

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Analýza částic v olejích pro dopravní prostředky

Bc. Martin Kamenický

Diplomová práce
2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin KAMENICKÝ**
Osobní číslo: **D09659**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Dopravní prostředky-Silniční vozidla**
Název tématu: **Analýza částic v olejích pro dopravní prostředky**
Zadávající katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

- 1) Vypracujte přehled současného stavu poznatků o možnostech uplatnění částicové analýzy při sledování procesu opotřebení vybraných součástí vozidel a maziv, jimiž jsou tyto součásti mazány.
- 2) Zabezpečte odběr olejů z různých druhů vozidel, připravte zkušební vzorky pro analýzy.
- 3) Seznamte se s principy a metodikou použitých experimentálních metod (analýza částic na laserovém analyzátoru, analytická ferrografie).
- 4) Proveďte příslušné laboratorní zkoušky.
- 5) Výsledky experimentálních prací vyhodnoťte a interpretujte, závěry zpracujte ve formě doporučení pro uživatele v praxi.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. VLK, F. Paliva a maziva motorových vozidel. Brno: Nakladatelství a vydavatelství, 2006. 376 s. ISBN 80-239-6461-5.
2. STODOLA, J. Diagnostika motorových vozidel. Brno: VUT 2003.
3. STODOLA, J., MACHALÍKOVÁ, J.: Spolehlivost a diagnostika BSV. Část: Provozní hmoty a materiály pro MVT. Skriptum. Brno: Vydavatelská skupina UO, Brno. Univerzita obrany. 2006. 132 stran. ISBN 80-7231-167-0.
4. ŠTĚPINA, V. a VESELÝ, V. Maziva v tribologii. Bratislava: Veda, 1985.
5. Firemní materiály Spectro CS - návod k obsluze přístroje LNF Q 200.
6. BEČKA, J. Tribologie. Praha: ČVUT, 1997. ISBN 80-01-01621-8.
7. Tribotechnika [online].[cit. 1. října 2010]. Dostupné na WWW: <http://www.tribotechnika.sk>.
8. WEARCHECK. Literature [online].[cit. 1. října 2010]. Dostupné na WWW: <http://www.wearcheck.ca/literature/documents.asp?DocType=techdoc>.
9. Machinery Lubrication. [online].[cit. 1. října 2010]. Dostupné na WWW: <http://www.machinerylubrication.com/>.
10. Degradace strojních součástí [online].[cit. 1. října 2010]. Dostupné na WWW: http://degradace.tf.czu.cz/Dgrd.txt/Mngr_ram.txt2.htm.

Vedoucí diplomové práce:

doc. RNDr. Jaroslava Machalíková, CSc.
Katedra dopravních prostředků a diagnostiky

Datum zadání diplomové práce: **25. února 2011**

Termín odevzdání diplomové práce: **23. května 2011**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.
děkan

L.S.



Ing. Ivo Šefčík, Ph.D.
vedoucí katedry

dne

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.

V Pardubicích dne 23. 5. 2011

Bc. Martin Kamenický



Poděkování

Děkuji všem, kteří mi ochotně pomáhali při tvorbě diplomové práce. Za možnost odběru vzorků chci poděkovat jak firmám, tak soukromým osobám. Zvláštní poděkování patří vedoucí diplomové práce doc. RNDr., Machalíkové Jaroslavě, CSc.

ANOTACE

Diplomová práce je věnována využití experimentálních metod v tribotechnické diagnostice. Zabývá se analýzou otěrových částic obsažených v motorových olejích, jejichž vzorky byly odebírány z osobních automobilů Fiat Brava 1,4; Škoda Fabia 1,2 HTP; Peugeot 307 SW 2,0; Škoda Fabia 1,2; Volkswagen Caddy 2,0 SDI; Škoda Octavia Tour Trumf Combi 1,9.

Pro částicovou analýzu byla použita analýza na laserovém analyzátoru SPECTRO LaserNet Q200 a analytická ferrografie v klasickém uspořádání. Jako doplňující analýza byla použita infračervená spektrometrie, která umožnila posouzení změn, k nimž došlo degradací maziv v provozních podmínkách.

KLÍČOVÁ SLOVA:

opotřebení; motorový olej; instrumentální metody, analýza částic

TITLE:

Element analysis in oils for vehicles

ABSTRACT:

Thesis is devoted to usage of experimental methods in tribotechnical diagnostics. It deals with analysis of wear particles contained in engine oils, their specimen were taken from cars Fiat Brava 1,4; Škoda Fabia 1,2 HTP; Peugeot 307 SW 2,0; Škoda Fabia 1,2; Volkswagen Caddy 2,0 SDI; Škoda Octavia Tour Trumf Combi 1,9. There were used analysis on laser analyzer SPECTRO LaserNet Q200 and analytical ferrography for classical ordination for particle analysis. There were IR spectrometry as additional analysis, which made examination change possible, which were the sequel of oil degradation in process conditions to.

KEYWORDS:

wear; engine oil; instrumental methods, particle analysis

OBSAH

1. ÚVOD	2
1.1 Cíl práce	3
2. TEORETICKÁ ČÁST	4
2.1 Přehled současného stavu poznatků v oblasti tribotechnické diagnostiky	4
2.2 Motorové oleje	8
2.3 Částice vzniklé opotřebením	12
2.4 Principy použitých experimentálních metod	13
2.4.1 Analýza částic laserovým analyzátozem	14
2.4.2 Analytická ferrografie	19
2.4.3 Infračervená spektrometrie	21
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	24
3.1 Technické údaje o vozidlech	24
3.2 Metodika analýz a experimentální podmínky	30
3.2.1 Analýza částic laserovým analyzátozem	31
3.2.2 Analytická ferrografie	34
3.2.3 Infračervená spektrometrie	37
3.3 Výsledky experimentálních prací	38
3.3.1 Výsledky analýzy částic na laserovém analyzátozu	39
3.3.2 Výsledky ferrografické analýzy	65
3.3.3 Výsledky FTIR spektrometrie	73
3.3.4 Souhrn experimentálních výsledků a doporučení pro uživatele	80
4. ZÁVĚR	83
POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE	85
SEZNAM TABULEK	88
SEZNAM OBRÁZKŮ	90
PŘÍLOHY	93

1. ÚVOD

Spolehlivost a životnost silničních vozidel závisí nejen na režimu a podmínkách jejich provozu, ale i na volbě použitého maziva a na jeho aktuálních vlastnostech. Největší význam mají tyto faktory u motorových olejů, které ovlivňují jak spolehlivost a životnost motoru, tak i ekonomickou stránku jeho provozu.

Oleje během provozu vozidel podléhají opotřebení a po určité době používání je nutná jejich výměna. Současným trendem je prodlužování výměnných intervalů olejů a s tím spojená snaha dosáhnout co největších finančních úspor. Výměnný interval je předepsán výrobcem vozidla, provozovatel vozidla může tyto intervaly s přihlédnutím ke způsobu provozu jednotlivých vozidel optimalizovat. Úspory provozních nákladů vycházejí ze skutečnosti, že při předčasné výměně oleje nejsou jeho vlastnosti plně využity – dochází k finančním ztrátám, zvyšuje se produkce nebezpečného odpadu a roste spotřeba ropné suroviny i energií potřebných na její zpracování. Opožděná výměna oleje má za následek nadměrné opotřebení oleje, což může způsobit poškození mazaných míst vozidla, může způsobit ohrožení bezpečnosti provozu, riziko havárií, zvýšení spotřeby materiálu. Podmínkou odůvodněného prodloužení či zkrácení výměnných intervalů je dostatek informací o technickém stavu oleje v závislosti na době provozu nebo ujetých kilometrech (případně na době provozu v motohodinách).

Informace o aktuálním technickém stavu mazacího oleje umožňuje získat tribotechnická diagnostika, která využívá řadu metod, od jednoduchých provozních až po náročné instrumentální metody používané na specializovaných pracovištích.

Na základě výsledků instrumentálních metod lze v tribotechnické diagnostice objektivně hodnotit aktuální technický stav oleje i mazaného mechanismu. Používají se metody hodnotící opotřebení strojních součástí např. pomocí analýzy otěrových kovů, které se během provozu strojů uvolňují do mazacího média. Výsledky tribodiagnostických analýz lze využít jako podklad pro úpravu výměnných intervalů.

Na opotřebení třecích povrchů se podílí řada mechanismů. Tyto nežádoucí změny, k nimž na povrchu součástí dochází oddělováním částic mechanickým působením a které jsou spojeny se vznikem otěru, mohou být doprovázeny také chemickými či elektrochemickými účinky. Hodnocení počtu, velikosti, tvaru, barvy, charakteru povrchu i dalších morfologických vlastností jednotlivých otěrových částic mnohé napoví o tom, z jaké součásti

pocházejí a jakým mechanismem vznikly. Tyto informace pak mohou přispět k eliminaci nebezpečí poškození či havárie stroje, aniž by bylo nutno zařízení demontovat. Existuje mnoho technik, které umožňují údaje o částicích získat. Mezi nejvýznamnější z nich patří např. analýza s využitím čítačů částic a ferrografie, které byly aplikovány v této práci.

Tato práce se proto zabývá analýzou opotřebených motorových olejů. Je zaměřená na hodnocení otěrových částic. Byly použity pokročilé instrumentální metody – analýza s použitím laserového analyzátoru částic a analytická ferrografie. Na nově pořízeném přístroji SpectroLNF Q200 byly provedeny úvodní experimenty, ověřena metodika a základní postupy analýzy motorových olejů. Jako doplňující metoda byla aplikována infračervená spektrometrie, která umožnila posouzení míry degradace maziv v provozních podmínkách. Vzorky byly odebírány z firemních i soukromých osobních automobilů; výsledky práce a doporučení pro další údržbu byly předány jejich provozovatelům.

1.1 Cíl práce

Cílem této diplomové práce bylo

- vypracovat přehled současného stavu poznatků o možnostech uplatnění částicové analýzy při sledování procesu opotřebení motorů silničních vozidel a o procesu degradace motorových olejů v provozu,
- analyzovat vzorky odebraných olejů na laserovém analyzátoru, na ferrografu a na infračerveném spektrometru,
- výsledky experimentálních prací vyhodnotit a závěry zpracovat ve formě doporučení pro uživatele v praxi.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Přehled současného stavu poznatků v oblasti tribotechnické diagnostiky

Moderní vědní obor, který se zabývá problematikou tření opotřebení a mazání, se nazývá tribologie. Tribologie je nauka popisující chováním dotýkajících se povrchů ve vzájemném pohybu nebo při pokusu o vzájemný pohyb [1]. Při vzájemném působení povrchů v pohybu vzniká odpor proti pohybu – tření. Tření pohybujících se povrchů způsobuje změnu geometrického tvaru těchto povrchů – opotřebení. Tření a opotřebení lze snížit mazáním, kdy mazací látka může být jakéhokoliv skupenství.

Praktickou aplikaci tribologie představuje tribotechnika. Tribotechnika se zabývá výpočty konstrukcí a optimalizací třecích dvojic, zkoušení maziv a způsoby mazání, měřicími a kontrolními metodami pro tribotechnické pochody, organizací technik mazání v provozu a spolehlivost konstrukčních součástí a jejich diagnostikou (v tribotechnice nazývanou tribotechnická diagnostika) [2].

Tribotechnická diagnostika je nedestruktivní a nedemontážní metoda využívající mazivo jako zdroj informací o dějích a změnách v mechanických systémech, v nichž je mazivo používáno. Jejím úkolem je vyhodnocování technického stavu strojních součástí a sledování místa a trendu opotřebení mechanického systému pomocí vyhodnocení výskytu cizích látek v mazivu, a to jak z hlediska kvantitativního, tak kvalitativního. Současně tribotechnická diagnostika poskytuje informace o stavu, prodloužení použitelnosti a prognózování degradace použitých maziv [1].

Význam tribotechnické diagnostiky

V současné době jsou kladeny požadavky na snižování nákladů na provoz strojních zařízení. S tím přímo souvisí spolehlivost a prodloužení životnosti strojních celků a zařízení. Úsporu nákladů je možné dosáhnout sledováním technického stavu strojních součástí i stavu používaných maziv s využitím tribotechnické diagnostiky, která je jednou z oblastí diagnostiky. Tribodiagnostika se převážně zabývá sledováním technického stavu provozních náplní a hodnocením opotřebení mazaných součástí strojů.

Včasná a průběžná aplikace tribotechnické diagnostiky umožňuje nejenom kontrolovat stav maziva v průběhu stárnutí, ale i výskyt cizorodých látek a dalších parametrů. Navíc je tato metoda schopna zjistit včas příčiny vznikajících poruch a opotřebení strojních součástí a mnohdy tak předejít značným škodám nebo i havárii stroje.

Účelné využití tribotechnické diagnostiky umožňuje sestavit komplexní mazací režimy shromažďující informace o doplňování a výměnách maziv a tím je zajištěno efektivní hospodaření s mazivy. Nedochozí pak k případům, že je vyměňován olej, který ještě mohl plnit svou funkci a jeho výměna je tedy nevýhodná nejen z ekonomického, ale i environmentálního hlediska, nebo že při striktním dodržování výměnných lhůt může být vyměňován olej nadměrně opotřebený, který svými vlastnostmi nesplňuje požadavky na něj kladené a dochází tak k poškozování strojního zařízení. Monitorování chemických a fyzikálních změn, ke kterým v provozu dochází, poskytuje poměrně přesnou představu o aktuálním stavu maziva a o možnostech jeho dalšího používání [3], [4].

Tření, opotřebení a mazání strojních součástí

Tření lze definovat jako ztrátu mechanické energie při pohybu navzájem se dotýkajících těles. Tělesa mohou být v klidu anebo se vzájemně pohybují. Z tribotechnického hlediska se rozlišuje tření suché, polosuché a kapalinné. Suché tření nepředpokládá přívod maziva, u nerovností dotýkajících se povrchů dochází k tvorbě mikrospojů způsobených mezimolekulárními silami. U polosuchého tření se mezi třecí povrchy mazivo přivádí v nedostatečném množství a povrchy na rozdíl od kapalinného tření nejsou úplně odděleny vrstvou maziva. Podmínkou vzniku kapalinného tření je vytvoření dostatečně pevné vrstvy maziva s využitím tlakového mazání nebo hydrodynamického mazacího klínu.

Opotřebení představuje v tribologii nežádoucí změnu geometrických rozměrů funkčních povrchů. Opotřebení můžeme rozdělit na sedm základních druhů, mezi které patří adhezivní, abrazivní, erozivní, kavitační, únavové, vibrační a korozivní opotřebení. Během provozu strojních součástí se mohou jednotlivá opotřebení kombinovat. Následkem opotřebení dochází k uvolňování částic z funkčních povrchů. Tyto částice se uvolňují do mazacího média a jsou odplavovány a kolují v mazacím systému, kde se mohou chovat jako zdroj abrazivního opotřebení.

Z hlediska diagnostiky částice opotřebení představují zdroj komplexních informací, které mohou informovat o technickém stavu a opotřebení třecích dvojic, kde se třecí dvojici rozumí například hřídel – ložisko.

Tribologický systém je složen ze čtyř prvků, a to ze dvou třecích povrchů (tvořených většinou kovy nebo jejich slitinami, polymery, elastomery nebo keramickými materiály), z maziva a z okolního prostředí, které zasahuje do systému svojí teplotou, vlhkostí a chemickým složením.

Celý tribologický systém pracuje za konkrétních provozních podmínek, z nichž nejvyšší význam mají zatížení, tj. měrný tlak (jeho velikost a průběh), charakteristika vzájemného pohybu součástí (rychlost a průběh), povrchy třecích součástí (drsnot a tvrdost), mazací médium mezi součástmi (jeho parametry, stupeň degradace), množství a charakter částic přítomných mezi součástmi.

Dynamiku opotřebení lze hodnotit podle intenzity tvorby částic, materiálového složení částic, distribučního rozložení velikostních skupin částic, morfologie a tvaru povrchových znaků částic, aj. Částice opotřebení se rozdělují na primární částice generované přímo třecími dvojicemi a na sekundární částice vznikající přetvořením primárních částic při opakovaném průchodu těchto částic soustavou [5].

Další oblastí tribologie je mazání. Maziva mohou být použita v kapalném skupenství v podobě mazacích olejů, v podobě mazacích tuků anebo v pevném skupenství. Pro účely mazání vozidlových spalovacích motorů a převodovek se převážně používají mazací oleje.

Snížení tření a opotřebení je dosaženo pomocí oddělení pohybujících se povrchů pomocí olejového filmu. Následkem tření vzniká teplo a dochází k degradaci funkčních povrchů součástí. Teplo a opotřebení snižuje životnost mechanických částí a použitých maziv. Míra oddělení funkčních povrchů mazacím olejovým filmem závisí na několika faktorech včetně zatížení, rychlosti pohybu a viskozitě. Běžně se tloušťka mazacího filmu, oddělujícího povrchy součástí, pohybuje v rozmezí 2 – 20 mikrometrů [6]. V některých případech, kdy není možné dosáhnout oddělení funkčních povrchů mazacím filmem, lze použít mazací tuky nebo pevná maziva, která sníží tření v místě styku funkčních povrchů.

Mezi další funkce mazání patří omezení teploty, kdy protékající mazivo absorbuje teplo v místě vzniku a dochází tak k rozptýlení tohoto tepla v olejové náplni. Ohřátý olej se ochladí průtokem mazací soustavou anebo může být ochlazen v olejovém chladiči. Mazivo také slouží

k ochraně strojních součástí před vlivy okolního prostředí a umožňuje zpomalení a omezování vzniku nečistot jako jsou částice, voda a chemické látky. Mazací oleje také odplavují nečistoty a otěrové částice z mazaných míst a zajišťují jejich přemístění do mazací skříně nebo olejové nádrže, popřípadě do olejového filtru, kde se tyto nečistoty usazují.

Základní režimy mazání

Mezi základní režimy mazání patří hydrodynamické mazání, elasticko-hydrodynamické a mezní mazání.

Hydrodynamické mazání (mazání s úplným filmem) – k oddělení mazaných součástí dochází pomocí hydrodynamického mazacího klínu. Vytvoření mazacího klínu závisí na geometrickém tvaru povrchů součástí, na rychlosti pohybu, na zatížení a viskozitě oleje. Rychlost a viskozita jsou nepřímo úměrné zatížení. Zvyšování rychlosti a viskozity nebo snižování zatížení má za následek zkrácení času potřebného pro dosažení dostatečně silného olejového filmu tj. dosažení hydrodynamického oddělení povrchů mazaných součástí. Podobně tvar a drsnost povrchů ovlivňuje snadnost, s jakou hydrodynamické mazání vzniká.

Hydrodynamické mazání není dosaženo při rozběhu a doběhu stroje. Náhlé změny rychlosti a zatížení zhoršují účinnost hydrodynamického mazání. Urychlení tvorby hydrodynamického mazání a omezení opotřebení během rozběhu je možné dosáhnou přívodem tlakového oleje, který napomůže oddělení mazaných povrchů.

