 29.84 kV DATE: 03/09/07 50 um Vega ©Tescan  
 VAC: HiVac Device: VG2500579CZ Digital Microscopy Imaging

Obr. 109 Sféroidy z motorového oleje (vzorek č. V-1), povrch má nepravidelnou strukturu



SEM MAG: 1.20 kx DET: SE Detector  
 HV: 29.84 kV DATE: 05/03/07 100 um Vega ©Tescan  
 VAC: HiVac Device: VG2500579CZ Digital Microscopy Imaging

Obr. 110 Sfériální zakončení výběžku s hexagonálními útvary v povrchové vrstvě (morfologie celé částice je dokumentována na obr. 71)



SEM MAG: 1.40 kx DET: SE Detector  
 HV: 29.84 kV DATE: 03/09/07 100 um Vega ©Tescan  
 VAC: HiVac Device: VG2500579CZ Digital Microscopy Imaging

Obr. 111 Částice s přechodovou strukturou popsanou v [36] (vzorek č. V-1)

V řadě případů však byly nalezeny sféroidy s povrchem, který vykazuje zřetelnou strukturu: typ s dendritickými útvary v povrchové vrstvě je dokumentován na obr. 106 a 107, typ s hexagonálními ploškami souvisle pokrývajícími zaoblenou část na obr. 110.

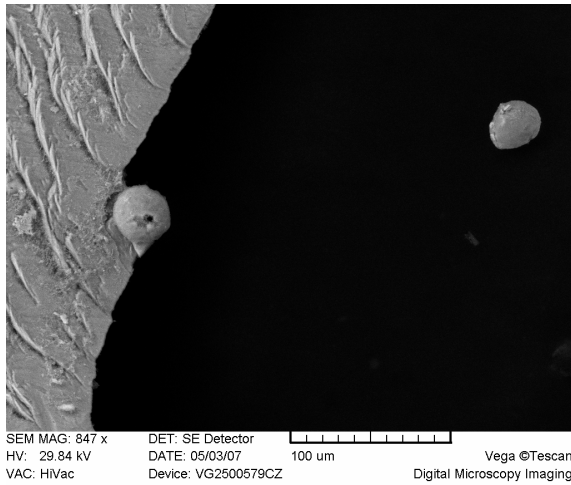
Přechod mezi těmito typy tvoří kuličky (resp. kulovitá zakončení částic jiných typů) se strukturou „zelné hlávky“ („cabbage-like“ [36] –) – obr. 111.

Struktura povrchu některých částic je nepravidelná (obr. 109) – v tomto případě se však může jednat o povrchovou vrstvu korozních, zejména oxidických produktů.

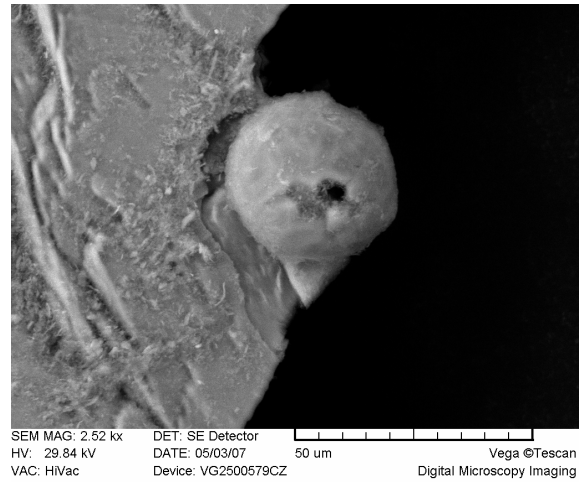
Sféroidy jsou různými autory klasifikovány rovněž podle velikosti: do 20  $\mu\text{m}$  jsou jednoznačně spojovány s únavovými procesy [37], u velkých částic je mechanismus tvorby spojován především s procesy mikrosvařování, ale i s různými technologickými operacemi a povrchovými úpravami použitými ještě před přímým kontaktem třecích ploch s mazacím olejem (řezání, broušení, leštění, tryskání aj.).



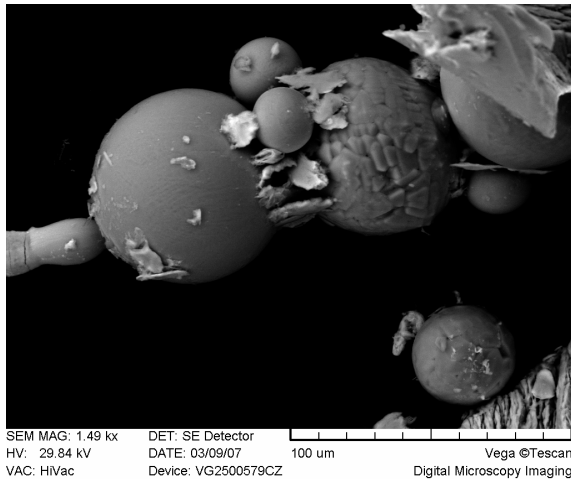
V několika vzorcích byly nalezeny i útvary s otevřenou dutinou (obr. 113) a nesférické protáhlé částice s kulovitým zakončením (obr. 115).



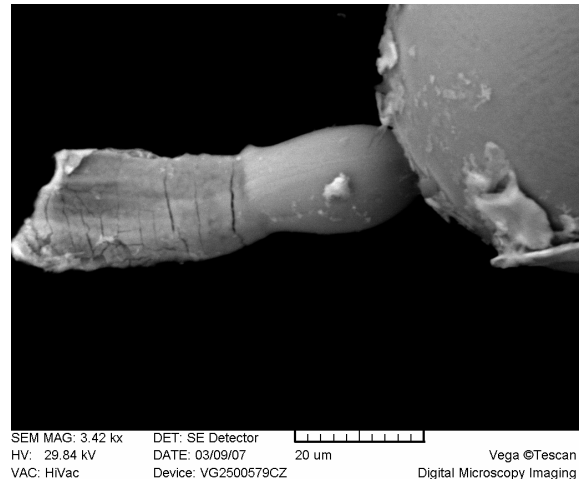
Obr. 112 Kulovité částice s vnitřní dutinou  
 ústící v povrchový otvor (detail obr. 116)



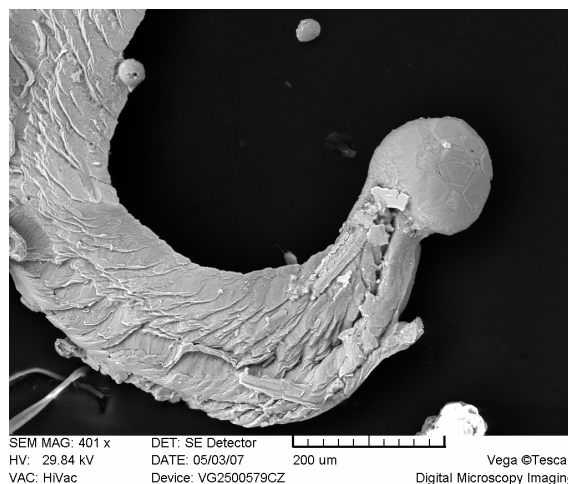
Obr. 113 Detail ústí dutiny z obr. 112



Obr. 114 Sférické a zaoblené částice různých  
 typů a velikostí



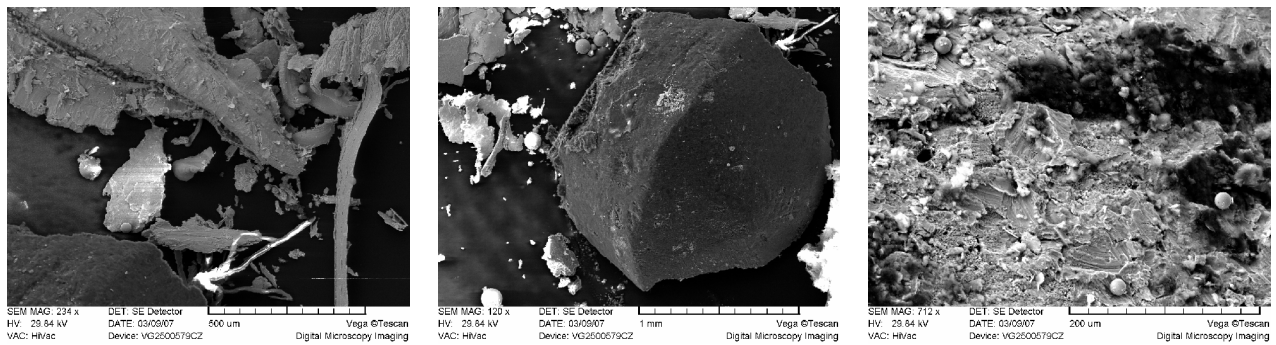
Obr. 115 Detail zaobleného zakončení  
 částice z levé části obr. 114



Obr. 116 Detail zaobleného zakončení částice



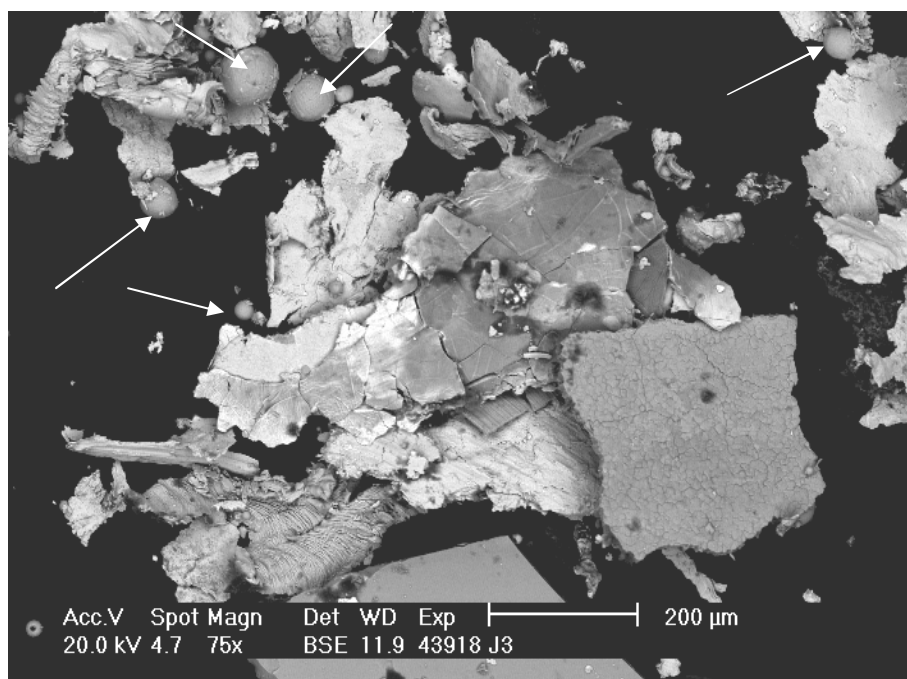
V některých vzorcích se vyskytovaly velké počty sférických částic (obr. 117).