Elasticko-hydrodynamické mazání (EHM) vzniká u odvalujících se těles, kde se styk blíží bodu nebo přímce např. u valivých ložisek nebo v místě záběru ozubených soukolí. V místě styku povrchů vlivem pružnosti materiálu dochází k deformaci ložiskového kovu a vytváří se malá plocha, ve které dochází k vytvoření hydrodynamického mazacího filmu. Vytvoření EHM je závislé na deformaci povrchů součástí. EHM film je velmi tenký ($>1 \mu\text{m}$). Přenos zatížení je realizován v krátkém okamžiku přes malou plochu, což má za následek vznik velkých tlaků (více než 3450 MPa). Během periody vysokého zatížení se olej okamžikově mění z kapaliny na pevnou látku. Jakmile tlak pomine, mazivo se bez následků vrací do tekutého stavu. Extrémní lokální tlaky v místech valení kladou zvýšené požadavky na důležitost efektivního mazání.

Mezní mazání nastává u mazaných součástí, kde není možné dosáhnout dostatečné tloušťky olejového filmu. Mezní mazání vzniká za následujících podmínek: tloušťka olejového filmu nepřevyšuje nerovnosti povrchů, zařízení pracuje v režimu častých startů a zastavení,

dochází k rázovému zatížení, je malá rychlost pohybu nebo je požadována nízká viskozita oleje. Mazání za mezního tření vyžaduje použití měkkých kovů, které produkují menší tření v místě dotýkajících se povrchů, využívají se aditiva, která chemickými reakcemi snižují tření na povrchu součástí, lze použít i tuhá maziva (grafit), která umožní snížení tření a opotřebení v místě dotyku funkčních povrchů mazaných součástí [6, 7].

2.2 Motorové oleje

Mazací olej se vyrábí smísením základového oleje s aditivou. Výchozí surovinou pro výrobu základových olejů je ropa, která je směsí nejrůznějších uhlovodíků. Pro výrobu základových olejů se používá řada postupů. Základový olej bývá v praxi tvořen jednou složkou anebo směsí různých základových olejů, které mohou mít odlišný způsob výroby i odlišné vlastnosti. Základové oleje se vyrábí rafinací ropy, kde se využívá destilace, rafinování a odstraňují se parafíny. Z produktů vznikajících při zpracování ropy se dalšími úpravami získávají hydrokrakové oleje. Další z možností výroby základových olejů je využití syntetických maziv, která jsou produkty chemických reakcí, při nichž se z nízkomolekulárních látek vytváří velké komplexní molekuly s mazacími vlastnostmi potřebnými pro danou aplikaci. Na rozdíl od ropných olejů, které jsou tvořeny komplexní směsí uhlovodíků, je možno vlastnosti syntetických kapalin předem definovat a zajistit standardní kvalitu výsledného produktu. Mezi tyto oleje patří syntetické uhlovodíky, organické estery, polyglykoly, estery kyseliny fosforečné, silikáty, silikony a fluorované uhlovodíky.

Aditiva motorových olejů jsou chemické přísady, které mají za účel zlepšovat vlastnosti základových olejů. 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.

Aditiva se rozlišují na polární a nepolární aditiva. Polární aditiva obsahují molekuly s nesymetrickým uspořádáním, které má za následek vznik elektrického náboje na koncích těchto molekul. Elektrický náboj způsobuje, že jsou přitahovány k povrchům mazaných součástí, kde tvoří tenký film. Nepolární aditiva nejsou povrchově aktivní, tzn., že nejsou přitahována k povrchům mazaných součástí, ale jsou rozptýlena v celém objemu maziva rovnoměrně.

Mezi základní aditiva patří detergenty a disperzanty, které se starají o čistotu oleje a mazaných částí, protikoroziční přísady, protiotěrové přísady snižující opotřebení, zpomalovače stárnutí, deaktivátory kovů omezující chemickou degradaci maziva a další aditiva jako jsou zvyšovače viskozitního indexu, snižovače bodu tuhnutí, protipěnovací přísady, modifikátory tření, aditiva chránící elastomery atd. [8, 9].

Spalovací motor obsahuje velké množství pohyblivých dílů. Aby mezi jednotlivými díly nevznikalo suché tření, které způsobuje zadírání pohyblivých součástí, je nutné na funkčních plochách součástí vytvořit olejový film, který výrazně sníží součinitel tření a zabrání tak adhezivnímu opotřebení funkčních ploch [10].

Dalšími důležitými funkcemi mazání jsou:

Protikoroziční ochrana chrání součásti motoru před korozi.

Odvod tepla z motoru

Olej se ochlazuje proudem vzduchu, který proudí kolem spodního víka motoru, v němž se olej shromažďuje. K lepšímu odvodu tepla se někdy spodní víko opatřuje žebrováním, čímž se zvětší vzduchem obtékaná plocha. U motorů pracujících v nepříznivých podmínkách nebo pod velkou zátěží se používá zvláštní chladič oleje.

Utěsnění spalovacího prostoru

Olejový film zapříčiňuje lepší utěsnění pístních kroužků, a tím zabraňuje pronikání zplodin ze spalovacího prostoru.

Odplavování nečistot

Této funkce mazání se využívá v tribodiagnostice. Dlouhodobým sledováním a analýzou těchto nečistot je možné zjistit průběh opotřebení motoru popřípadě odhalit vznik poruchy.

Ochrana součástí motoru před korozi

U pístových spalovacích motorů se používá několik způsobů mazání:

a) *mastnou směsí* – tento způsob se používá u dvoutaktních motorů. Olej se přimíchává do paliva a s ním se přivádí do motoru.

b) *tlakové mazání* – v tomto případě je motor mazán pomocí oleje, který je nasáván olejovým čerpadlem ze zásobníku a následně přiváděn na důležitá místa. Ostatní méně namáhaná místa jsou mazána olejem, který odstříkuje nebo stéká z míst, na něž je olej přiváděn čerpadlem. Poté olej stéká zpět do zásobníku. Podle umístění zásoby oleje se rozděluje tlakové mazání na

tlakové mazání ze skříně, kdy zásoba oleje je ve spodním víku motoru, odkud je nasávána čerpadlem a mazacími kanály a vytlačována k mazaným místům. Druhým způsobem je tlakové mazání z nádrže. Tohoto způsobu se používá u speciálních terénních vozidel a traktorů. Při velkých sklonech terénu, na němž tato vozidla pracují, by docházelo k přelévání oleje v poměrně velkém spodním víku a mohlo by dojít k nasátí vzduchu. To by mohlo být nebezpečné pro chod motoru. Výhodnější proto je shromažďovat olej v zásobníku odděleném od motoru a odtud jej nasávat olejovým čerpadlem a dopravovat k mazaným místům. Stékající olej je odsávacím čerpadlem nasáván z klikové skříně a dopravován zpět do zásobníku.

Viskozita mazacích olejů

Viskozita patří mezi nejdůležitější vlastnosti mazacích olejů. Viskozita má vliv na únosnost mazacího filmu, velikost odporů oleje proti pohybu, na těsnicí schopnost a čerpatelnost oleje a na tepelnou vodivost maziva. Viskozita je mírou vnitřního tření kapaliny a je měřítkem tekutosti kapalin. Rozlišuje se dynamická viskozita η [Pa·s] daná podílem tečného napětí τ mezi dvěma vrstvami kapaliny a gradientem rychlosti \mathbf{I} , který je kolmý na pohyb kapaliny. Kinematická viskozita ν [mm²·s⁻¹] se vypočte jako podíl dynamické viskozity η a hustoty kapaliny ρ . Vypočet viskozity se odvozuje z definičního vztahu pro tečné napětí $\tau = \frac{du}{dx} \cdot \eta = \eta \cdot \mathbf{D}$, dynamická viskozita $\eta = \frac{\tau}{\mathbf{D}}$ a kinematická viskozita ν se vypočte $\nu = \frac{\eta}{\rho}$. Tyto vztahy platí pro Newtonovské kapaliny. Závislost viskozity na teplotě je vyjádřena viskozitním indexem. Čím vyšší je viskozitní index, tím méně se mění viskozita s kolísající teplotou [11].

Při provozu motorového oleje může docházet k velkým změnám jeho viskozity. Za nárůst viskozity oleje při provozu zodpovídá zejména termická a oxidační degradace oleje a u vznětových motorů navíc množství sazí v oleji. Na konci životnosti pak může u hodně degradovaného motorového oleje docházet k nárůstu viskozity díky nahromadění produktů oxidačního stárnutí v oleji.

Snížení viskozity způsobuje nadměrný obsah paliva v oleji. Příliš nízká viskozita, většinou díky závadě na vstřikování a nadbytku paliva v oleji, může vést k příliš tenkému mazacímu filmu a při vyšším zatížení může docházet k porušení mazacího filmu a zvýšení opotřebení

nebo i k zadírání třecích dílů. Další příčinou snižování viskozity je tzv. stříhová stabilita modifikátorů viskozity (polymerní látky, které upravují viskozitu motorových olejů a zvyšují jejich viskozitní index). Nižší stříhová stabilita moderních motorových olejů SAE xW/40 může být záměrná s cílem dosáhnout úspory paliva.

V praxi se většinou povoluje provoz motorového oleje v rozmezí viskozity max. $\pm 20\%$ (platí pro velkoobjemové vznětové motory). Pro zážehové motory lze připustit větší odchylku směrem k nižším hodnotám, i vzhledem ke stříhové nestabilitě moderních olejů (pokles viskozity až o 30 %) [12], [13].

Kontaminace a degradace olejových náplní

Během provozu stroje nedochází pouze k opotřebením třecích dvojic, ale i k degradaci použitého maziva. Na degradaci olejů má vliv mnoho faktorů. Olej je vystaven oxidačnímu působení vzdušného kyslíku, intenzivnímu teplotnímu namáhání ve spalovacích motorech, pronikání kyselých látek způsobených nedokonalým spalováním a dochází také k usazování nečistot (prach, částice opotřebením, saze a produkty chemické degradace).

K znehodnocení oleje může přispět kontaminace provozními kapalinami tj. palivem nebo chladicí směsí. Palivo přítomné v oleji snižuje jeho viskozitu a v krajním případě může zmenšit tloušťku olejového mazacího filmu pod kritickou mez, což může způsobit nadměrné opotřebením mazaných součástí. Voda proniklá do motorového oleje má korozivní účinky a vyvolává rozklad aditiv, neboť omezuje jejich rozpustnost v oleji a podporuje jejich vysrážení z olejové fáze. Kontaminace motorového oleje chladicí kapalinou způsobuje rychlou degradaci olejové náplně v důsledku tvorby úsad nerozpustných v oleji a zrychlení stárnutí oleje.

Dalšími vlivy působícími na opotřebením maziva může být množství maziva použitého v mazací soustavě, počáteční kontaminace, časová perioda provozování, pravidelné doplňování maziva, přítomnost a funkce filtrů nečistot, prostředí v jakém stroj pracuje a pravidelnost údržby. Dalším negativním vlivem jsou chyby, vzniklé při montáži a spojení včetně nedokonalostí vyrobených třecích ploch, které se musí tzv. zabíhat.

2.3 Částice vzniklé opotřebením

Otěrové částice lze podle jejich původu rozdělit do dvou základních kategorií [1]: na primární částice, které jsou generovány přímo třecími dvojicemi a charakterizují režim opotřebením v souladu s obecně známými poznatky [14], a na sekundární částice vznikající přetvořením primárních částic.

Podíl primárních a sekundárních částic závisí na řadě faktorů, např. na velikosti olejové náplně a druhu použitého oleje, na počtu a účinnosti olejových filtrů, na účinnosti dalších procesů odlučování částic ze systému, na tepelném a mechanickém zatížení motoru aj.

Částice vznikající adhezivním opotřebením mají původ v Beilbyho vrstvě, z níž se postupně oddělují a jsou mazivem odplavovány. Jejich rozměry jsou velmi malé (zpravidla submikrometrické).

Částice abrazivního opotřebením mají charakteristický tvar tenkých drátků, prohnutých či stočených do spirálky. Morfologicky se liší od abrazivních částic ze záběhového režimu, které mají tvar srpečků nebo mečků s ostrým zakončením. Celkově se velikost abrazivních částic pohybuje v rozmezí desítek až stovek μm při velmi malé tloušťce nepřesahující desetiny μm .

Částice únavového opotřebením jsou tvarově rozdílné:

- sférické částice vznikají nejčastěji v důsledku únavového opotřebením valivého charakteru v Beilbyho vrstvě na povrchu pov ložisek. Rozměry sféroidů jsou relativně malé (jednotky až desítky μm);
- laminární částice jsou vytvářeny plastickou deformací částic unášených olejem při jejich opakovaném průchodu mazacím okruhem; rozválcováním sféroidů i jiných třírozměrných částic vznikají tenké ploché lupínky nepatrné tloušťky, jejichž délka činí typicky desítky až stovky μm , šířka desítky μm . Tyto částice mají hladký povrch a nepravidelné okraje, jejich přítomnost bývá doprovázena výskytem sféroidů; souvisí s nástupem postupné poruchy ložiska;
- únavové částice jsou typické i pro poškození ozubených kol. Jedná se o trojrozměrné částice se srovnatelnou délkou, šířkou i tloušťkou, jejichž povrch je nepravidelný, rýhovaný s nepravidelně členěnými okraji. Rozměry těchto částic dosahují desítek až stovek μm . Rozdělují se na částice typu „chunky“ (typická je pro ně velikost desítek

μm a nepravidelně členitý povrch) a typu „scuffing“ (vznikají na bocích zubů ozubených kol za vysokých tlaků a teplot, které již ovlivňují materiál částic) [15].

Abnormální částice mezního a havarijního opotřebení vznikají při zadírání nebo silné abrazi intenzivním mechanickým rozrušováním Beilbyho vrstvičky (při nadměrném zatížení se vrstva neobnovuje). Zpravidla se v těchto případech nevyskytují částice adhezivního otěru. Abnormálním částicím se podobají tvarem i rozměry částice, vznikající v kontaktu slitin barevných kovů.

Kromě tohoto kovového otěru lze identifikovat i částice nekovové:

- prachové částice (malé kulovité nebo hranolovité částice o velikosti jednotek až desítek μm, při provozu v prašném prostředí až stovek μm, často průsvitné),
- tribopolymery (oblé útvary, jejichž jádro je tvořeno submikrometrickými kovovými částicemi),
- karbonové částice (nepravidelné útvary, často drobné a porézní, o mikro- až milimetrové velikosti),
- vlákna až několikamilimetrové délky, pocházející zpravidla z filtračních materiálů,
- útržky pryžových těsnění nepravidelných tvarů (časté u hydraulických olejů) a velmi rozdílných velikostí (desítky μm až jednotky mm).

Informace o elementárním složení částic nalezených v oleji zjednodušují a zpřesňují identifikaci zdroje, z něhož pocházejí.

2.4 Principy použitých experimentálních metod

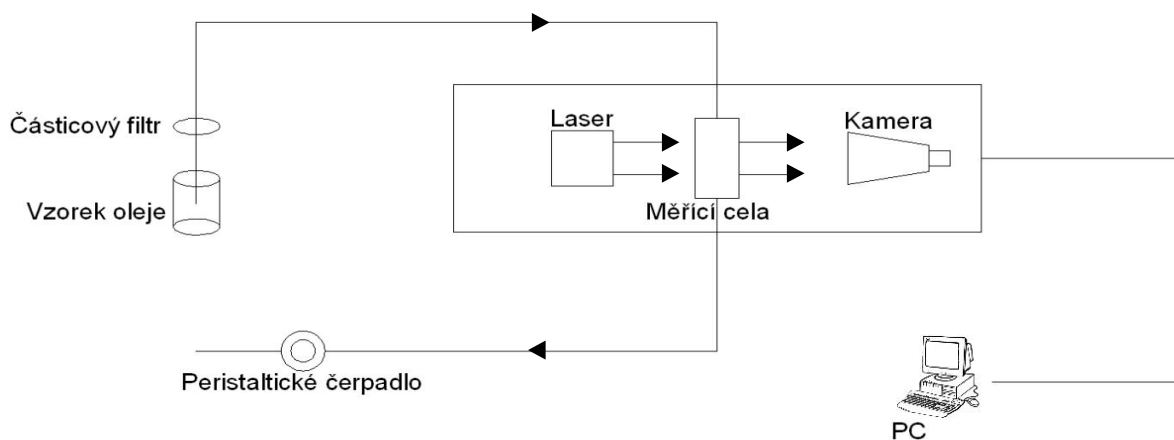
Pro vyhodnocování aktuálního stavu maziv i strojních zařízení jimi mazaných je možné využít řadu normalizovaných i nenormalizovaných instrumentálních metod.

V této diplomové práci byla pro hodnocení opotřebení provozovaných strojů aplikována analýza s využitím laserového analyzátoru částic (LaseNet Fines – LNF) a analytická ferrografie. Jako doplňující metoda byla pro vyhodnocení degradace oleje použita infračervená spektrometrie s Fourierovou transformací (FTIR spektrometrie).

2.4.1 Analýza částic laserovým analyzátozem

Laserový analyzátor částic LNF (LaserNet Fines Q200) je analytický přístroj, který při analýze opotřebených olejů umožňuje klasifikaci tvarů a stanovení počtu částic nacházejících se v mazacích olejích. SpectroLNF Q200 se používá pro analýzu vzorky hydraulických a motorových olejů. Vyhodnocení se provádí softwarově na základě morfologické analýzy a rozdělení velikosti částic opotřebení (hodnotí se největší rozměr částice a průměr ekvivalentního kruhu, tj. průměr kruhu, který má stejnou plochu jako je plocha částice).

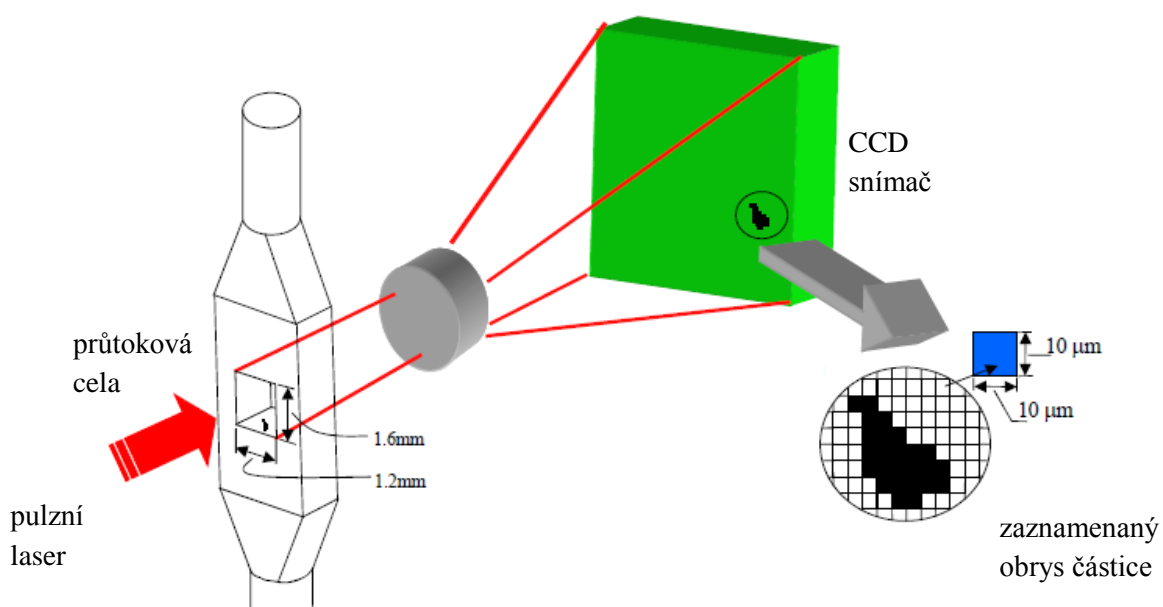
Účelem použití SpectroLNF Q200 je identifikovat typ částic a závažnost mechanického opotřebení pomocí měření rozložení velikosti, rychlosti nárůstu a tvaru částic otěrových kovů nacházejících se v oleji. SpectroLNF Q200 umožňuje určit a analyzovat tvar částic a s vysokou přesností vypočítat počet částic o velikosti minimálně 4 μm a maximálně 100 μm , které obsahuje zvolený objem oleje (1 ml). Pro záznam a vyhodnocení se využívá laserová zobrazovací technika a speciální vyhodnocovací software.