Obr. 117 Oblasti, v nichž se vyskytují velké počty sférických částic

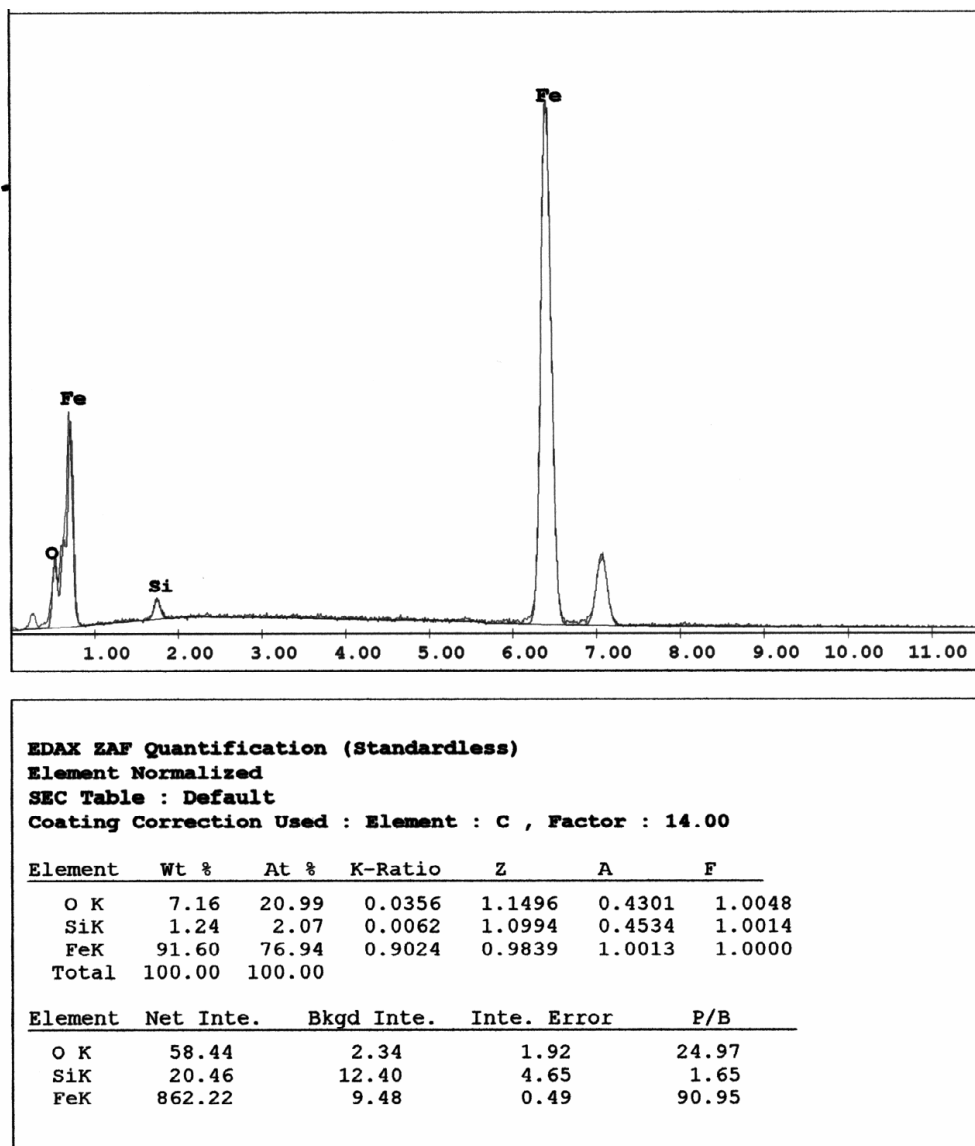
### 3.4.3 Lokální elektronová mikroanalýza

Lokalita se sférickými částicemi izolovanými z filtrační vložky vzorku č. V-1 (obr. 118) byla analyzována na REM s vybavením pro lokální elektronovou mikroanalýzu (VEGA TS 5130SB – VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství). Spektra svědčí o prakticky shodném složení sféroidů – jedná se o materiál na bázi železa s oxidickou vrstvou na povrchu.



Obr. 118 Snímek lokality s analyzovanými sférickými částicemi

Provedená EDX analýza prokázala, že tyto sféroidy pocházejí z ložiskové oceli (obr. 119). Ve složení převažuje železo a lze tedy u nich předpokládat klasický mechanismus vzniku z podpovrchových trhlin vytvářejících se únavovými procesy v důsledku dlouhodobé opakované zátěže.



Obr. 119 Typické EDX - spektrum (složení jednotlivých sféroidů se prakticky shodovalo se spektrem zde uvedeným)

### 3.4.4 Hodnocení analýzy olejových filtrů

Výše uvedené výsledky detailního studia na REM vedou k závěru, že částice s povrchovou strukturou vznikaly z taveniny – lokálním přehřátím materiálu nad teplotu tavení v oblastech např. nedostatečného mazání, kde došlo ke vzniku a opětovnému rozrušení mikrosvarů. Je tedy nutné připsat vznik sférických a sféroidálních částic různým příčinám (nikoli pouze únavovým procesům, tak jak jsou uváděny v některých publikovaných pracích).

Tyto útvary je potřebné studovat různými mikroskopickými a analytickými technikami podrobněji a hledat souvislost morfologie s typem opotřebení. Z těchto souvislostí mezi tvarem a povrchovou strukturou částice ve vztahu k typu opotřebení bude možné postupně (po shromáždění dostatečně rozsáhlých experimentálních dat) vytvořit klasifikaci pro hodnocení stupně závažnosti projevů provozního opotřebení, vytipovat a kvantifikovat morfologické příznaky umožňující popsat stav oleje a mazaného systému. Tyto údaje budou sloužit i k prediktivním účelům – mohou přispět k upozornění na nebezpečí vzniku havárie apod.

Na základě provedených experimentálních prací lze dále z metodického hlediska konstatovat, že

- ověřovaný postup izolace otěrových částic z filtračních vložek je možno použít v laboratorní praxi; je použitelný jak z hlediska účinku na pracovní prostředí, tak ve vztahu ke vzniku korozního napadení zkoumaných částic a v porovnání s dříve užívaným postupem rozvlákňování vložky v roztoku NaOH jej lze považovat za celkově vhodnější a efektivnější,
- použití rastrovacího elektronového mikroskopu umožňuje detailní studium morfologie kovových částic separovaných z mazacího oleje resp. filtračních vložek; vyžaduje důslednou demagnetizaci částic.

Kompletní obrazová dokumentace získaná na rastrovacím elektronovém mikroskopu je uvedena jako příloha na připojeném CD.

#### 4. Závěr

Tato diplomová práce se zabývá využitím vybraných instrumentálních metod (infračervené spektrometrie s Fourierovou transformací, analytické ferrografie a rastrovací elektronové mikroskopie) při hodnocení průběhu provozního opotřebení motorových a kompresorových olejů.