Obr. 1: Schéma laserového automatického čítače částic

Analyzovaný vzorek oleje se nechá protékat zobrazovací celou, kde se prosvěcuje pulzní laserovou diodou. Prošlé záření je snímáno CCD snímačem kamerového systému. Částice obsažené v oleji nepropouštějí světlo – za pomoci CCD snímače je zachycen jejich obrys (3500 snímků na 0,65 ml zpracovaného vzorku). Obrazy snímány kamerou se přenášejí do počítače, kde se analyzují rychlostí 30 snímků za sekundu. V každém snímku je softwarově určen počet objektů. Výsledky statistického hodnocení objektů se uloží a vytvoří se bitmapový obraz objektů s hlavním rozměrem větším než 20 μm

(velikost minimálního zobrazení je 10 pixelů). Tento obraz se uloží a může být zobrazen v prohlížeči částic. Každý snímek je zpracován pomocí rastrového snímání, které umožňuje identifikaci objektu (obr 1, 2).



Obr. 2: Princip činnosti LNF [16]

Popis zařízení SpectroLNF Q200

Analyzátor částic se skládá z těchto základních částí:

Nasávací zařízení – toto zařízení se dá výškově přizpůsobit nádobě se vzorkem; je opatřeno nasávací hadičkou, která se zasune do vzorku oleje. V horní části je umístěn šroub umožňující vyjmutí filtru při jeho čištění.

Laserová dioda je umístěna uvnitř analyzátoru; je spojena s průtokovou kyvetou a čočkou se 4násobným zvětšením.

Průtoková kyveta je nejdůležitější částí analyzátoru. Vzorek oleje je nasáván pomocí peristaltického čerpadla z nádoby se vzorkem přes nasávací hadičku a přes filtr s rozměrem ok 100 μm. Dále olej proudí do měřicí cely a vytéká z přístroje odpadní hadičkou.

Držák kyvety udržuje kyvetu v optimální poloze.

Zvětšovací čočka – objektiv s čočkou umožňuje 4násobné zvětšení. Tato část analyzátoru slouží k zobrazení tekutiny uvnitř měřicí cely. Obraz je snímán pomocí CCD kamery a zobrazován na monitoru.

Karta analyzátoru slouží k vyhodnocování všech měřených signálů.

Konektor USB je umístěn na zadní straně analyzátoru a umožňuje připojení přístroje k počítači.

Obtokový ventil je softwarově ovládaný ventil, který umožňuje obtok průtokové kyvety v počáteční fázi měření vzorku nebo při jeho výplachu.

Peristaltické čerpadlo je umístěno na přední straně analyzátoru, je ovládáno softwarově. Uvádí vzorek oleje do pohybu průtokovou kyvetou.

Odpadní hadička slouží k odvodu kapaliny do odpadní nádoby.

Pro stanovení skutečného stavu sledovaného stroje je velmi důležitá správná interpretace získaných výsledků analýzy oleje. V zásadě jsou možné dvě cesty:

1) Jsou dány limity sledovaných parametrů a získané výsledky se s nimi porovnávají.

V případě obsahu otěrových kovů mohou tyto limity být určeny:

- a) výrobcem stroje, který by je měl stanovit na základě dlouhodobých zkoušek srovnáváním obsahu kovů v oleji se skutečně zjištěným opotřebením (v praxi nejčastěji u velkých plynových motorů výrobci tyto limity běžně udávají a předepisují pravidelné analýzy oleje),
- b) laboratoří provádějící analýzy,
- c) uživatelem stroje,
- d) výrobcem oleje.

V posledních letech je snaha tyto limity určit všeobecně pro určité skupiny strojů a typy provozů zároveň s doporučenými intervaly odběru vzorků oleje a parametry, které mají být sledovány. Pracovní skupina ISO zabývající se technickou diagnostikou strojů v současné době normu pro tribotechnickou diagnostiku (ISO Subcommittee on Condition Monitoring and Diagnostics of Machines (TC108/SC5 - TC108/SC5/WG4)). V jiných oborech diagnostiky už byly některé normy dokončeny: ISO 18434-1:2008 Condition monitoring and diagnostics of machines -- Thermography -- Part 1: General procedures, nebo ISO 22096:2007 Condition monitoring and diagnostics of machines - Acoustic emission.

2) Sledují se trendy obsahu otěrových kovů, kódu čistoty nebo hodnot vypočtených z ferrografického hodnocení vzorku. Pokud se pravidelně provádí analýza oleje ze sledovaného stroje, je možné z trendů velmi spolehlivě určit odchylku od „normálního“ stavu a získat tak signál o projevu zvýšeného opotřebení stroje. Pro stanovení částic vzniklých opotřebením stroje a nesených mazacím olejem se dnes používá více metodik. Stále razantněji se ale prosazuje přímé spektrometrické stanovení obsahu kovů s použitím emisního spektrometru, který přes určitá omezení poskytuje velmi rychle širokou paletu obsahu prvků v oleji. Z hlediska diagnostiky stroje a určení režimu jeho opotřebení, resp. změn v režimu opotřebení, je optimální kombinace stanovení obsahu otěrových kovů a stanovení velikostí a charakteru částic [17].

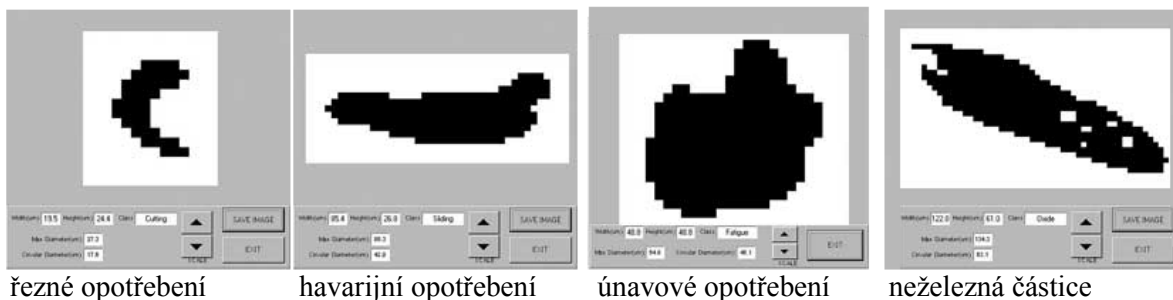
Přístrojem SpectroLNF Q200 jsou podle obrysu klasifikovány částice s nejdelším rozměrem větším než 20 μm do několika kategorií:

- částice řezného (abrazivního) opotřebení (Cutting particles),
- částice únavového opotřebení (Fatigue particles),
- částice havarijního opotřebení (Severe sliding particles),
- nekovové částice (Nonmetallic particles),
- vlákna (Fibers),
- kapky vody, vzduchové bubliny a další nezařaditelné (neklasifikované) částice, které neodpovídají svým tvarem daným vzorům (Unclassified particles).

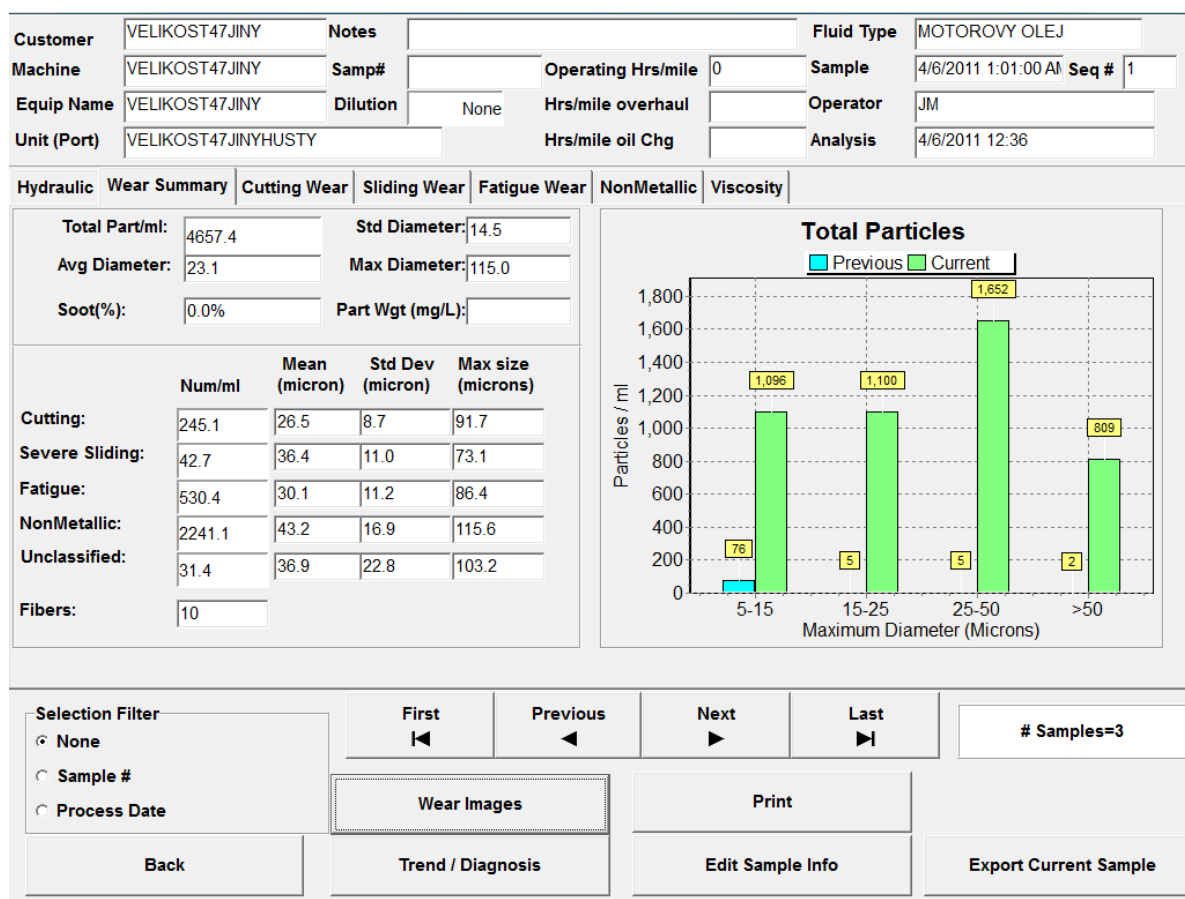
Zpracování naměřených obrazů je realizováno s využitím neuronových sítí. Jako zdroj informací pro neuronové sítě aplikované u SpectroLNF Q200 byla použita databáze obrazů otěrových částic a jejich klasifikací, získaných pomocí klasické analytické ferrografie. Nevýhodou přístroje SpectroLNF Q200 však je, že neumožňuje získat informace o barvě částic, jejich struktuře ani o jejich povrchových vlastnostech.

Analytickým výstupem SpectroLNF Q200 je hodnocení celkového počtu otěrových částic a počtu částic rozdělených do kategorií podle původu. Software umožňuje hodnocení znečištění olejů podle normy ISO 4406 pro hydraulické oleje nebo podle jiných norem. Součástí softwarového vybavení SpectroLNF Q200 je možnost zobrazení obrysů částic, které jsou rozděleny do kategorií podle původu (obr. 3). Software pro morfologickou analýzu provádí test kruhovitosti a automaticky vyřazuje bubliny vzduchu a kapky vody větší než 20 μm z celkových výsledků.

Součástí vyhodnocení je i orientační určení množství vody v oleji. SpectroLNF Q200 také umožňuje sledovat a zaznamenávat trendy opotřebení při průběžném sledování strojních zařízení. Vyhodnocuje rovněž dynamickou viskozitu při 40 °C a umožňuje její přepočítání na viskozitu kinematickou (při známé hustotě oleje).



Obr. 3: Příklady zobrazení částic pomocí LNF [18]



Obr. 4: Příklad výstupu komplexní částicové analýzy provedené na SpectroLNF Q200

Kromě laserového analyzátoru částic jsou v praxi používány i principiálně jiné typy analyzátorů částic pracující na principu rozptylu světla. Jedná se např. o analyzátory Horiba (LA-300, LA-950V2, LB-550) [19].

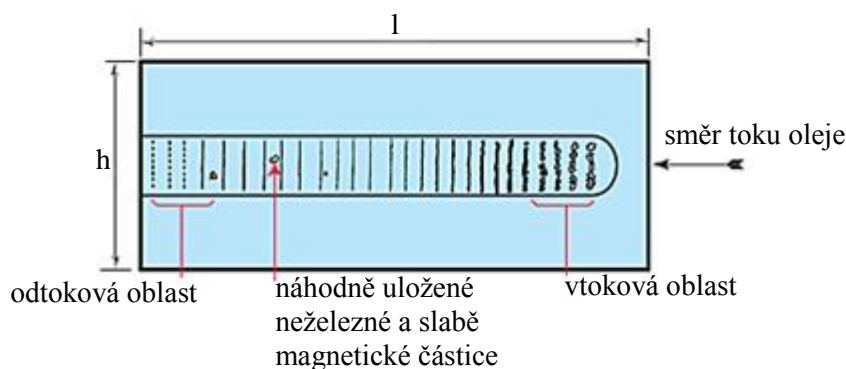
2.4.2 Analytická ferrografie

Ferrografickou analýzu použitých olejů lze využít jako efektivní nástroj pro předcházení potenciálních poruch nebo havárií provozovaných strojů. Pravidelně prováděné testy mohou poskytnout důležité informace o stavu třecích ploch a mohou pomoci určit, zda stroj pracuje nebo nepracuje v normálním režimu opotřebení.

Ferrografie slouží pro analýzu feromagnetických otěrových látek v mazivu pomocí separace kovových (i nekovových) částic z opotřebeného oleje za pomoci silného proměnného magnetického pole. Stopa ze zachycených částic (ferrogram) vytvořená na povrchu podložky je po odplavení oleje vhodným rozpouštědlem a oschnutí podrobena analýzám.

Vzorek oleje je vytlačován čerpadlem nebo z injekční stříkačky a stéká za pomoci gravitace po šikmo uložené podložce a je odváděn odtokovou trubičkou. Podložka se nachází v silném magnetickém poli, které způsobí zachytávání a usazování feromagnetických částic na povrch podložky, kde částice tvoří řetízky kolmé na průtok oleje. Pro zlepšení separace otěrových částic ze vzorků oleje je možné olej zahřát nebo naředit vhodným rozpouštědlem.

Ferromagnetické částice se na podložce usazují podle velikosti, kdy u vtokové části jsou usazeny především nejrozměrnější částice a na výtoku převážně částice nejmenější. Na ferrogramu se mohou kdekoliv náhodně usadit paramagnetické (Al, Mn, Cr, Pt) a diamagnetické (Cu, Ag) nebo nemagnetické částice (mosaz, ložiskový kov, organické látky, atd.). Příklad rozložení částic na ferrogramu je uveden na obr. 5.



Obr. 5: Schematické znázornění ferrogramu [20]

Ferrografie se rozděluje na přímočtenou ferrografii, která dává rychlý odhad množství otěrových částic pomocí fotodenzimetrického vyhodnocení optické hustoty nanesené stopy otěrových částic a na analytickou ferrografii, navazující na přímočtenou ferrografii. Analytická ferrografie umožňuje získat podrobnější informace o skutečném technickém stavu mazací soustavy a mazaných dílů i o typu opotřebení jednotlivých třecích dvojic.

Ferrogramy připravené z odebraných vzorků oleje jsou podrobeny analýze pomocí bichromatického mikroskopu. Vyhodnocování ferrogramu lze rozdělit do několika kroků, kdy se u částic otěrového kovu zachyceného na ferrogramu určuje barva a složení částic, velikost, magnetické vlastnosti, typ opotřebení a pravděpodobné místo vzniku částic, tj. místo, kde dochází k opotřebení.

Na základě těchto pozorování lze vyhodnotit technický stav provozovaného stroje. Stroje pracující v normálním režimu opotřebení generují malé ploché částice v malém a rovnoměrném množství. Pokud se zvýší množství částic nebo poměr velkých částic k malým, může to být signálem, že došlo k zvýšení opotřebení a zhoršení technického stavu stroje. Vznik rozměrných částic opotřebení signalizuje hrozící nebezpečí havárie strojních zařízení.

Při vyhodnocení ferrogramu lze běžně vyskytující se částice rozdělit do několika kategorií podle barvy a magnetických vlastností. Ferromagnetické částice vytvářejí na ferrogramu řetízky, v kterých se mohou náhodně zachycovat nemagnetické částice. Mezi zachycené částice patří:

- neželezné kovy (hliník nebo chrom), které se jeví jako bílé částice,
- měděné částice identifikovatelné podle jasně žluté barvy,
- ložiskové kovy (cín a olovo) jeví se jako šedé body,
- prachové částice (křemen) jeví se jako světlé krystaly,
- vlákna pocházející z olejových filtrů nebo nečistot, mohou být průsvitné nebo různobarevné,
- železné částice, které se dále rozdělují na vysoko a nízkolegované oceli, tmavé oxidy kovů, litiny a korozivní částice.

Dalším krokem při analýze ferrogramu je vyhodnocení velikosti a tvaru částic. Velikost částic se určuje pomocí objektivového mikrometru, částice větší než 30 μm indikují vznik abnormálního opotřebení. Tvar otěrových částic je důležité vodítko pro určení místa

opotřebením. Každý typ opotřebením je zdrojem ošerových částic charakteristických tvarů a rozměrů, příklady různých typů ošerových částic jsou uvedeny v publikacích [6, 21, 22].

2.4.3 Infračervená spektrometrie

Degradace maziva v průběhu jeho používání způsobuje zhoršení užitných vlastností, které se kromě jiných negativních účinků projevuje i zhoršením mazací schopnosti. Může pak docházet ke zvýšenému opotřebením třecích ploch. Je proto potřebné v souvislosti s částicovou analýzou souběžně sledovat i změny chemického složení oleje. V této práci byla k analýze motorových olejů použita jako doplňující metoda infračervená spektrometrie s Fourierovou transformací.

Infračervená spektrometrie obecně umožňuje identifikovat druh maziva a sledovat změny probíhající při degradaci oleje v motoru, což je tradičními metodami prakticky nemožné nebo obtížné [23].