Teoretická část práce je obecně zaměřena na shrnutí poznatků z oblasti tření a opotřebení součástí. Dále je zde popsána funkce mazacích olejů a tribotechnické požadavky na jejich užité vlastnosti. Závěr teoretické části je věnován principům použitých experimentálních metod a přehledem příčin provozního opotřebení olejů.

V experimentální části práce je uveden postup odběru vzorků olejů a podmínky provedení experimentálních prací, přehled výsledků jednotlivých zkoušek s navazující interpretací, zaměřenou na možnost využití závěrů v praxi.

Byla provedena analýza a hodnocení vzorků nových i exploatovaných motorových olejů z osobních i nákladních automobilů (Škoda Octavia II 1,9 TDI, Škoda Fabia 1,2 HTP, Škoda Felicia 1,3 MPI, Škoda Fabia 1,9 TDI, Mazda 6 2,0 16V, Škoda Fabia 1,2 HTP, Volvo FH 12 500 a Mercedes Benz Actros 1844) a kompresorových olejů. U vybraných olejových filtrů z osmi vozidel byl upraven postup izolace otěrových částic z filtračních vložek; při studiu morfologie těchto částic byla použita rastrovací elektronová mikroskopie (REM VEGA TS 5130).

Motorové i kompresorové oleje byly testovány s využitím výše uvedených instrumentálních metod. Tyto metody byly doposud ve fakultních laboratořích používány pro rozbory zejména motorových a převodových olejů – pro analýzu olejů kompresorových byly aplikovány v této práci poprvé.

Součástí diplomové práce také byla analýza exploatovaných olejových filtrů. Byla modifikována doposud používaná metodika separace otěrových částic z vložek těchto filtrů. Vyseparované částice byly studovány na optickém a na rastrovacím elektronovém mikroskopu. V rámci této práce byl rozpracováván postup, při němž byl filtr otevřen přípravkem vlastní konstrukce a výroby; filtrační vložky po té byly vyjmuty z nosné konstrukce, umístěny do lázně s rozpouštědlovou směsí účinkem ultrazvuku byly uvolněny otěrové částice. Kovové částice pak byly odděleny pomocí magnetu; část jich byla dále zkoumána v optickém mikroskopu, vybrané částice byly demagnetizovány v aparatuře vlastní konstrukce a pozorovány v REM.

Optimalizace výměnných lhůt je úzce spjata s rychlostí znehodnocování olejové náplně, úrovní kvality mazání a s rychlostí opotřebení mazaných prvků. U sledovaných mechanismů byl proto hodnocen stav motorového a kompresorového oleje zejména podle úbytku mazivostních přísad, přítomnosti nitrolátek a zvýšení obsahu oxidačních produktů. Výměnné lhůty nebyly v některých případech optimální – oleje vykazovaly nadměrné opotřebení. Zde lze doporučit zejména věnovat větší pozornost dodržování technologické disciplíny při údržbě. Naopak některé vzorky vykazovaly jen malé opotřebení resp. degradaci a výměna olejové náplně byla tudíž neefektivní a předčasná. Tyto problémy je možné účelně řešit právě využitím tribotechnické diagnostiky, která vychází z individuálního posouzení stupně degradace oleje v každém mechanismu na základě analýzy použitého oleje.

V další části experimentální práce byly vybrané vzorky použitých olejů podrobeny i analytické ferrografii. Z vyhodnocení ferrogramů po mikroskopickém šetření v rámci analytické ferrografie vplynuly analogické závěry jako z výsledků infračervené spektrometrie.

Dílní závěry a doporučení pro praxi týkající se vozidel a kompresorů jsou uvedeny v kapitole věnované interpretaci experimentálních výsledků.

Fotografická dokumentace přítomnosti částic souvisejících se zvýšeným opotřebením je uvedena na příloženém CD.

Při analýze olejových filtrů se potvrdily předběžné předpoklady a z jejich vložek byly vyseparovány relativně velké částice různé morfologie, které byly dále zkoumány mikroskopicky. Zachycování velkých částic ve filtrech komplikuje klasickou ferrografickou analýzu, protože právě tyto částice mají pro hodnocení opotřebených třecích ploch největší význam. Vznik těchto částic souvisí s únavovými procesy, s rozpadem Beilbyho vrstvy a s přítomností abraziv včetně křemičitého prachu.

Lze konstatovat, že metodika vyšetření otěru, založené na kombinaci několika postupů, vytváří předpoklady pro získání komplexních informací o průběhu provozního opotřebením jak olejů, tak jimi mazaných mechanismů.

Přínosem této práce je ověření možnosti použití vybraných pokročilých instrumentálních metod pro identifikaci a hodnocení stupně opotřebením motorových a kompresorových olejů. Výsledky provedených experimentálních prací umožnily formulovat praktická doporučení pro provozovatele. Ve všech případech jim lze doporučit další pravidelné monitorování sledovaných motorů s využitím metod aplikovaných v této práci. Experimentálně bylo prokázáno, že ve sledovaných konkrétních případech by bylo možné nahradit původně používaný mazací olej olejem jiné značky; dosáhne se tak významné úspory nákladů, aniž by došlo ke zhoršení mazacích a ochranných vlastností oleje resp. ke zvýšení opotřebením mechanismu.

Výsledky této diplomové práce prokázaly, že všechny použité metody, tj. FTIR spektrometrie, ferrografie i rastrovací elektronová mikroskopie mohou přispět k rozšíření možností tribotechnické diagnostiky v oblasti hodnocení provozního opotřebením motorových a kompresorových olejů. Celkově lze hodnotit aplikaci pokročilých instrumentálních metod jako významný přínos pro oblast zkoušení mazacích olejů pro dopravní prostředky a kompresory.

Přípravek pro otevírání filtrů, který byl navržen, zhotoven a otestován v rámci této práce, zůstává k dispozici pro další použití v tribotechnické laboratoři DFJP.

Výsledky této práce budou poskytnuty:

- panu Hybešovi ze společnosti Autoservis Hybeš,
  - panu Svobodovi ze společnosti Holcim (Česko), a.s.,
  - panu Dovrtělovi ze společnosti Synthesia, a.s,
- kteří umožnili odběr vzorků analyzovaných olejů a filtrů a poskytli odborné informace pro zpracování této diplomové práce.

## 5. Použitá literatura

- [1.] Komentáře odborníků [cit. 20. března 2007]. Dostupné na WWW: [http://www.oleje.cz/index.php?left=main&page=zajimavosti\\_komentare](http://www.oleje.cz/index.php?left=main&page=zajimavosti_komentare).
- [2.] Návod, tipy, info [cit. 20. března 2007]. Dostupné na WWW: <http://www.pvtnet.cz/www/autocentrum/navody30.htm>.
- [3.] JANČÍK, L. a ZÝMA, J. *Části a mechanismy strojů*. Praha: ČVUT, 1999.
- [4.] ČERNÝ, J.; MAŠEK, P.; KUBÍNOVÁ, P.; ZELINKA, M. Nitrace motorových olejů a tribodiagnostika. *Sborník konference Tribotechnika a spolehlivost provozu*. Lázně Bohdaneč 20. – 21. 4. 2004. Praha: Česká strojnická společnost, odborná sekce Tribotechnika, 2004. ISBN 80-02-01636-X.
- [5.] Firemní materiály AMSOIL, *Basic Concepts of Friction and Lubrication* [online]. [cit. 20. března 2007]. Dostupné na WWW: <http://www.bestsynthetic.com/index.shtml>.
- [6.] ČECH, J. *Oleje* [online]. [cit. 20. března 2007]. Dostupné na WWW: <http://www.mjauto.cz/newdocs/oleje.htm>.
- [7.] TROYER, D., FITCH, J. *Oil analysis basics*. Noria Corporation, 2001.
- [8.] SCT-Vertriebs GmbH [online]. [cit. 20. března 2007]. Dostupné na WWW: <http://www.mannol.de>.
- [9.] Firemní materiály Filtration Control Limited, [online] [cit. 20. března 2007]. Dostupné na WWW: [http://www.filtrationcontrol.com/products\\_oilfilters.asp](http://www.filtrationcontrol.com/products_oilfilters.asp).
- [10.] VEIT, P. Olejové filtry [cit. 20. března 2007]. Dostupné na WWW: [http://h-fans.cz/index.php?url=dokumenty.htm&params=art\\_ostatni/ostatni\\_05\\_12\\_2003\\_filtry](http://h-fans.cz/index.php?url=dokumenty.htm&params=art_ostatni/ostatni_05_12_2003_filtry).
- [11.] MACHALÍKOVÁ, J., Infračervená spektrometrie s Fourierovou transformací [online]. [cit. 5. dubna 2007]. Dostupné na WWW: [http://mail.upce.cz/~machjar/FTIR\\_pro\\_PH.doc](http://mail.upce.cz/~machjar/FTIR_pro_PH.doc).
- [12.] PINCHUK, D., AKOCHI-KOBLÉ, E., COCCIARDI, R., PINCHUK, J., VAN DER VOORT, F., SEDMAN, J. "Demystifying and Understanding Lubricants". *Practicing Oil Analysis Magazine*. March 2007 [online]. [cit. 5. dubna 2007]. Dostupné na WWW: [http://www.practicingoilanalysis.com/article\\_detail.asp?articleid=997&relatedbookgroup=OilAnalysis](http://www.practicingoilanalysis.com/article_detail.asp?articleid=997&relatedbookgroup=OilAnalysis).
- [13.] FTIR [cit. 5. dubna 2007]. Dostupné na WWW: <http://www.kj.uib.no/ft-ir-norsk/FTIRerdette/FTIR-hvordanvirkerdet.htm>.
- [14.] KLÍČ, A., VOLKA, K., DOBCOVÁ, M. *Fourierova transformace – příklady z infračervené spektrometrie*. Praha: VŠCHT, 1994, str.62 – 88. ISBN 80-7080-219-7.
- [15.] Firemní materiály INNOVECTIS, FTIR device for real-time analysis [cit. 5. dubna 2007]. Dostupné na WWW: <http://www.hipo-online.de/sektion.cfm?sektion=TE>.
- [16.] STODOLA, J. *Diagnostika motorových vozidel*. Brno: VUT 2003.
- [17.] STM Instrument Development [cit. 5. dubna 2007]. Dostupné na WWW: [http://www.nano.psu.edu/~aad/current\\_projects.htm](http://www.nano.psu.edu/~aad/current_projects.htm).
- [18.] MACHALÍKOVÁ, J. *Ferrografie* [online]. [cit. 15. května 2005]. Dostupné na WWW: [http://mail.upce.cz/~machjar/FG\\_pro\\_PH.doc](http://mail.upce.cz/~machjar/FG_pro_PH.doc).
- [19.] RAADNUI, S. "Low-cost Used Grease Analysis for Rolling Element Bearings". *Practicing Oil Analysis Magazine*. November 2004 [online]. [cit. 12. dubna 2007]. Dostupné na WWW: [http://www.practicingoilanalysis.com/article\\_detail.asp?articleid=672&relatedbookgroup=OilAnalysis](http://www.practicingoilanalysis.com/article_detail.asp?articleid=672&relatedbookgroup=OilAnalysis).
- [20.] STACHOWIAK, G. W., PODSIADLO, P. Characterization and classification of wear particles and surfaces – časopis *Wear*, Volume 249, Issues 3 – 4, May 2001, Pages