Metoda FTIR spektrometrie je založena na měření absorpce infračerveného záření o různých vlnových délkách analyzovaným materiálem. Infračerveným zářením se rozumí elektromagnetické záření s rozsahem vlnových délek $\lambda = 0,78\text{--}1000\ \mu\text{m}$, což odpovídá rozsahu vlnových

$1/\lambda = 12800\text{--}10\ \text{cm}^{-1}$. Celá oblast je rozdělena na blízkou ($13000\text{--}4000\ \text{cm}^{-1}$), střední ($4000\text{--}200\ \text{cm}^{-1}$) a vzdálenou infračervenou oblast ($200\text{--}10\ \text{cm}^{-1}$), přičemž nejpoužívanější je střední oblast (tab. 1).

Infračervená spektrometrie využívá absorpce infračerveného záření při průchodu vzorkem, při které dochází ke změnám energetických stavů molekuly v závislosti na změnách dipólového momentu molekuly. Výstupem je infračervené spektrum, které je grafickým zobrazením funkční závislosti energie, většinou vyjádřené v procentech transmitance (T) nebo jednotkách absorpce (A) na vlnové délce (λ) dopadajícího záření.

Transmitance (propustnost) je definována jako poměr intenzity záření, které prošlo vzorkem, k intenzitě záření vycházejícího ze zdroje.

Absorbance je veličina používaná ve fotometrii a spektrofotometrii. Udává, jak mnoho světla bylo pohlceno měřeným vzorkem. Je to bezrozměrná veličina [24].

Absorbanci lze definovat na základě transmitance jako

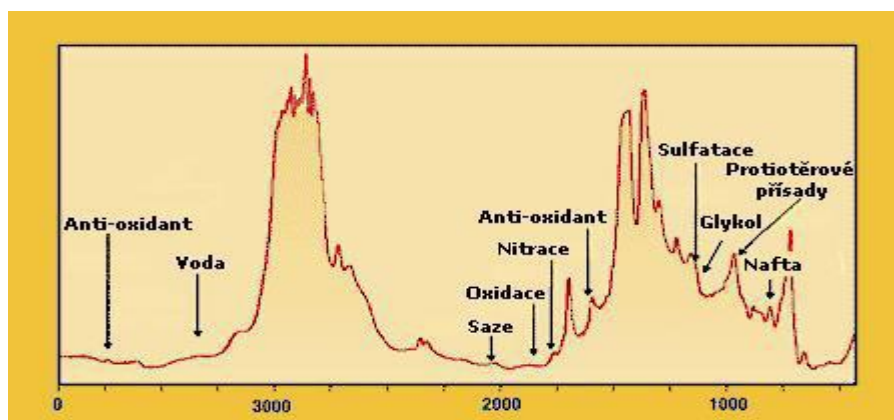
$$A = -\log T$$

kde: A je absorbance,

T je transmitance téhož vzorku za stejných podmínek.

Absorpční pásy mající vrcholy v intervalu $4000\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$ jsou vhodné pro identifikaci funkčních skupin (např. --OH , C=O , N-H , CH_3 aj.). Pásy v oblasti $1500\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ jsou nazývané oblastí „otisku palce“. Pomocí „Search programů“ a digitalizovaných knihoven infračervených spekter je možno identifikovat neznámou analyzovanou látku [23].

Při interpretaci infračervených spekter se sledují jako hlavní charakteristiky poloha a intenzita resp. plocha absorpčních pásů.



Obr. 6: Typické pásy v FTIR spektru motorového oleje [25]

Na obr. 6 jsou schematicky znázorněny oblasti vlnočtů charakteristických pásů vazeb a strukturálních skupin ve spektru. Podle schématu lze přibližně určit polohu a šířku jednotlivých absorpčních pásů.

Tab. 1.: Přehled vlnočtů kontaminantů běžně přítomných v mazacích olejích [1], [26]

vlnočet (cm^{-1})	kontaminace	identifikace	význam
3600– 3150	voda, glykol	nárůst absorbance	netěsnost chladicí soustavy, kontaminace oleje vodou
2000	saze	nárůst absorbance	nárůst obsahu sazí zvyšuje viskozitu a zanáší mazací systém, nárůst obsahu indikuje nesprávné spalování nebo nevhodný interval výměny oleje
1740	vysokotlaké přísady	pokles absorbance	převodové oleje, sloučeniny Cl a S, při poklesu možnost snížení únosnosti olejového filmu – opotřebení
1740– 1710	modifikátory viskozity	pokles absorbance	změna viskozity oleje, snížení stříhové stability polymerních sloučenin
1730– 1700	termická oxidace	nárůst absorbance	vznik karbonylu $=\text{C}=\text{O}$ je spojen se zvýšeným termicko-oxidačním namáháním oleje
1630– 1600	nitrace	nárůst absorbance	degradace oleje, snížení účinnosti antioxydačních aditiv, profuk spalných plynů do klikové skříně motoru
1180– 1120	sulfatace	nárůst absorbance	oxidace aditiv obsahujících síru, degradace oleje, snížení alkalické rezervy oleje, průnik spalin do klik skříně motoru
1080, 1040	chladicí směs (glykol)	nárůst absorbance	průnik chladicí kapaliny do mazací náplně
1050– 960	proti otěrové přísady	pokles absorbance	vyčerpání protiotěrových přísad typu ZnDDP (diethyldithiofosfát zinečnatý), možnost vzniku zvýšeného opotřebení
1000	vysokoteplotní antioxidanty	pokles absorbance	snížení obsahu sirných sloučenin omezujících vysokoteplotní oxidaci
990– 950	proti otěrové přísady	pokles absorbance	vyčerpání protiotěrových přísad TCP (trikresylfosfáty), možnost vzniku zvýšeného opotřebení
800 – 750	palivo	nárůst absorbance	průnik paliva do olejové náplně, nesprávná činnost palivového systému, zvýšené opotřebení motoru

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Technické údaje o vozidlech

Fiat Brava 1,4 12V

Osobní rodinný automobil nižší střední třídy. Jedná se o řadový čtyřválec.

Technické údaje vozidla:

Motor:

Zdvihový objem 1 370 ccm

Počet válců: 4

Max. výkon: 59 kW při 6 000 ot/min

Max. rychlost: 170 km/h

Velikost olejové náplně: 4,1 l

Interval výměny oleje: 15 000 km

Druhy použitých motorových olejů:

Divinol 10W-40

- jedná se o částečně syntetický vysokovýkonný víceúrovňový olej moderní technologie, který díky použití speciálních hydrokrakovacích rafinátů a vybraných aditiv snižuje tvorbu usazenin a zabraňuje tvorbě kalů v motoru. Motorový olej pro všechny benzínové a naftové motory s turbodmychadlem i bez něj.

Výměna olejové náplně byla provedena při 142 778 km.

77 Motor Oil SM 5W-40

- jedná se o plně-syntetický motorový olej vyrobený z nejkvalitnějších syntetických základových olejů obohacených

nejpokrokovější aktivační technologií.

Olej je určen prakticky pro všechny osobní vozidla a dodávky s benzínovým, dieselovým a LPG motorem.

Výměna olejové náplně byla provedena při 148 610 km.



Obr. 7: Fiat Brava 1,4 12V [vlastní foto]

Ostatní údaje:

Rok výroby: 1998

Rozměry karosérie: 4187x 741x1420 mm

Pohotovostní hmotnost: 1 040 kg

Celková hmotnost: 1 570 kg

Rozvor náprav: 2 540 mm

Rozchod kol vpředu: 1 461 mm

Rozchod kol vzadu: 1 463 mm

Tab.2: Olejová náplň Divinol 10W-40

Číslo vzorku	Datum odběru	Počet kilometrů na olej	Celkový počet kilometrů vozidla
1	11. 12. 2010	2 678	145 456
2	13. 2. 2011	5 174	147 952
3	2. 3. 2011	5 822	148 600

Tab. 3: Olejová náplň 77 Motor Oil SM 5W-40

Číslo vzorku	Datum odběru	Počet kilometrů na olej	Celkový počet kilometrů vozidla
1	3. 3. 2011	0	148 610
2	3. 3. 2011	8,5	148 618
3	14. 3. 2011	482	149 092
4	25. 3. 2011	1 013	149 623
5	10. 4. 2011	1 499	150 109
6	20. 4. 2011	2 030	150 640
7	4. 5. 2011	2 515	151 125

Škoda Fabia 1,2 HTP 47 kW

Osobní automobil typu hatchback obsahující zážehový tříválec se zdvihovým objemem 1198 ccm.

Výměna olejové náplně byla provedena při 94 936 km.

Technické údaje vozidla:

Motor:

Zdvihový objem 1198 ccm

Počet válců: 3

Max. výkon: 47 kW při 5400 ot/min

Max. rychlost: 160 km/h

Zrychlení z 0 na 100 km/h: 16,3 s

Interval výměny oleje: 15 000 km



Obr. 8: Škoda Fabia 1,2 HTP 47 kW
[vlastní foto]

Druh použitého motorového oleje:

ABX QUALITY 5W-40

Plně syntetický motorový olej vhodný pro benzínové, LPG a dieselové motory. Tento olej obsahuje speciální přísady, které chrání olej a motorové části před tvorbou kalů a usazenin. Při studených startech zajišťuje rychlé vytvoření stálého olejového filmu.

Ostatní údaje:

Rok výroby: 2006

Rozměry karosérie: 4232x1646 x1465 mm

Pohotovostní hmotnost: 1 095 kg

Celková hmotnost: 1 610 kg

Rozvor náprav: 2 462 mm

Rozchod kol vpředu: 1 419 mm

Rozchod kol vzadu: 1 408 mm

Tab. 4: Olejová náplň ABX QUALITY 5W-40

Číslo vzorku	Datum odběru	Počet kilometrů na olej	Celkový počet kilometrů vozidla
1	30. 12. 2010	0	98 008
2	30. 12. 2010	3 072	98 008
3	20. 2. 2011	5 356	100 292
4	11. 4. 2011	7 358	102 294

Peugeot 307 SW 2.0

Technické údaje vozidla:

Motor:

Zdvihový objem 1 997 ccm

Počet válců: 4

Max. výkon: 79 kW při 4000 ot/min

Max. rychlost: 183km/h

Zrychlení z 0 na 100 km/h: 12,7 s

Velikost olejové náplně v motoru: 4,5 l

Interval výměny oleje: 15 000 km

Druh použitého motorového oleje:

Mobil XHP LE 10W-40

vysoce výkonný olej určený pro mazání moderních vznětových motorů, používaných u vozidel pro náročný silniční provoz. Používá se pro zařízení evropských výrobců poháněná nepřepřehnanými i přeplňovanými vznětovými motory, které jsou vybaveny částicovými filtry DPF (Diesel Particular Filter).

Výměna olejové náplně byla provedena při 105 700 km.



Obr. 9: Peugeot 307 SW 2.0 [vlastní foto]

Ostatní údaje:

Rok výroby: 2002

Rozměry karosérie: 4419x1757x1544 mm

Celková hmotnost: 2 016 kg

Rozvor náprav: 2 708 mm

Rozchod kol vpředu: 1 505 mm

Rozchod kol vzadu: 1 510 mm

Tab. 5: Olejová náplň Mobil XHP LE 10W-40

Číslo vzorku	Datum odběru	Počet kilometrů na olej	Celkový počet kilometrů vozidla
1	14. 4. 2011	0	110 954
2	7. 11. 2010	5 254	110 954
3	21. 12. 2010	11 435	117 135
4	16. 1. 2011	14 438	120 138
5	11. 4. 2011	19 331	125 031
6	1. 5. 2011	20 633	126 333

Škoda Fabia 1,2 40 kW

Technické údaje vozidla:

Motor:

Zdvihový objem 1 198ccm

Počet válců: 3

Max. výkon: 40kW při 4750 ot/min

Max. rychlost: 151 km/h

Zrychlení z 0 na 100 km/h: 18,5 s

Interval výměny oleje: 15 000 km

Druh použitého motorového oleje:**Mobil 5W-40**

plně syntetický olej pro osobní automobily.
Tento olej poskytuje ochranu proti
opotřebení, ochranu motoru při vysokých a
nízkých teplotách.

Výměna olejové náplně byla provedena při
249 820 km.



Obr. 10: Škoda Fabia 1,2 40 kW
[vlastní foto]

Ostatní údaje:

Rok výroby: 2003

Rozměry karosérie: 3960x1646x1451 mm

Pohotovostní hmotnost: 1 055 kg

Celková hmotnost: 1 570 kg

Rozvor náprav: 2 462 mm

Rozchod kol vpředu: 1 419 mm

Rozchod kol vzadu: 1 408 mm

Tab. 6: Olejová náplň Mobil 5W-40

Číslo vzorku	Datum odběru	Počet kilometrů na olej	Celkový počet kilometrů vozidla
1	26. 2. 2011	3 480	253 300
2	19. 3. 2011	5 116	254 936
3	5. 5. 2011	8 764	258 584

Volkswagen Caddy 2,0 SDI

Volkswagen Caddy je lehké nákladní vozidlo se 4 válcovým řadovým motorem.

Technické údaje vozidla:

Motor:

Zdvihový objem: 1 968 ccm

Počet válců: 4

Max. výkon: 51 kW při 4 200 ot/min

Max. rychlost: 142 km/h

Počet míst k sezení: 5

Interval výměny oleje: 15 000 km

Druh použitého motorového oleje:

Castrol Magnatec 5W-40

- jedná se o syntetický olej, který byl vyvinut pro moderní motory tak, aby zajišťoval jejich spolehlivou ochranu. Specifickou vlastností oleje je spolehlivá ochrana funkčních ploch při studených startech a vysokých teplotách.

První výměna olejové náplně byla provedena při 198 500 km.

Druhá výměna olejové náplně byla provedena při 213 205 km.



Obr. 11: Volkswagen Caddy 2.0 SDI
[vlastní foto]

Ostatní údaje:

Rok výroby: 2005

Rozměry karosérie: 4405x2062x1833 mm

Celková hmotnost: 2 035 kg

Rozvor náprav: 2 682 mm

Rozchod kol vpředu: 1 537 mm

Rozchod kol vzadu: 1 531 mm

Tab. 7: První výměna olejové náplně: Castrol Magnatec 5W-40

Číslo vzorku	Datum odběru	Počet kilometrů na olej	Celkový počet kilometrů vozidla
1	15. 11. 2010	0	200 500
2	15. 11. 2010	2 000	200 500
3	10. 12. 2010	5 000	203 500
4	31. 12. 2010	12 500	211 024

Tab. 8: Druhá výměna olejové náplně: Castrol Magnatec 5W-40

Číslo vzorku	Datum odběru	Počet kilometrů na olej	Celkový počet kilometrů vozidla
1	12. 2. 2011	2 805	216 060
2	4. 3. 2011	6 005	219 210
3	20. 3. 2011	7 856	221 061
4	11. 4. 2011	10 022	223 227

Škoda Octavia Tour Trumf Combi 1,9 TDI PD

Technické údaje vozidla:

Motor:

Zdvihový objem 1 896 ccm

Počet válců: 4

Max. výkon: 74 kW při 4 000 ot/min

Max. rychlost: 189 km/h

Zrychlení z 0 na 100 km/h: 11,8 s

Druh použitého motorového oleje:

Shell Helix Ultra Extra 5W-30

Plně syntetický, lehkoběžný motorový olej pro benzínové a naftové motory osobních a lehkých užitkových vozidel. Obsahuje speciální čisticí aditiva, která zajišťují maximální čistotu motoru a odstraňují i dlouhodobě usazené škodlivé nečistoty a úsady. Olej je určen pro moderní benzínové a naftové motory osobních vozidel a lehkých užitkových vozidel, kde je možno používat motorový olej na prodloužený výměnný interval.

Výměna olejové náplně byla provedena při 89 800 km a plánovaná výměna při 120 000 km.



Obr. 12: Škoda Octavia Tour Trumf Combi 1,9 TDI PD [vlastní foto]

Ostatní údaje:

Rok výroby: 2008

Rozměry karosérie: 4572x1769x1468 mm

Pohotovostní hmotnost: 1 360 kg

Celková hmotnost: 1 820 kg

Rozvor náprav: 2 578 mm

Rozchod kol vpředu: 1 541 mm

Rozchod kol vzadu: 1 514 mm

Tab. 9: Olejová náplň Shell Helix Ultra Extra 5W-40

Číslo vzorku	Datum odběru	Počet kilometrů na olej	Celkový počet kilometrů vozidla
1	4. 2. 2011	2 735	92 534
2	2. 3. 2011	6 800	96 600
3	14. 4. 2011	12 871	102 671
4	5. 5. 2011	16 372	106 172

3.2 Metodika analýz a experimentální podmínky

Odběr vzorků oleju

Při odběru vzorků oleje z mazací soustavy motoru či jiné tribologické soustavy je nutné dodržovat definované podmínky, aby při pravidelných analýzách technického stavu stroje byly výsledky měření reprodukovatelné. Odebraný vzorek oleje musí být reprezentativní, tzn. částice ve vzorku oleje mají shodné parametry částic (distribuční funkce velikostí, procentuální zastoupení, tvarové znaky atd.) jako celý objem mazací soustavy zařízení.

Při činnosti třecích dvojic v soustavě dochází ke tvorbě částic otěrových kovů a jejich koncentrace v kapalině by měla neustále narůstat. Avšak současně s tvorbou částic dochází také k jejich ztrátám (netěsnosti, průnik oleje do spalovacího prostoru, sedimentace částic, filtrace, oxidace, působením chemických reakcí apod.). Rozměrné částice opotřebení jsou při průchodu zónou valivého kontaktu ve valivých ložiscích nebo mezi zuby ozubených kol rozděleny na několik menších částí. Naopak povrchová aktivita nově vzniklých drobných částic je příčinou jejich shlukování do větších seskupení nebo dochází ke tvorbě stabilních útvarů s malým poměrem povrchové energie k objemu hmoty. Po určité době vytvoří mechanismy tvorby a zániku částic dynamickou rovnováhu a vzorky oleje by měly být brány až po době dosažení rovnováhy.

Při odběru vzorků musejí být dodržena následující pravidla:

- vzorky musejí být odebírány vždy ze stejného místa olejové soustavy motoru z důvodu odlišné koncentrace částic v různých místech mazací soustavy,
- jsou-li vzorky odebírány za chodu systému, je nutné zabezpečit, aby odběr byl vždy za stejného provozního režimu.
- jsou-li vzorky odebírány po zastavení stroje, je nutné brát v úvahu v jakém místě je vzorek odebírán a jaká je rychlost sedimentace částic po ukončení proudění oleje v soustavě.

Odběrné nádoby (nejlépe skleněné) slouží pro transport a uchování vzorků. Pro účely analýz oleju je dostačující objem odebraného vzorku 60–100 ml. Odběrná nádoba musí umožnit dobrou homogenizaci vzorku (nejsou proto vhodné plastové nádoby, které nelze zahřívát na potřebné teploty a na jejichž stěnách se částice mohou adsorbovat. Odběrné nádoby se doporučuje používat vždy na jedno použití a poté zlikvidovat (zbytky otěrových kovů usazené v mikrotrhlinách a nerovnostech by mohly znehodnotit následující měření).