- 194 – 200 [online]. [cit. 12. dubna 2007]. Dostupný v akademické síti na WWW: <<http://www.sciencedirect.com>>.
- [21.] Firemní materiály Reo Trade, s.r.o., Atlas otěrových částic pro ferrografii.
- [22.] KONEČNÁ, M. *Využití elektronové mikroskopie v AAS*. Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity Brno, 2001.
- [23.] JANDOŠ, F., ŘÍMAN, R., GEMPERLE, A. *Využití moderních laboratorních metod v metalografii*. SNTL Praha, 1985.
- [24.] ZHAO, A. *Scanning Electron Microscopes* [cit. 25. dubna 2007]. Dostupné na WWW: <<http://isbbio1.pbwiki.com/How%20it%20Works%20%28and%20Images%29%20Group%202>>.
- [25.] SOMMER, L. *Analytická spektrometrie I*. SPN, Praha 1996.
- [26.] SULOVSKÝ, P. *Elektronová mikroskopie a mikroanalýza* [online]. [cit. 25. dubna 2007]. Dostupné na WWW: <[http://www.sci.muni.cz/~sulovsky/Vyuka/Lab\\_metody/Elektronova%20mikroskopie.pdf](http://www.sci.muni.cz/~sulovsky/Vyuka/Lab_metody/Elektronova%20mikroskopie.pdf)>.
- [27.] ČERNOHORSKÝ, T., JANDERA, P. *Atomová spektroskopie*. Univerzita Pardubice, 1997.
- [28.] BLAŠKOVIČ, P., BALLA, J., DZIMKO, M. *Tribológia*. Bratislava: ALFA, 1990.
- [29.] Protokol ZKCH 63/94: Opatření motoru T3B 928 TM, Tatra a.s., 1994.
- [30.] KOZÁK, P. *Hodnocení normovaných parametrů motorových olejů*. In Sborník přednášek 6. ročníku semináře REOTRIB 2000 – zjišťování kvality paliv a maziv. Velké Losiny, 16. – 19. května 2000. Ostrava: ReoTrade; Praha: VŠCHT, Ústav technologie ropy a petrochemie, 2000, str. 65 – 69. ISBN 80-7080-381-9.
- [31.] Firemní materiály BRUKER G.m.b.H., návod k obsluze spektrometru Vector 22, uživatelská příručka Opus Optics User Software.
- [32.] HERUUGA, T. *Tribologické hodnocení otěru v závislosti na provozních podmínkách*. Zkrácená verze PHD Thesis [online]. [cit. 5. května 2005]. Dostupné na: <<http://deer.ro.vutbr.cz/nakl/thesis/Heruugaw.pdf>>.
- [33.] Firemní materiály Reo Trade, s. r. o, návod k obsluze ferrografu REO 1.
- [34.] Firemní materiály NIKON, návod k obsluze fotoaparátu Coolpix 4500.
- [35.] Firemní materiály Tescan s.r.o., [online]. [cit. 6. května 2007]. Dostupné na WWW: <<http://www.tescan.com>>.
- [36.] BALOGH, I. The formation of spherical particles under abrasive conditions. *Periodica Polytechnica, Ser. Mech. Eng.* 2002. Vol. 46, No. 1, pp. 29–36.
- [37.] PENG, Z., KIRK T. B. Computer image analysis of wear particles in three-dimensions for machine condition monitoring. *Wear*. 1998. Vol. 223, Issues 1-2, pp. 157–166.
- [38.] GEBARIN S.; FITCH, J. "Origin of Spherical Particles in Lubricants". *Practicing Oil Analysis Magazine*. March 2005 [online]. [cit. 6. května 2006]. Dostupné na WWW: <[http://www.practicingoilanalysis.com/article\\_detail.asp?articleid=719&relatedbookgroup=OilAnalysis](http://www.practicingoilanalysis.com/article_detail.asp?articleid=719&relatedbookgroup=OilAnalysis)>.
- [39.] SAFWAT, A. Wear Debris Analysis. *Machinery Lubrication Magazine*. November 2006. [online]. [cit. 6. května 2006]. Dostupné na WWW: <[http://www.machinerylubrication.com/article\\_detail.asp?articleid=960&pagetitle=Wear%20Debris%20Analysis](http://www.machinerylubrication.com/article_detail.asp?articleid=960&pagetitle=Wear%20Debris%20Analysis)>.
- [40.] SCOTT, D.; MILLS, G. H. Spherical Particles formed in Rolling Contact Fatigue. *Nature*. 1973. 241, 115–116.

## Seznam obrázků

- Obr. 1 Schéma suchého tření
- Obr. 2 Princip hydrodynamického mazání
- Obr. 3 Princip Elasticko–hydrodynamického mazání
- Obr. 4 Schéma mezního tření
- Obr. 5 Prodloužení životnosti oleje pomocí antioxidantů
- Obr. 6 Konstrukce olejového filtru
- Obr. 7 Typické pásy v FTIR-spektru motorového oleje
- Obr. 8 Schéma FTIR spektrometru
- Obr. 9 Princip zeslabené totální reflektance (ATR)
- Obr. 10 Totální odraz záření v krystalu
- Obr. 11 Schéma ferrografu
- Obr. 12 Schéma elektronového řádkovacího mikroskopu
- Obr. 13 Interakce primárního elektronového svazku s povrchem vzorku
- Obr. 14 Princip adhezivního opotřebení
- Obr. 15 Princip abrazivního opotřebení
- Obr. 16 Princip erozivního opotřebení
- Obr. 17 Princip kavitačního opotřebení
- Obr. 18 Princip únavového opotřebení
- Obr. 19 Princip vibračního opotřebení
- Obr. 20 Sledovaná jízdní souprava s tahačem Mercedes-Benz Actros 1844
- Obr. 21 Pracoviště FTIR spektrometrie
- Obr. 22 Nástavec ATR s krystalem ZnSe
- Obr. 23 Pracoviště pro vyhodnocování ferrogramů
- Obr. 24 Objektivový mikrometr
- Obr. 25 Ferrograf REO 1
- Obr. 26 Injekční stříkačka se šikmo seříznutou trubičkou
- Obr. 27 Pracoviště rastrovací mikroskopie v laboratoři DFJP v Č. Třebové
- Obr. 28 Rastrovací elektronový mikroskop Tescan Vega TS 5130SB
- Obr. 29 Oddělení víka filtru
- Obr. 30 Oddělení papírové filtrační vložky
- Obr. 31 Ultrazuková lázeň Bandelin Sonorex s kádinkou, v níž je v rozpouštědlové směsi ...
- Obr. 32 Magnet na bázi FeNdB
- Obr. 33 Částice z olejového filtru umístěné na grafitové podložce pod bichromatickým ...
- Obr. 34 Umístění částic na grafitových podložkách pro pozorování na REM
- Obr. 35 Detail vyseparovaných částic
- Obr. 36 Demagnetizace izolovaných částic
- Obr. 37 3D model otvíracího přípravku
- Obr. 38 Vysekávací CNC lis FINN POWER
- Obr. 39 Hydraulický ohraňovací CNC lis SAFAN

- Obr. 40 Otvírací přípravek se zabroušenými svary
- Obr. 41 IČ spektra motorového oleje Shell Longlife 5W30 VX
- Obr. 42 Detail IČ spekter motorového oleje Shell Longlife 5W30 VX
- Obr. 43 IČ spektra motorových olejů Shell Helix Plus 5W40 a 10W40
- Obr. 44 Detail IČ spekter motorových olejů Shell Helix Plus 5W40 a 10W40
- Obr. 45 IČ spektra motorového oleje Shell Helix Plus 15W40
- Obr. 46 Detail IČ spekter motorového oleje Shell Helix Plus 15W40
- Obr. 47 IČ spektra motorového oleje Mogul Racing 5W40
- Obr. 48 Detail IČ spekter motorového oleje Mogul Racing 5W40
- Obr. 49 IČ spektra motorového oleje Castrol SLX 0W30 Longtec
- Obr. 50 Detail IČ spekter motorového oleje Castrol SLX 0W30 Longtec
- Obr. 51 IČ spektra motorového oleje Paramo Mogul 10W40
- Obr. 52 Detail IČ spekter motorového oleje Paramo Mogul 10W40
- Obr. 53 IČ spektra motorového oleje OMV Eco Truck Extra 10W40
- Obr. 54 Detail IČ spekter motorového oleje OMV Eco Truck Extra 10W40
- Obr. 55 Detail reálného spektra v oblasti ( $2400 - 2280 \text{ cm}^{-1}$ ) s dvojitým píkem oxidu uhličitého
- Obr. 56 Ferrogram motorového oleje Shell Helix Ultra VX 5W30 – Longlife, Škoda Octavia II ...
- Obr. 57 Ferrogram motorového oleje Shell Helix Plus 5W40, Škoda Fabia 1,2 HTP ...
- Obr. 58 Ferrogram motorového oleje Shell Helix Super 15W40, Škoda Felicia Pickup 1,3 MPI ...
- Obr. 59 Ferrogram motorového oleje Mogul Racing 5W40, Škoda Fabia 1,9 TDI ...
- Obr. 60 Ferrogram motorového oleje Castrol Formula SLX 0W30 - Longtec, Mazda 6 2,0 16V ...
- Obr. 61 Ferrogram motorového oleje Mogul GX-FE 10W40, Škoda Fabia 1,2 HTP ...
- Obr. 62 Ferrogram motorového oleje OMV Eco Truck Extra 10W40, Volvo FH 12 500 ...
- Obr. 63 Ferrogram motorového oleje Shell Rimula Ultra 5W30, Mercedes-Benz Actros 1844 ...
- Obr. 64 Ferrogram motorového oleje Shell Rimula Ultra 5W30, Mercedes-Benz Actros 1844 ...
- Obr. 65 Ferrogram kompresorového oleje MOGUL Komprimo ONC 68, 1660,5 provozních ...
- Obr. 66 Ferrogram kompresorového oleje MOGUL Komprimo ONC 68, 1343 provozních hodin ...
- Obr. 67 Ferrogram kompresorového oleje MOGUL Komprimo ONC 68, 1000 provozních hodin ...
- Obr. 68 Vyseparované částice z olejových filtru připravené pro studium jejich morfologie na REM
- Obr. 69 Lamelární částice únavového opotřebení se zřetelnou trhlinou, v jejímž čele je ...
- Obr. 70 Stopy po kontaktu se součástí z tvrdšího materiálu, detail sféroidů (detail obr. 69)
- Obr. 71 Sferoidní artefakt typický pro únavové opotřebení, průměr kuličky je rozměrově blízký ...
- Obr. 72 Tenká lamelární částice vzniklá v místě valivého kontaktu
- Obr. 73 Detail šíření trhlin z vydrolené oblasti a stopy po kontaktu se součástí z tvrdšího ...
- Obr. 74 Měkká tvárná částice ložiskové kompozice, na jejímž zakončení a výstupku je dobře ...
- Obr. 75 Stopa řezného opotřebení, vznikající, když povrch jednoho členu třecí dvojice proniká ...
- Obr. 76 Částice, na jejímž povrchu je kulička únavového opotřebení
- Obr. 77 Částice únavového opotřebení, jejíž konec je plasticky deformován
- Obr. 78 Dlouhá částice řezného opotřebení, která vznikla v důsledku vniknutí zrna abraziva ...
- Obr. 79 Sferoidní artefakty, jejichž velikost nepřesahuje  $5 \mu\text{m}$ , pochází z únavové mikrotrhliny ...
- Obr. 80 Konec částice, na jejímž povrchu jsou stopy abraze (detail obr. 78)