Před provedením analýz oleju musí být vzorek nejdříve homogenizován, protože za dobu uplynulou mezi jeho odběrem a analýzou již mohlo dojít k částečné nebo úplné sedimentaci

částic na stěny nebo dno odběrné nádoby. Vzorek pro ferrografickou analýzu je vhodné ohřát na teplotu přibližně 65–70 °C a poté intenzivně protřepávat po dobu 3–5 minut [21]. Pro analýzu na SpectroLNF Q200 je v Příručce operátora [16] doporučeno intenzivní protřepávání minimálně po dobu 30 s při teplotě cca 25 °C a následné odplynění v ultrazvukové lázni.

3.2.1 Analýza částic laserovým analyzátozem

Pro analýzu olejů byl použit laserový analyzátor částic LaserNet Fines – Q200 dodaný společností SPECTRO CZ Ostrava. Vzorky olejů byly před vlastním měřením homogenizovány ručním protřepáváním po dobu 2 minut. Pro odstranění bublin vzduchu ze vzorků byla použita ultrazvuková lázeň (4 minuty). Pracoviště LNF analýzy je dokumentováno na obr. 13.

Postup měření:

- 1) Před vlastním měřením je nutné zajistit dostatečnou homogenizaci vzorků olejů, aby se zajistilo rovnoměrné rozptýlení sedimentovaných částic v oleji.
- 2) Po homogenizaci oleje se odstraní vzduchové bubliny, které vznikly mícháním, pomocí ultrazvukové lázně.
- 3) V menu měřicího softwaru se zapíše parametry měřeného vozidla, typ oleje, proběh oleje, vybere se druh měřeného oleje (hydraulický nebo motorový), popř. norma, podle které bude měření realizováno.
- 4) Průtoková měřicí cela se propláchne novým olejem. Olej je nasáván ze vzorkovnice pomocí nástavce s trubičkou.
- 5) Do odsávacího nástavce se umístí měřený vzorek oleje a spustí se vlastní měření.
- 6) Po ukončení měření software přístroje automaticky vyhodnotí počet a tvar zaznamenaných částic. Otěrové částice jsou rozděleny do kategorií podle druhu opotřebení, dále jsou identifikovány bubliny vzduchu, kapky vody a vlákna. Vzduchové bubliny a kapky vody jsou z měření vyloučeny.
- 7) Vstupní filtr přístroje byl pravidelně resp. podle potřeby vymýván v rozpouštědle. Zachycené částice (tj. částice s největším rozměrem $> 100 \mu\text{m}$) byly dokumentovány digitálním mikroskopem s USB připojením (obr. 14).



Obr. 13a: Pracoviště LNF analýzy [vlastní foto]



Obr. 13b: Ultrazvuková lázeň pro odplynění vzorků
[vlastní foto]



Obr. 14: Digitální mikroskop s USB
připojením [vlastní foto]

3.2.2 Analytická ferrografie

Pro ferrografickou analýzu byl použit ferrograf REO-1 (REO Trade, s.r.o., Opava). Zhotovené ferrogramy byly vyhodnoceny na bichromatickém trinokulárním mikroskopu H 6000 (Intraco Micro, s. r. o., Tachlovice).

Přístrojové vybavení:

- **ferrograf REO 1**

Ferrograf REO 1 (obr. 15a) umožňuje zachytit částice na plastové podložce. Provozní teplota okolí: 18–30 °C. Doba jednoho měření se pohybuje v rozmezí 15–20 min.

- **kamera Micrometrics 318CU**

Kamera typu CMOS 3 × 8 bitu, nepřetržitý nekomprimovaný automatický video výstup, 10-bitový AD převodník, dynamický rozsah 61 dB. Kamera snímá barevný obraz o rozlišení 2048 x 1536 (velikost 1 obrazového bodu je 3.2 x 3.2 μm). Připojení k PC přes USB 2.0 [27].

- **mikroskop H 6000**

Mikroskop umožňuje používat zvětšení objektivu 4×, 10×, 25×, 40× a zvětšení okuláru 10×. Jedná se o bichromatický mikroskop se zeleným filtrem pro spodní osvětlení a červeným filtrem pro svrchní osvětlení.

Postup přípravy ferrogramu a jeho pozorování na světelném mikroskopu

- 1) Ferrograf je opatřen nástavcem, který je umístěn v nehomogenním magnetickém poli. V nástavci jsou vodící drážky o malém sklonu, do kterých se zasune plastová fólie. Pro odvod maziva z podložky je určena šikmo seříznutá hadička.
- 2) Vzorek oleje se ve vzorkovnici ohřeje na teplotu 65–70 °C. Vhodným promícháním po dobu cca 2 min. dojde k homogenizaci vzorku.
- 3) Do injekční stříkačky se nasaje přibližně 3 ml oleje, aby bylo možné upevnit injekční stříkačku do držáku s automatickým posuvem. Některé vzorky motorového oleje je třeba naředit technickým benzínem, aby bylo dosaženo optimální viskozity.
- 4) Olej v injekční stříkačce se spolu s nasazenou šikmo seříznutou kovovou trubičkou zasune do držáku v zadní části přístroje. Kovová trubička se nastaví přibližně 0,5 mm nad povrch fólie, aby mohl olej rovnoměrně vytékat. Rovnoměrné vytlačování vzorku oleje

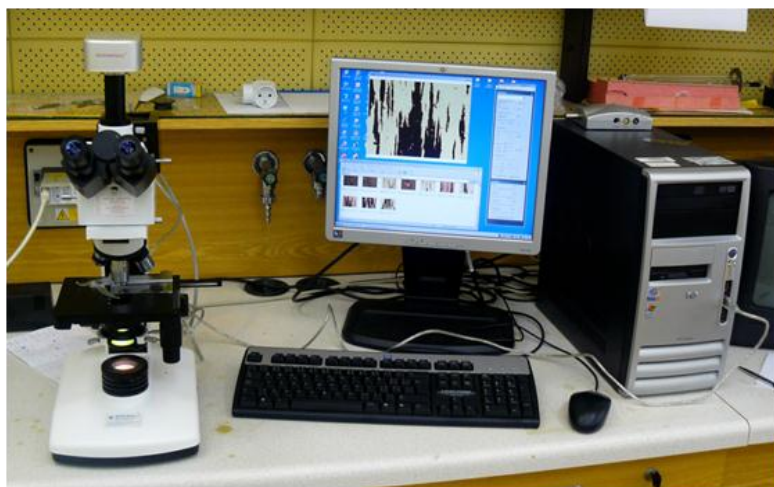
je uskutečněno pomocí posuvného ramene a olej stéká na konec podložky, kde je odváděn pomocí odtokové trubičky.

- 5) Po nanesení vzorku oleje se injekční stříkačka vyjme a naplní technickým benzínem. Podložka se proplachuje technickým benzínem 3 až 5krát tak, aby byly z ferrogramu odstraněny zbytky oleje.
- 6) Po vyjmutí z přístroje a vysušení se ferrogram podrobí mikroskopické analýze.

V případě slabé stopy se vzorek oleje nanese vícekrát nebo se prodlouží doba chodu autoposuvu ze 4 na 8 minut. Při výskytu velkého počtu otěrových částic se vzorek oleje ředí ve vhodném poměru technickým benzínem.

Bichromatickýtrinokulární mikroskop H 6000 (obr. 15c) je vybaven červeným filtrem pro reflexní osvětlení a zeleným filtrem pro transmitantní osvětlení. Na mikroskop je pomocí optického tubusu upevněna kamera Mikrometrics 318CU, která je propojena přes USB rozhraní s počítačem. Pomocí této sestavy je možné detailně studovat jednotlivé ferrogramy s možností přímého snímkování částic zachycených na ferrogramu. Nalezené částice je možné vyhodnotit porovnáním s atlasy otěrových částic, případně použít software pro obrazovou analýzu.

Pro určení měřítka zobrazení na mikrofotografiích se jako délkový standard používá objektivový mikrometr (podložního sklíčko s mikrometrickou stupnicí, úsečka o délce 1 mm je rozdělena na 100 dílků, tj. 1 dílek ~ 10 μm).



*Obr. 15: Pracoviště analytické
Ferrografie
[vlastní foto]*

a – Ferrograf REO-1

*b – Pomůcky pro přípravu
ferrogramů*

*c – Ferrografické pracoviště
(bichromatický mikroskop
s kamerou připojenou na
PC)*

3.2.3 Infračervená spektrometrie

Pro analýzu vzorků motorových olejů byl použit spektrometr s Fourierovou transformací prostřední infračervenou oblast Vector 22 (Bruker, G. m. b. H.) s horizontálním ATR nástavcem (krystal ZnSe ve vaničkovém uspořádání) – obr. 16.

Nastavení: spektrální rozsah $600 - 4000 \text{ cm}^{-1}$, rozlišení 4 cm^{-1} , počet skenů:32



Obr. 16: FTIR spektrometr Vector 22 s HATR-jednotkou [vlastní foto]

Postup měření FTIR spekter:

- 1) Před začátkem měření spekter dochází ke stabilizaci zdroje záření po dobu cca 10–15 min. V menu softwaru určeného pro ovládání spektrometru je nutné vybrat požadovanou metodu měření (automaticky se nastaví další potřebné parametry). Při vlastním měření je vzorek oleje nanesen na krystal ZnSe uložený v nástavci horizontální ATR jednotky.
- 2) ZnSe krystal musí být dokonale očištěný (propláchnutí n-hexanem C_6H_{14} a očištění vhodným měkkým materiálem). Před každým měřením se doporučuje změřit pozadí, aby byl vyloučen vliv nečistot a případné kontaminace povrchu krystalu na měřená spektra vzorku.
- 3) Po změření pozadí se nástavec s krystalem vyjme z komory spektrometru a teflonovou špachtlí se na něj nanese slabá vrstva vzorku oleje. Vzorek oleje musí být dostatečně homogenizován a musí být rovnoměrně nanesen na celou plochu krystalu (bez vzduchových bublinek).

- 4) Krystal s naneseným vzorkem se vrátí zpět do komory a provede se měření spekter v programu OPUS. Naměřené spektrum se po skončení měření a proběhnutí matematických transformací zobrazí na monitoru počítače.
- 5) Před dalším měřením je třeba krystal důkladně vyčistit. Olej se setře pomocí papírové vaty. Následně se pak povrch krystalu omyje n-hexanem (C_6H_{14}), tak aby povrch krystalu byl čistý a nezůstaly na něm nečistoty z předešlého vzorku. Z vyčištěného povrchu krystalu se nechá v digestoři odpařit zbylý n-hexan, aby se vyloučil vliv na průběh spekter dalšího vzorku.

3.3 Výsledky experimentálních prací

Experimentální část práce byla zaměřena na analýzu částic ve vzorcích motorových olejů, odebraných z šesti sledovaných vozidel. Vzhledem k tomu, že v listopadu 2010 byl do provozu uveden nově zakoupený laserový analyzátor částic SpectroLNF Q200 (Lockheed Martin – Spectro Inc.), bylo součástí úvodních experimentů ověřování správnosti měření (kontrola správnosti stanovení dynamické viskozity, ověření správnosti určení velikosti částic a kontrola částic zachycených na vstupním filtru o velikosti ok 100 μm); byly formulovány zjištěné problémy a nejasnosti, které jsou v současné době řešeny s dodavatelskou firmou SPECTRO CS Ostrava. Výsledky vstupních experimentálních prací jsou dokumentovány v úvodu kap. 3.3.1.

Vzorky olejů analyzované na laserovém analyzátoru byly hodnoceny i klasickou ferrografickou metodou (kap. 3.3.2).

Schopnost oleje uspokojivě mazat pohyblivé součásti motoru a minimalizovat opotřebení třecích ploch, současně však také plnit i všechny další funkce popsané v kap. 2.2, závisí i na jeho chemickém složení. To je ovlivněno stupněm degradace a kontaminace oleje (v důsledku oxidačních reakcí a procesů vyvolaných dlouhodobým účinkem vysokých teplot, dále např. průnikem spalných plynů do oleje, rozpadem aditiv, kontaminací oleje vodou,

chladičí směsí nebo palivem). Proto byla částicová analýza doplněna aplikací FTIR spektrometrie, jejíž výsledky umožnily na základě znalosti provozních podmínek všech pěti sledovaných vozidel hodnotit provozní opotřebení motoru komplexně.

Podmínky měření na jednotlivých přístrojích a metodiky experimentů jsou popsány v kap. 2.4.

3.3.1 Výsledky analýzy částic na laserovém analyzátoru

Úvodní kontrolní měření viskozity

SpectroLNF Q200 je vybaven příslušenstvím pro měření dynamické viskozity olejů při referenční teplotě 40 °C. Je-li zadána hustota oleje, lze pak softwarově určit i kinematickou viskozitu při 40 °C. Měření dynamické viskozity proběhne v poslední části sekvence měření částic, výsledná hodnota se zobrazuje spolu s daty částic. Výrobce doporučuje udržovat teplotu pracovního prostředí v rozmezí 25 ± 5 °C a stabilizaci přístroje po zapnutí minimálně 20 minut; tyto podmínky byly při všech měřeních dodrženy. Rozsah měření: 15 až 258 mPa.s, nejistotu měření výrobce garantuje $< \pm 2$ %, opakovatelnost 1–2 % v celém rozsahu měření.

Jako příslušenství přístroje je dodáván standard viskozity N100 (84,19 mPa.s při 40 °C).

Vzhledem k tomu, že minimální počet částic k získání správných hodnot dynamické viskozity je 5000 částic/ml, připravuje se testovací vzorek smícháním standardního oleje N100 s testovacím (kalibračním) prachem.

Při přípravě kontrolního standardu pro ověření správnosti měření viskozity je nutno dodržet postup předepsaný výrobcem:

1. Přidat standardní olej do 3/4 odměrky.
2. Provést homogenizaci protřepáním směsi.
3. Vrátit homogenizovaný roztok zpět do zásobní lahve se standardním olejem.
4. Protřepáním zhomogenizovat roztok standardu a běžným postupem jej v ultrazvukové lázni odplynit.

Výsledek kontrolního stanovení dynamické viskozity: **84,41 mPa.s**

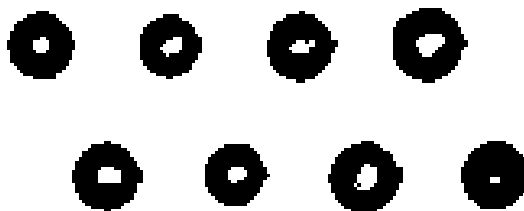
Hodnota uvedená v atestu pro 40 °C pro N100: **84,38 mPa.s**

Relativní chyba: 0,0356 %

Závěr: Stanovení viskozity na SpectroLNF Q200 poskytuje správné výsledky.

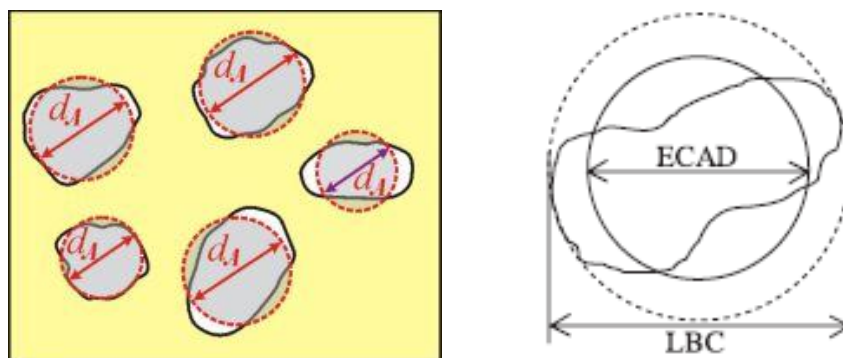
Úvodní ověření správnosti měření velikosti částic

Pro ověření správnosti měření velikosti částic byly do čistého (nepoužitého) motorového oleje PARAMO Trysk Super Turbo 15W-40 přidány skleněné mikrokuličky, které dodává ThermoScientific jako kalibrační a validační standard pro analyzátory částic. Byl použit standard č. 9050 (průměr kuliček $49,0 \mu\text{m} \pm 1,4\mu\text{m}$). Výsledky 10x opakované částicové analýzy vzorku suspenze kuliček v oleji potvrdilo správnost měření velikosti částic. Na obr. 17 je ilustrativně dokumentován záznam obrazu těchto mikrokuliček v okně Zobrazení částic na SpectroLNF Q200.



*Obr. 17: Zobrazení testovacích mikrokuliček
o průměru $49,0 \mu\text{m} \pm 1,4\mu\text{m}$*

V průběhu dalších měření běžných vzorků byl však zjištěn problém související se zobrazením zaznamenaných částic.

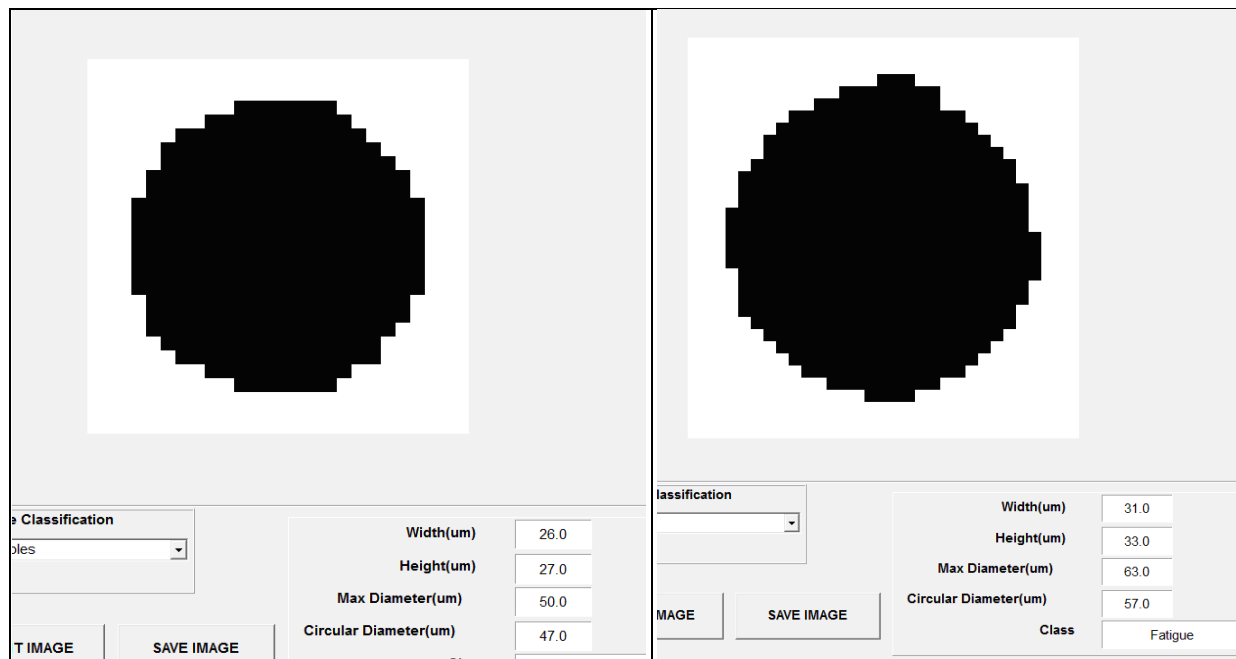


Obr. 18: Průměr ekvivalentního kruhu d_A , ECAD (schématické znázornění) – průměr kruhu, který má stejnou plochu jako objekt [40]

Jako základní charakteristika jednotlivých částic se kromě výšky a šířky částice uvádí její největší rozměr (MaxDiameter) a průměr ekvivalentního kruhu (CircularDiameter) – (obr. 18). U přibližně kruhových částic (příklad na obr. 19)

- ($\bar{s}=26\mu\text{m}$, $\bar{v}=27\mu\text{m}$) je vypočtený MaxDiameter = $50,0\mu\text{m}$, CircularDiameter $47,0\mu\text{m}$
- ($\bar{s}=31\mu\text{m}$, $\bar{v}=33\mu\text{m}$) je vypočtený MaxDiameter = $63,0\mu\text{m}$, CircularDiameter $57,0\mu\text{m}$.

U kruhových částic by se však všechny údaje měly přibližně shodovat, zde jsou však ve výstupech MaxDiameter a CircDimeter téměř dvojnásobky šířky a výšky částice. 50 resp. $63\mu\text{m}$ odpovídá spíše maximálnímu rozměru (úhlopříčce) bílého pole, v němž je částice zobrazena. V české i anglické příručce operátora jsou snímky obrazovky, na nichž jsou u přibližně kruhových částic všechny rozměrové údaje přibližně stejné (navíc v žádném výstupu z reálných měření není velikost částic uvedena s přesností na desetiny μm , ale pouze celým číslem (za desetinnou tečkou je v každém výstupu nula – na rozdíl od staršího modelu LNF-C, na němž byla provedena částicová analýza v rámci několika diplomových prací v r. 2010). Tento problém se týká všech výstupů zobrazení a měření velikostí kruhových částic.



Obr. 19: Snímky kruhových částic s údaji o jejich velikosti

Výše uvedené připomínky byly vzneseny na dodavatele, v době odevzdání práce jsou řešeny u výrobce.

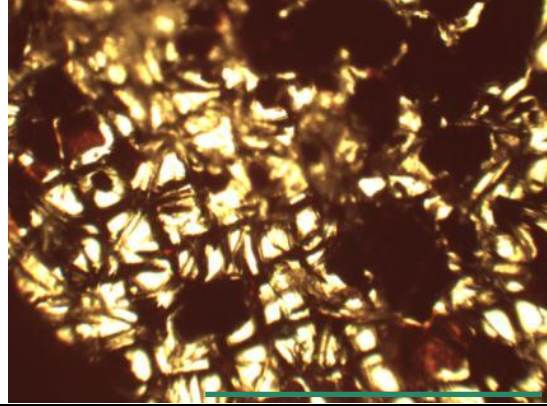
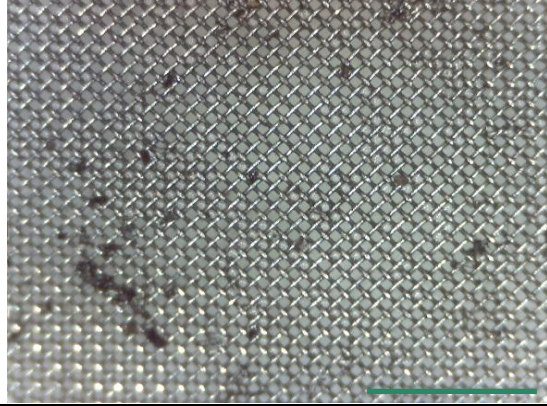
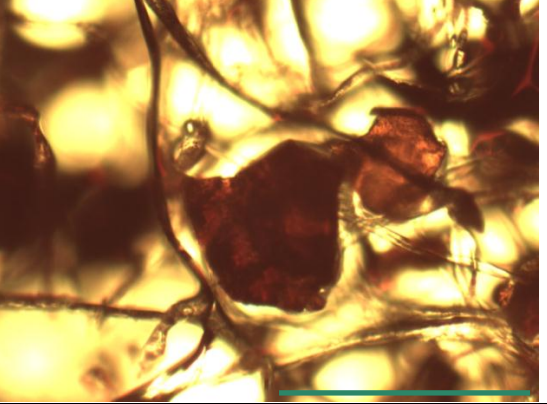
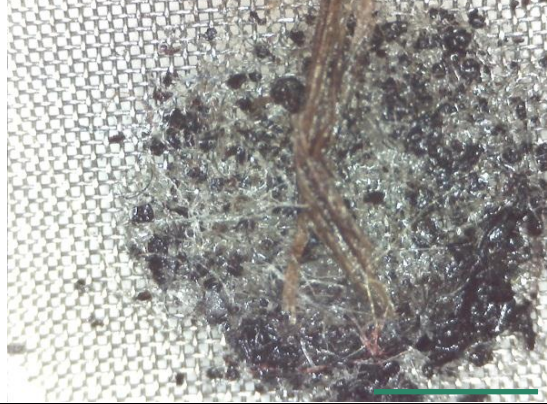
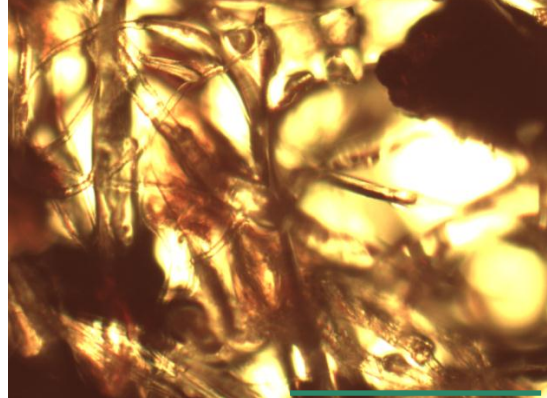
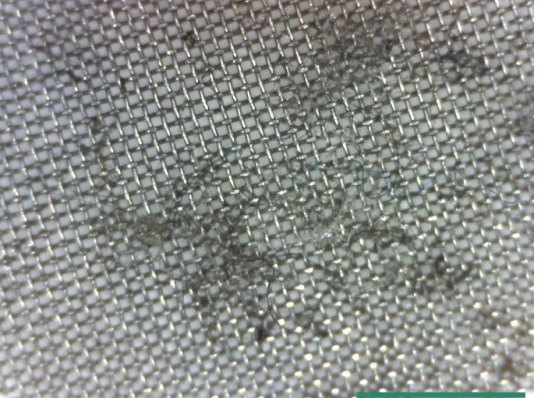
Kontrola částic zachycených na vstupním filtru

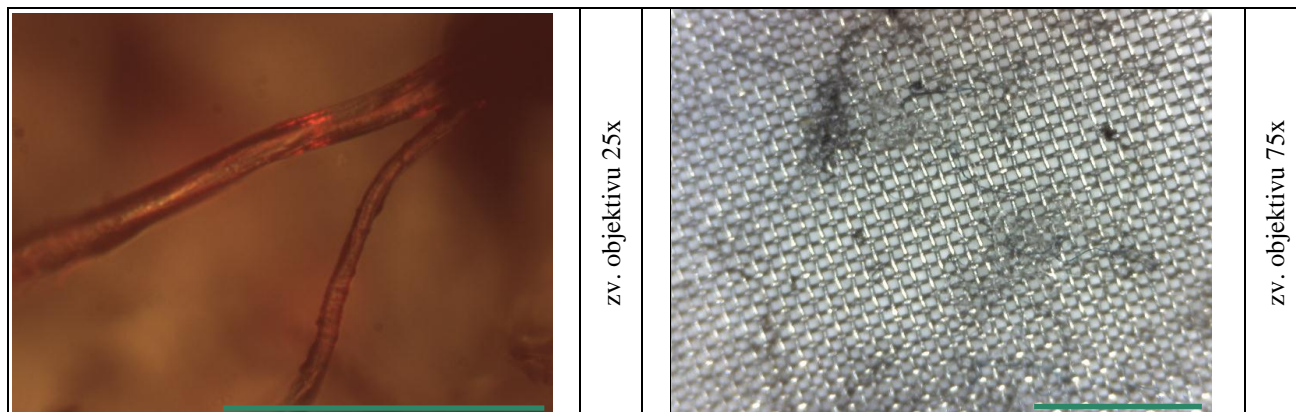
Na základě experimentálních prací, které byly součástí několika desítek bakalářských a diplomových prací vypracovaných na DFJP v období 2004–2010 [28-39]. Je možno konstatovat, že pro hodnocení procesu opotřebení motorů mají nezanedbatelný význam i částice, jejichž největší rozměr přesahuje 100 μm (tyto částice jsou z analyzovaného oleje zachytávány vstupním filtrem laserového analyzátoru, protože by mohly uvíznout v měřicí cele a zneprůchodnit ji).

Filtr byl proto pravidelně kontrolován a čištěn. Ve sledovaných olejích se „velké“ částice (nad 100 μm) vyskytovaly jen ojediněle (tab. 10); jejich vyloučení z procesu analýzy částic na SpectroLNF Q200 tedy nevnáší do výsledku hodnocení konkrétních vzorků, analyzovaných v rámci této práce, významnější chyby. Při analýze vzorků mimo tuto diplomovou práci bylo zjištěno, že zejména hydraulické oleje, které často obsahují vlákna a útržky těsnění, způsobují zanášení filtru a zadržování kovových částic. To pak ovlivňuje výsledek analýzy – snižuje se počet částic detekovaných analyzátozem.

Z výše uvedených důvodů je vhodné promývat filtr po každém měření (tato operace není časově náročná, demontáž, propláchnutí a montáž filtru netrvá déle než 2 minuty).

Tab. 10: Částice zachycené na vstupním filtru SpectroLNF Q200

Částicový filtr			
Optický mikroskop		Digitální mikroskop	
	zv. objektivu 4x		zv. objektivu 75x
	zv. objektivu 10x		zv. objektivu 75x
	zv. objektivu 10x		zv. objektivu 75x



Zvětšení objektivem	Délka úsečky ve snímku odpovídá
4x	1 000 μm
10x	300 μm
25x	150 μm
75x	2 mm

Hodnocení opakovatelnosti částicové analýzy

Podle ČSN ISO 3534-1 vyjadřuje opakovatelnost (repeatability) přesnost za podmínek, v nichž se navzájem nezávislé výsledky zkoušek získají opakovaným použitím téže zkušební metody na identickém materiálu v téže laboratoři, týměž pracovníkem, za použití týchž přístrojů a zařízení v krátkém časovém rozmezí.

Vzhledem k tomu, že SpectroLNF Q200 je nově pořízeným přístrojem a praktické zkušenosti byly dosud získány pouze na starším, dlouhodobě provozovaném modelu LNF-C, byla v rámci úvodních experimentů hodnocena i opakovatelnost metody (byl sledován počet částic a dynamická viskozita).

Byla hodnocena opakovatelnost při použití dvou odlišných postupů, analyzován byl jeden vybraný vzorek (Fabia 1,4 50 kW, motorový olej Castrol 5W-40):

1. V prvním případě byl vzorek protřepáváním homogenizován a odplyněn v ultrazvukové lázni pouze jednou – před první analýzou, po níž již bez homogenizace bezprostředně následovaly další analýzy.

Z výsledků v tab. 11 je zřejmé, že postupně docházelo k pomalé sedimentaci částic (pouze měření č. 4 bylo zatíženo náhodnou chybou, pravděpodobně v důsledku posunu nasávací hadičky po dně kádinky se vzorkem). Velké částice sedimentují

UNIVERZITA PARDUBICE Dopravní fakulta Jana Pernera	DIPLOMOVÁ PRÁCE	Strana - 45 -
---	-----------------	---------------

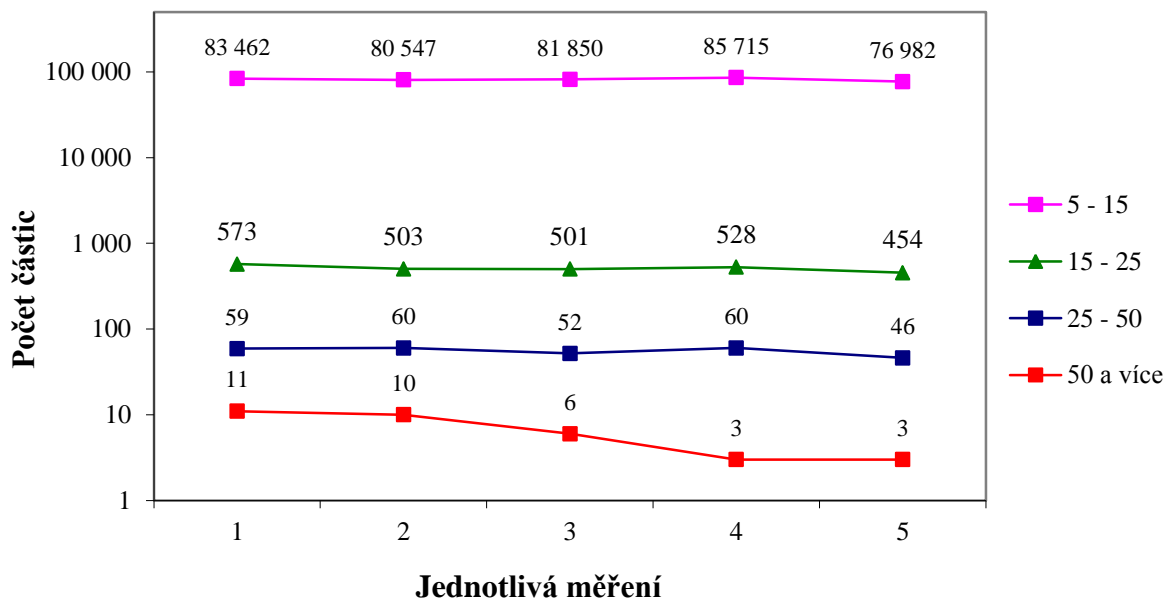
rychleji než malé.

Průměrná hodnota dynamické viskozity: 51,99 mPa.s, relativní chyba měření nepřesahuje 1,12 %.

Tab. 11: Výsledky hodnocení opakovatelnosti (s jednorázovou homogenizací před začátkem série analýz)

Číslo měření	Velikost částic (μm)				Dynamická viskozita (mPa.s)
	5 - 15	15 - 25	25 - 50	50 a více	
1	83 462	573	59	11	52,14
2	80 547	503	60	10	51,41
3	81 850	501	52	6	52,48
4	85 715	528	60	3	51,92
5	76 982	454	46	3	52,02

Počty částic					Dynamická viskozita (mPa.s)
Aritmetický průměr	81711,2	511,8	55,4	6,6	
Rozptyl	8567134,96	1508,56	31,04	11,44	0,12
Směrodatná odchylka	2926,97	38,84	5,57	3,38	0,35
Variační koeficient (%)	3,58	7,59	10,06	51,25	0,67



Obr.20: Měření bez průběžné homogenizace vzorku (v μm)

Tab. 12: Statistické vzorce

Aritmetický průměr	$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$	Směrodatná odchylka	$s_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{s_x^2}$
Rozptyl	$s_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$	Variační rozpětí	$v_x = \frac{s_x}{\bar{x}} \cdot 100 \%$

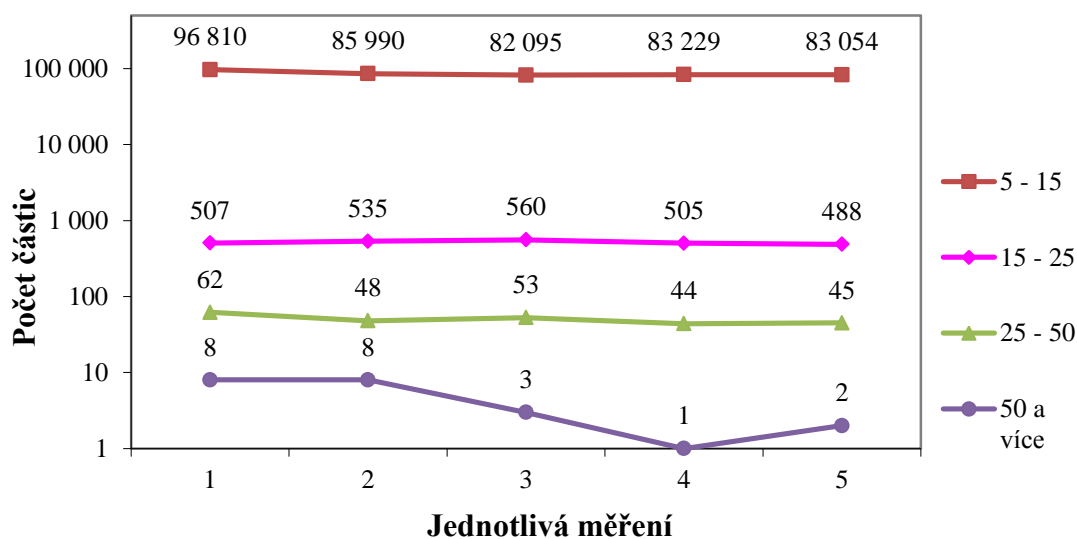
2. V druhém případě byl vzorek homogenizován protřepáním a odplyněn v ultrazvukové lázni stejně jako v předešlém případě. Po každé analýze byly homogenizace a odplynění opakovány. Sedimentace částic se neprojevila (tab. 13). Současně s analýzou částic byla měřena dynamická viskozita. Průměrná hodnota dynamické viskozity: 53,4mPa.s, relativní chyba měření nepřesahuje 1,44 %.

Výsledky obou souborů měření byly statisticky zpracovány – byly vypočteny základní statistické charakteristiky (aritmetický průměr, rozptyl a směrodatná odchylka).