- Obr. 81 Tenká lamelární částice vznikající v průchodu částice místem valivého kontaktu
- Obr. 82 Oddělování menší lamelární částice, které je způsobeno vysokým kontaktním napětím ...
- Obr. 83 Částice řezného opotřebení spolu lamelární částicí únavového opotřebení
- Obr. 84 Detail lamelární částice s hlubokou povrchovou trhlinou (detail obr. 83)
- Obr. 85 Částice typická pro třibodovou abrazi
- Obr. 86 Spirálovité zakončení částice tvárného materiálu, z nějž se tříška odděluje
- Obr. 87 Dvojce lamelárních částic, jejichž povrch obsahuje hluboké rýhy a trhliny ve velkém ...
- Obr. 88 Lamelární částice na níž je velké množství trhlín a mikrojamek, neobsahuje však rýhy ...
- Obr. 89 Detail podložky s vyseparovanými částicemi (velká, 4 mm dlouhá štíhlá částice podobná ...
- Obr. 90 Na konci štíhlé částice je sferoidní artefakt vznikající při pomalém růstu únavové trhliny ...
- Obr. 91 Částice ložiskové kompozice
- Obr. 92 Detail povrchu částice, která vznikla postupným oddělováním tvárného materiálu ...
- Obr. 93 Trojrozměrná ostrohranná částice únavového vydrolování („Chunky-type“)
- Obr. 94 Detail povrchu částice únavového vydrolování se sferoidním artefaktem (detail obr. 93)
- Obr. 95 Detail kuličky o průměru 10  $\mu\text{m}$ , která byla generována poměrně hrubou trhlinou ...
- Obr. 96 Shluk plasticky deformovaných lamelárních částic
- Obr. 97 Detail povrchu částice se kuličkami únavového opotřebení (detail obr. 96)
- Obr. 98 Tenká lamelární částice
- Obr. 99 Oblast s dendritickou strukturou (detail obr. 98)
- Obr. 100 Oblast s velmi početným výskytem sférických částic
- Obr. 101 Sférická částice s jemnou povrchovou strukturou (detail obr. 100)
- Obr. 102 Dlouhá částice řezného opotřebení
- Obr. 103 Detail povrchu částice (detail obr. 102)
- Obr. 104 Sférická částice zachycená řetízky adhezivních částic na začátku ferrogramu ...
- Obr. 105 Sferoidní artefakt o velikosti 6  $\mu\text{m}$  se zaostřením na jeho povrch ...
- Obr. 106 Sféroidy z motorového oleje (vzorek č. V-1) – vlevo velká částice o průměr ...
- Obr. 107 Malá hladká kulovitá částice (průměr cca do 10  $\mu\text{m}$ ) zachycená na velkém ...
- Obr. 108 Sféroidy z motorového oleje (vzorek č. 4), povrch má dendritickou strukturu ...
- Obr. 109 Sféroidy z motorového oleje (vzorek č. V-1), povrch má nepravidelnou strukturu
- Obr. 110 Sféroidální zakončení výběžku s hexagonálními útvary v povrchové vrstvě ...
- Obr. 111 Částice s přechodovou strukturou popsanou v [35] (vzorek č. V-1)
- Obr. 112 Kulovité částice s vnitřní dutinou ústící v povrchový otvor (detail obr. 116)
- Obr. 113 Detail ústí dutiny z obr. 112
- Obr. 114 Sférické a zaoblené částice různých typů a velikostí
- Obr. 115 Detail zaobleného zakončení částice z levé části obr. 114
- Obr. 116 Detail zaobleného zakončení částice
- Obr. 117 Oblasti, v nichž se vyskytují velké počty sférických částic
- Obr. 118 Snímek lokality s analyzovanými sférickými částicemi
- Obr. 119 Typické EDX - spektrum (složení jednotlivých sféroidů se prakticky shodovalo ...

## Seznam tabulek

- Tab. 1 Morfologie otěrových částic v závislosti na režimu opotřebení
- Tab. 2 Klasifikace druhů opotřebení podle velikosti otěrových částic
- Tab. 3 Odebrané olejové filtry a vzorky olejů v Autoservisu Hybeš
- Tab. 4 Odebrané olejové filtry a vzorky olejů v Autoservisu Hybeš
- Tab. 5 Odebrané olejové filtry a vzorky olejů v Autoservisu Hybeš
- Tab. 6 Odebraný olejový filtr a vzorek oleje v Karex a.s.
- Tab. 7 Odebrané olejové filtry a vzorky olejů v DaimlerChrysler Automotive Bohemia s.r.o.
- Tab. 8 Odebrané vzorky olejů z kompresorů
- Tab. 9 Vlnočty charakteristických sloučenin a strukturních skupin
- Tab. 10 Základní specifikace VEGA TS 5130 SB
- Tab. 11 Motorové oleje Shell Longlife 5W30 VX
- Tab. 12 Motorové oleje Shell Helix Plus 5W40 a 10W40
- Tab. 13 Motorové oleje Shell Helix Plus 15W40
- Tab. 14 Motorové oleje Mogul Racing 5W40
- Tab. 15 Motorové oleje Castrol SLX 0W30 Longtec
- Tab. 16 Motorové oleje Paramo Mogul 10W40
- Tab. 17 Motorové oleje OMV Eco Truck Extra 10W40
- Tab. 18 Nové motorové oleje na IČ

## Seznam příloh

- Příloha A: Výkres sestavy otvíracího přípravku.
- Příloha B: CD obsahující záznamy spekter, fotodokumentaci z analytické ferrografie, rastrovacího elektronového mikroskopu a dílenské výkresy součástí otvíracího přípravku.

**ÚDAJE PRO KNIHOVNICKOU DATABÁZI**

Název práce	Analýza opotřebení olejů a jimi mazaných součástí
Autor práce	Michal Soukenka
Obor	Dopravní prostředky – silniční vozidla
Rok obhajoby	2007
Vedoucí práce	doc. RNDr. Jaroslava Machalíková, CSc.
Anotace	Diplomová práce je věnována možnostem využití moderních instrumentálních metod (infračervené spektrometrie s Fourierovou transformací a analytické ferrografie) v tribotechnické diagnostice silničních vozidel, zejména v oblasti sledování opotřebení olejů a jimi mazaných součástí. Hodnocení technického stavu sledovaných mechanických soustav je ovlivněno tím, že největší částice obsažené v motorovém oleji jsou zachycovány v olejovém filtru. Pro studium morfologie částic vyseparovaných z olejových filtrů byla použita rastrovací elektronová mikroskopie.
Klíčová slova	tribologie; tribotechnická diagnostika; motorový olej; tření; opotřebení; mazání; FTIR spektrometrie; ferrografie; rastrovací elektronová mikroskopie; olejový filtr; silniční vozidla; doprava