Tab. 13: Výsledky hodnocení opakovatelnosti (s homogenizací před každým měřením)

Číslo měření	Velikost částic (μm)				Dynamická viskozita (mPa.s)
	5 - 15	15 - 25	25 - 50	50 a více	
1	96 810	507	62	8	53,04
2	85 990	535	48	8	53,31
3	82 095	560	53	3	52,85
4	83 229	505	44	1	54,20
5	83 054	488	45	2	53,64

Počty částic					Dynamická viskozita (mPa.s)
Aritmetický průměr	86235,6	519	50,4	4,4	53,41
Rozptyl	29637009,04	647,6	43,44	9,04	0,23
Směrodatná odchylka	5443,99	25,45	6,59	3,01	0,48
Variační koeficient (%)	6,31	4,90	13,08	68,33	0,89



Obr. 21: Měření s průběžnou homogenizací vzorku (v μm)

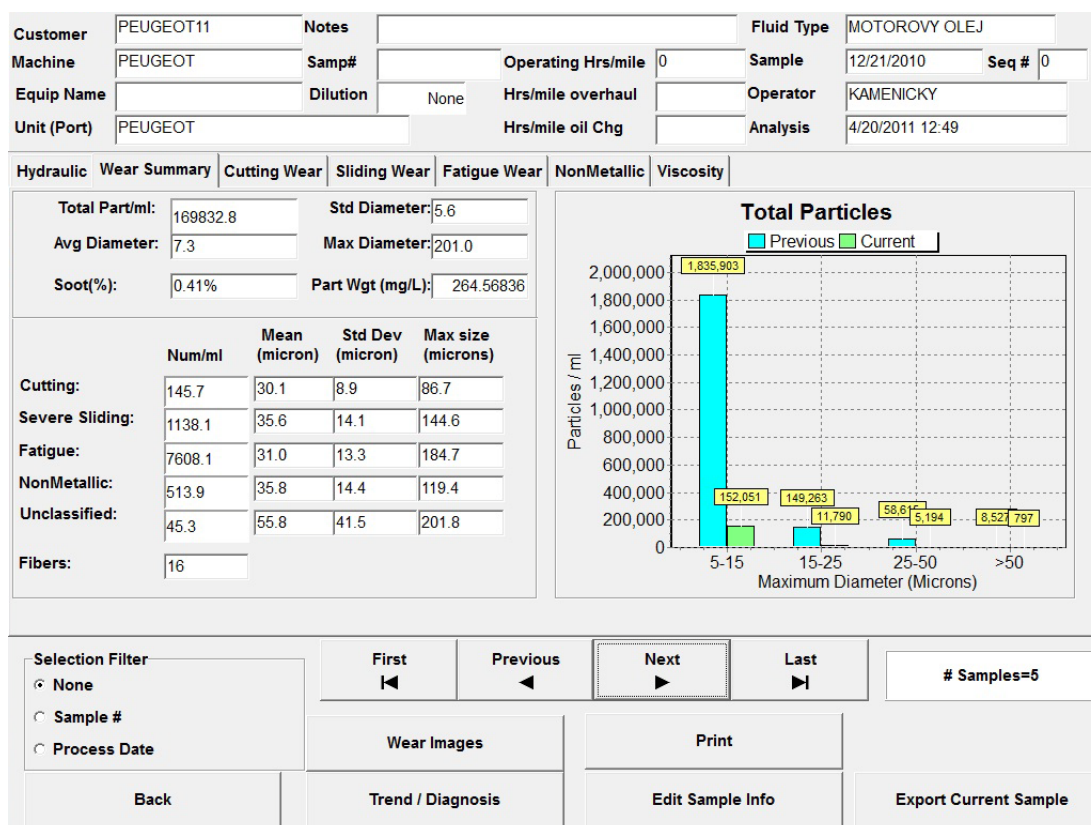
Statistické parametry (správnost, přesnost, reprodukovatelnost) jsou nejvíce ovlivněny nedokonalou homogenizací vzorku. Vzhledem k výrobcem předepsané vstupní teplotě vzorku ($25 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$) nelze provést homogenizaci při zvýšené teplotě (např. pro ferrografii je doporučována teplota min. $60 \text{ }^\circ\text{C}$). Bylo by vhodné ověřit, zda je čtyřminutové odplynění v ultrazvukové lázni postačující (při prodloužení doby působení ultrazvuku by však mohlo dojít k usazování částic). Poměrně málo reprodukovatelným vlivem je i působení rozpouštědla při promývání měřicího systému (jeho zbytky mohou významně snížit viskozitu následujícího vzorku, je proto nezbytné provést proplach systému vzorkem ještě před jeho měřením; to však významně zvyšuje spotřebu vzorku). Příliš tmavé vzorky (s vysokým obsahem sazí) je nutno ředit čistým olejem, což může rovněž být zdrojem chyb (zejména objemové odměřování vysoko-viskózních olejů).

Jak již bylo uvedeno v předchozí části této kapitoly, je nutno důsledně dbát na čištění vstupního filtru.

Částicová analýza odebraných vzorků olejů

V této části práce byly analyzovány vzorky motorových olejů odebraných v období listopad 2010 až květen 2011. Technické údaje o sledovaných vozidlech, o způsobu odběru vzorků (včetně časového harmonogramu a počtu kilometrů ujetých v jednotlivých časových obdobích mezi odběry) jsou uvedeny v kap. 3.1. V dalším textu jsou prezentovány výsledky a výstupy z vybraných analýz; vzhledem k velkému objemu experimentálních dat je další dokumentace uložena v elektronické formě na příloženém CD nosiči.

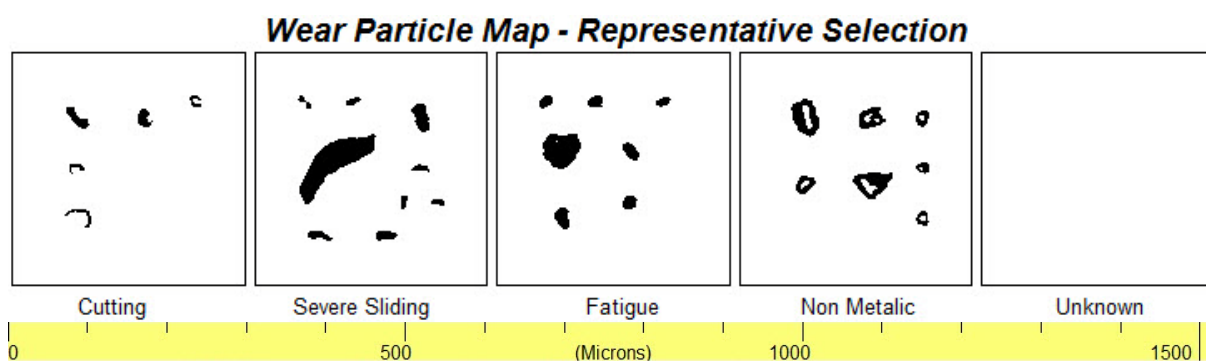
Příklad výstupu z laserového analyzátoru je uveden na obr. 22; výsledky ostatních měření jsou archivovány na HD řídicího PC SpectroLNF Q200 a lze je podle potřeby zobrazit ve stejné formě. Údaje o počtech částic a hodnoty viskozity jsou zpracovány v přehledných souhrnných grafech, k nimž jsou připojeny grafické výstupy trendů a obrazy reprezentativních částic obsažených v jednotlivých vzorcích (obr. 23 až 45).



Obr. 22: Příklad výstupu částicové analýzy vzorků odebraných z osobního automobilu Peugeot (modrý – odběr 7. 11. 2010, zelený – odběr 21. 12. 2010 po 6181 km, na olejovou náplň ujetu 11 435 km, k 21. 12. 2010 proběh vozidla celkem 117 135 km); motorový olej Mobil XHP LE 10W/40

Fiat Brava 1,4 - první výměna olejové náplně
(proběh vozidla celkem: 148 600 km, km na olej: 5 822)

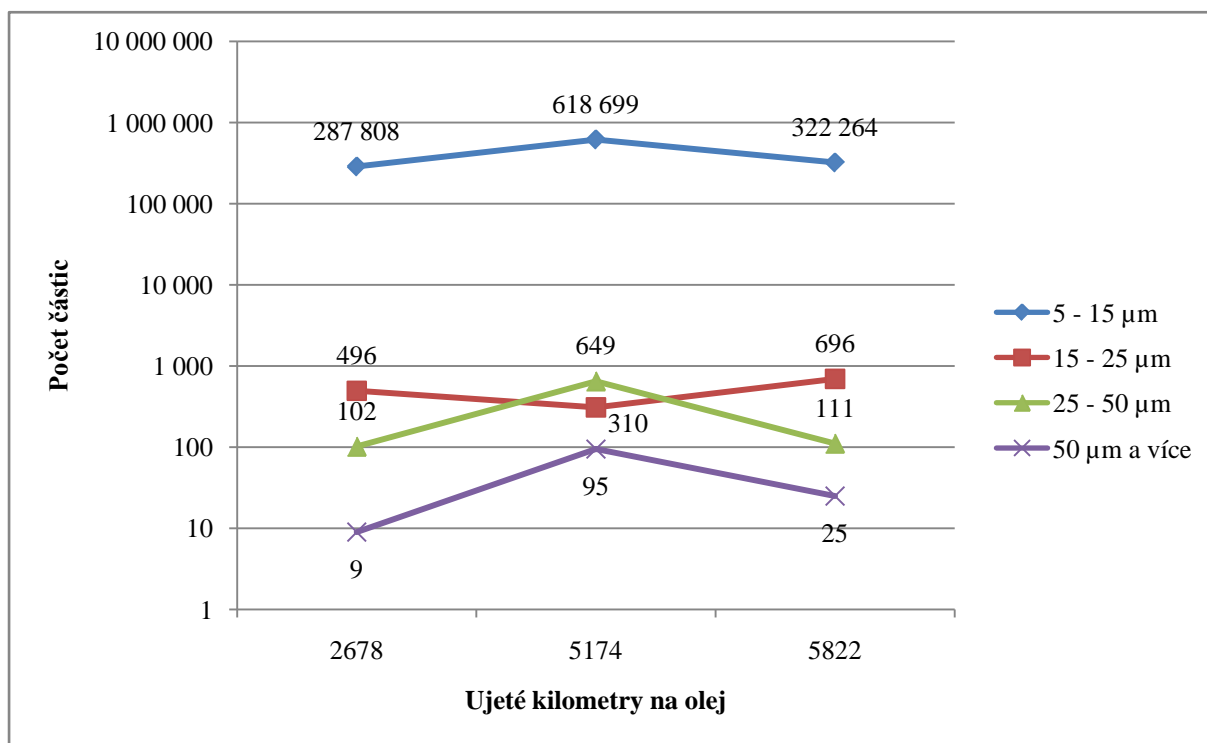
Obr. 23: Trend celkového počtu částic (Fiat Brava 1,4 – první výměna olejové náplně)



Obr. 24: Částice Fiat Brava 1,4 (vzorek po ujetí 5 822 km na olej)

Tab. 14: Počty částic (Fiat Brava 1,4) – první výměna olejové náplně

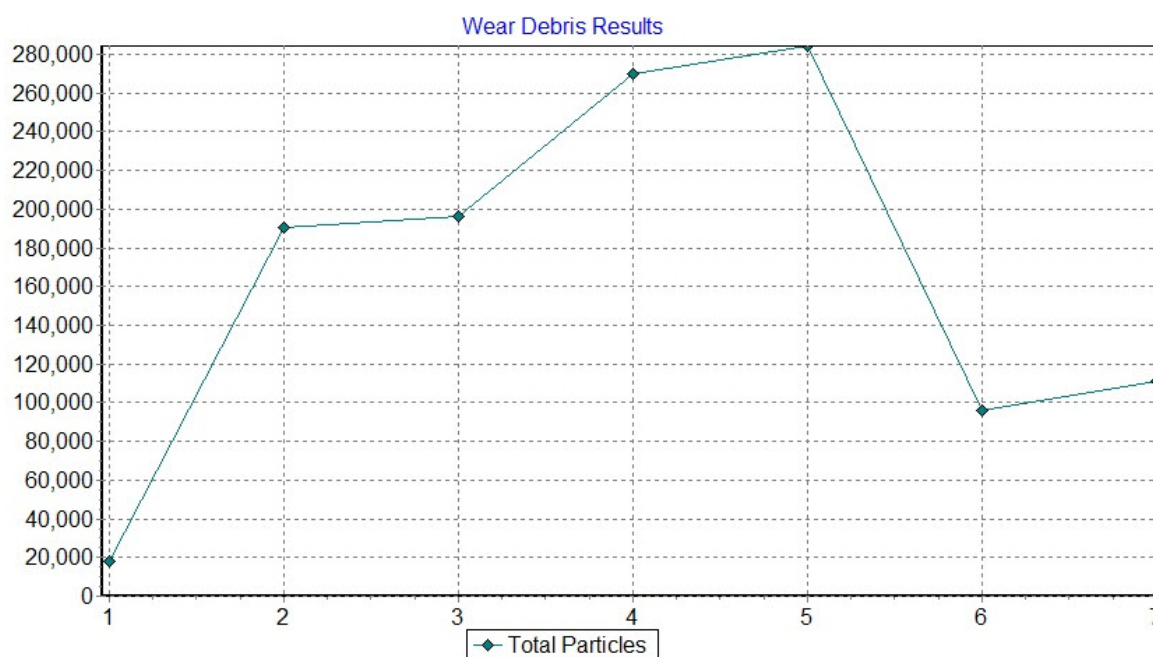
Číslo měření (kilometrů na olej)	Velikost částic (μm)			
	5 - 15	15 - 25	25 - 50	50 a více
1 (2 678 km) prosinec	287 808	496	102	9
2 (5 174 km) únor	618 699	310	649	95
3 (5 822 km) březen	322 264	696	111	25



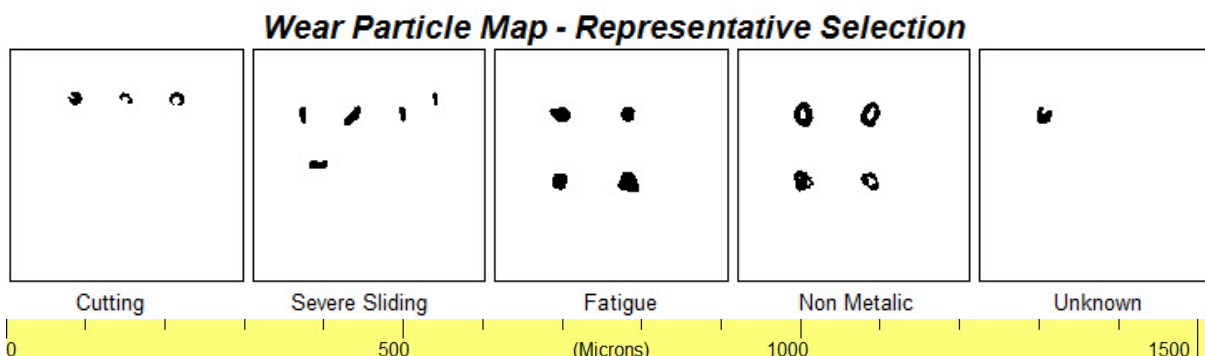
Obr. 25: Počet částic (Fiat Brava 1,4) – první výměna olejové náplně

Fiat Brava 1,4 - druhá výměna olejové náplně

(proběh vozidla celkem: 151 125 km, km na olej: 482)



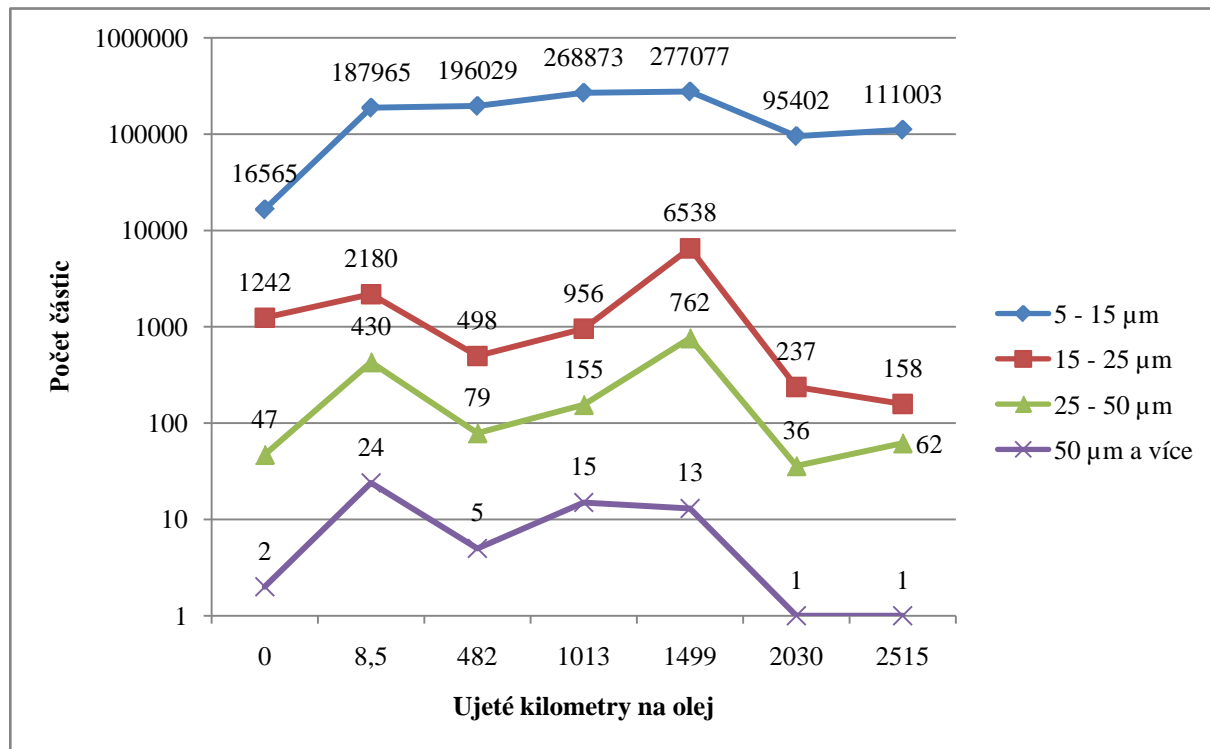
Obr. 26: Trend celkového počtu částic (Fiat Brava 1,4 – druhá výměna olejové náplně)



Obr. 27: Částice Fiat Brava 1.4 (vzorek po ujetí 482 km na olej)

Tab. 15: Počty částic (Fiat Brava 1,4) – druhá výměna olejové náplně

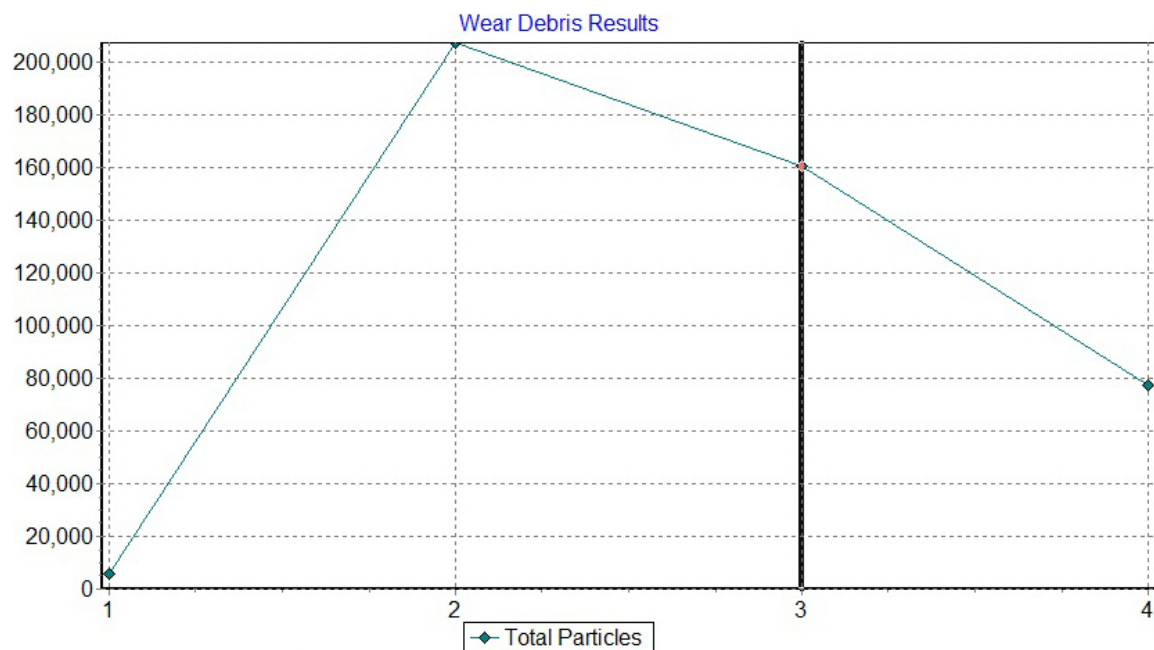
Číslo měření (kilometrů na olej)	Velikost částic (μm)			
	5 - 15	15 - 25	25 - 50	50 a více
1 (0 km) březen	16 565	1 247	47	2
2 (8,5 km) březen	187 965	2 180	430	24
3 (482 km) březen	196 029	498	79	5
4 (1 013 km) březen	268 873	956	155	15
5 (1 499 km) duben	277 077	6 538	762	13
6 (2 030 km) duben	95 402	237	36	1
7 (2 515 km) květen	111 003	158	62	1



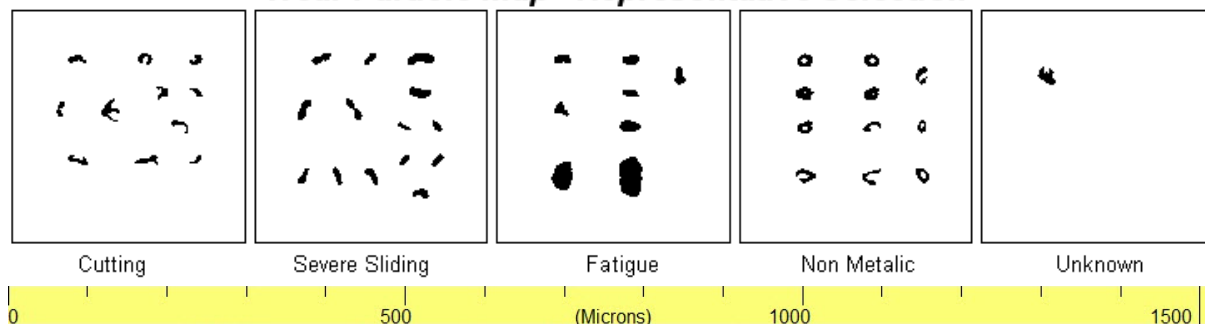
Obr. 28: Počet částic (Fiat Brava 1,4) – druhá výměna olejové náplně

Škoda Fabia 1,2 HTP 47 kW

(proběh vozidla celkem: 102 294 km, km na olej: 3072)



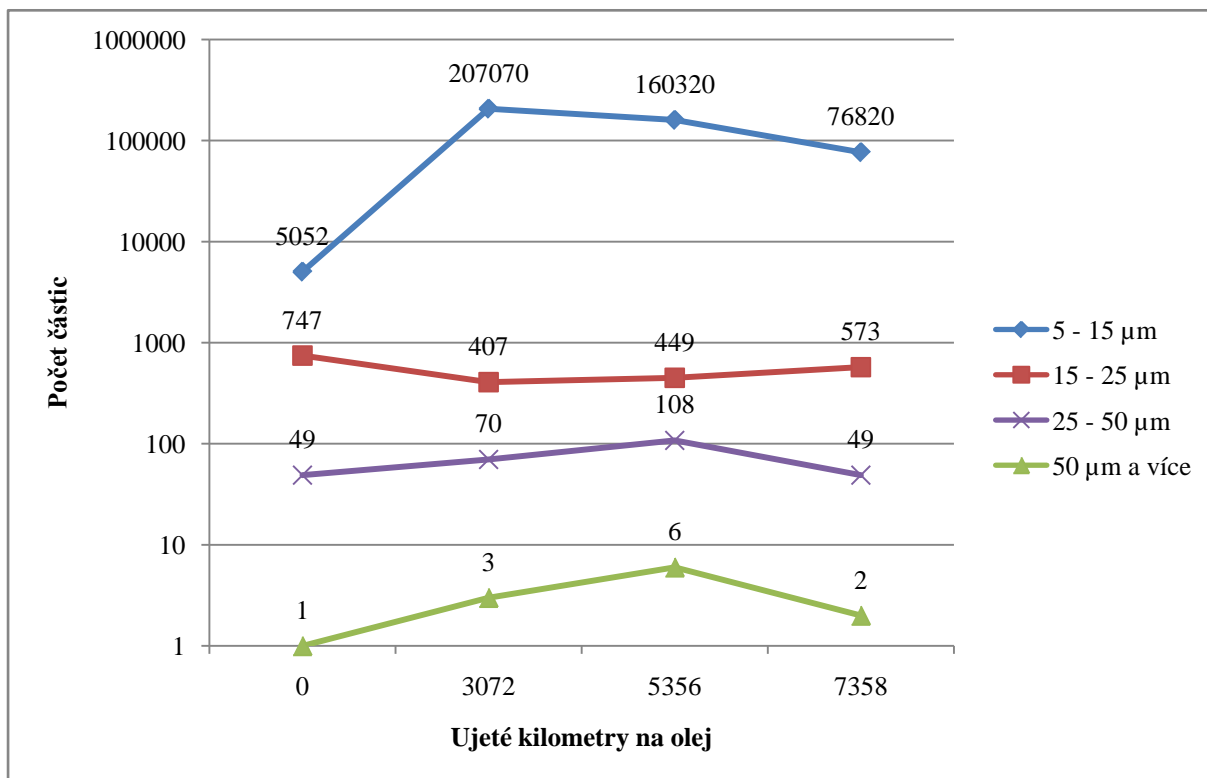
Obr. 29 : Trend celkového počtu částic (Škoda Fabia 1,2 HTP 47 kW)

Wear Particle Map - Representative Selection

Obr. 30: Částice Škoda Fabia 1,2 HTP 47 kW (vzorek po ujetí 5 356 km na olej)

Tab. 16: Počty částic (Škoda Fabia 1,2 HTP 47 kW)

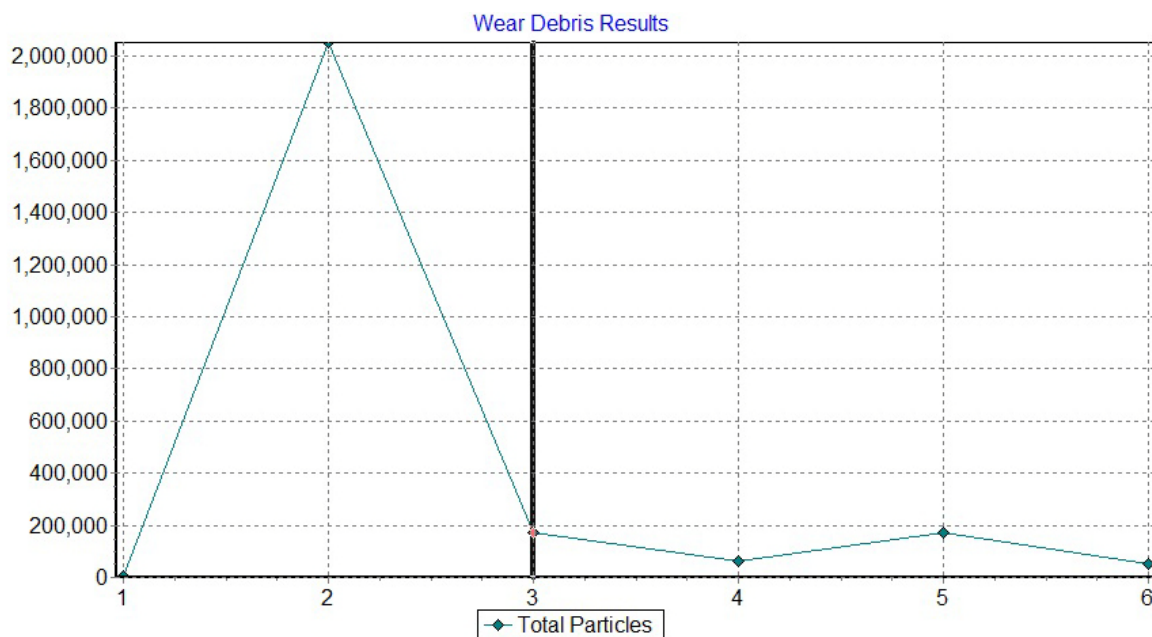
Číslo měření (kilometrů na olej)	Velikost částic (μm)			
	5 - 15	15 - 25	25 - 50	50 a více
1 (0 km) prosinec	5 052	747	49	1
2 (3 072 km) prosinec	207 070	407	70	3
3 (5 356 km) únor	160 320	449	108	6
4 (7358 km) duben	76 820	573	49	2



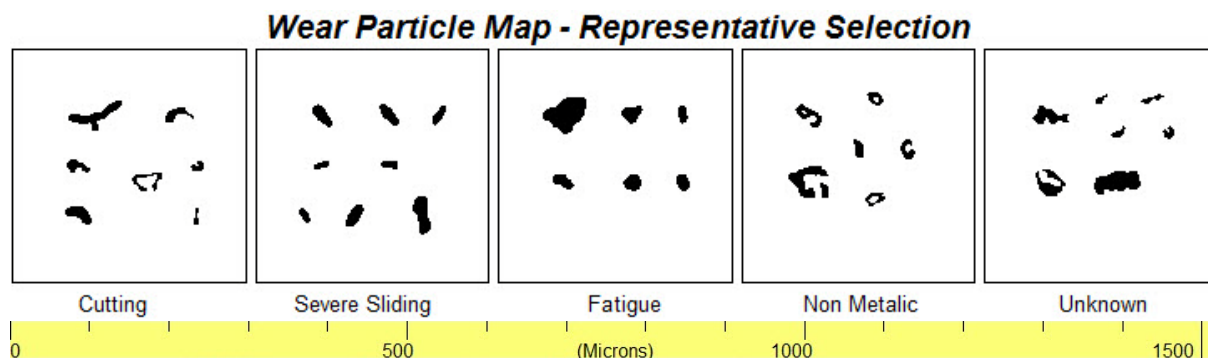
Obr. 31: Počet částic (Škoda Fabia 1,2 HTP 47 kW)

Peugeot 307 SW 2.0 (126 333 km)

(proběh vozidla celkem: 126 333 km, km na olej: 14438)



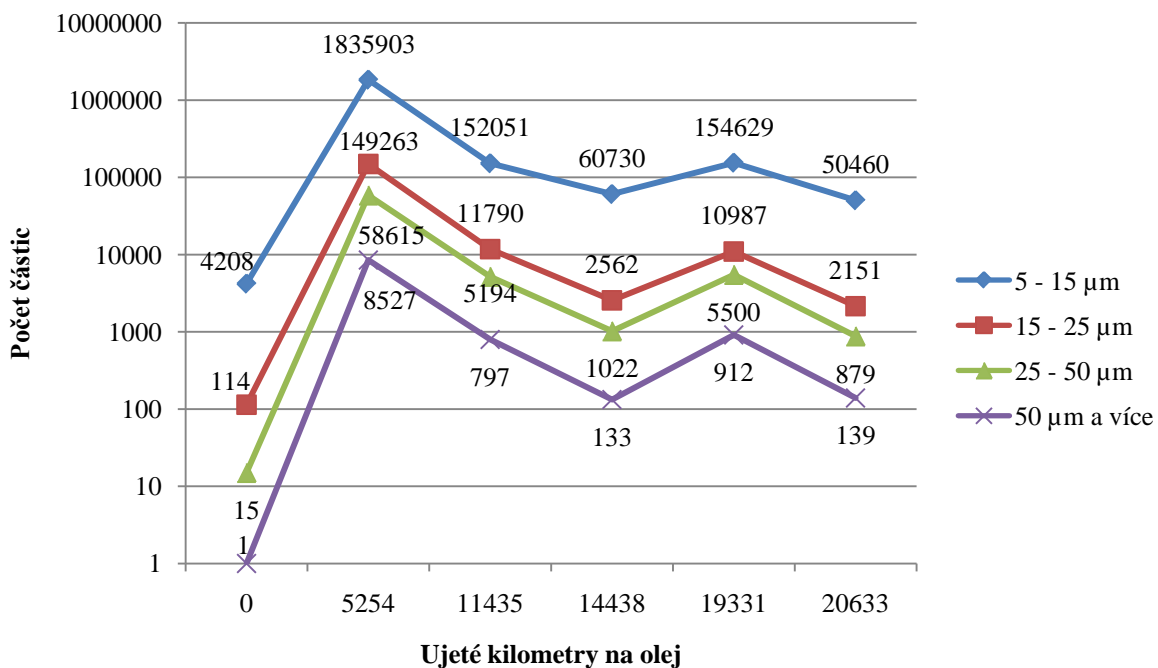
Obr. 32: Trend celkového počtu částic (Peugeot 307 SW 2.0)



Obr. 33: Částice Peugeot 307 SW 2.0 (vzorek po ujetí 14 438 km na olej)

Tab. 17: Počty částic (Peugeot 307 SW 2.0)

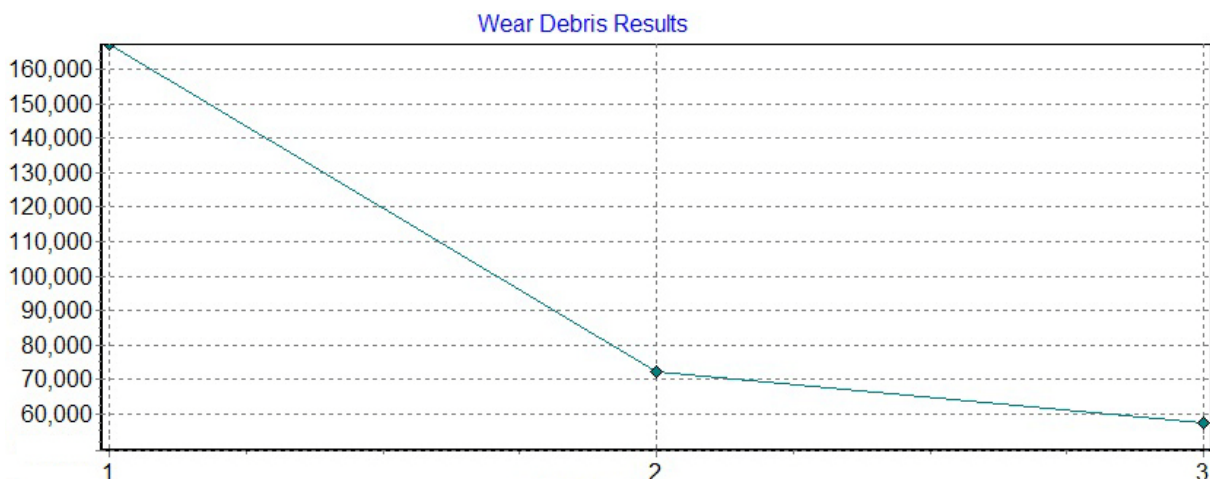
Číslo měření (kilometrů na olej)	Velikost částic (μm)			
	5 - 15	15 - 25	25 - 50	50 a více
1 (0 km) duben	4 208	114	15	1
2 (5 254 km) listopad	1 835 903	149 263	58 615	8 527
3 (11 435 km) prosinec	152 051	11 790	5 194	797
4 (14 438 km) leden	60 730	2 562	1 022	133
5 (19 331 km) duben	154 629	10 987	5 500	912
6 (20 633 km) květen	50 460	2 151	879	139



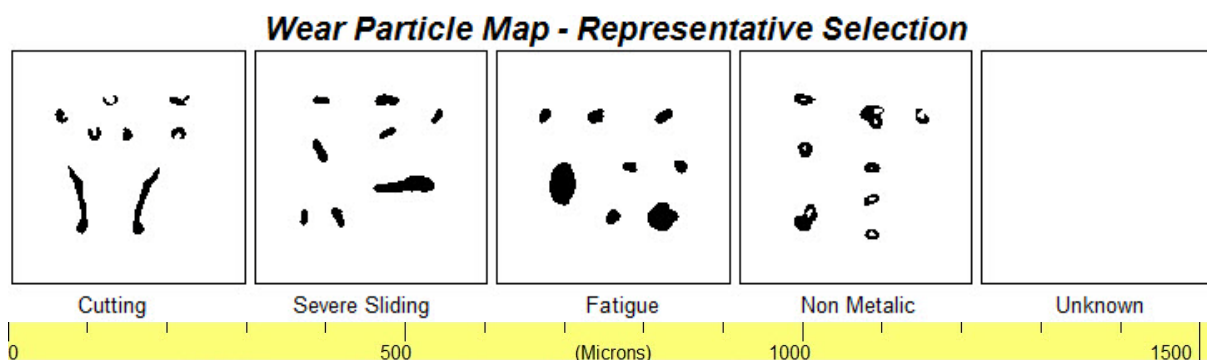
Obr. 34: Počet částic (Peugeot 307 SW 2,0)

Škoda Fabia 1,2 40kW

(proběh vozidla celkem: 258 584 km, km na olej: 3480)



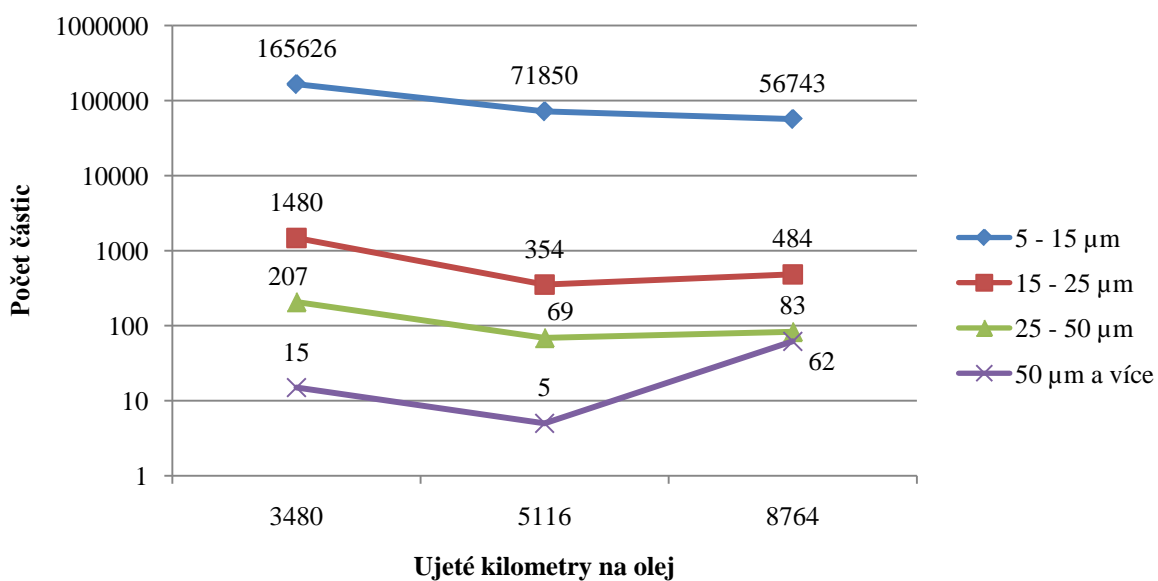
Obr. 35: Trend celkového počtu částic (Škoda Fabia 1,2 40 kW)



Obr. 36: Částice Škoda Fabia 1,2 40 kW (vzorek po ujetí 3 480 km na olej)

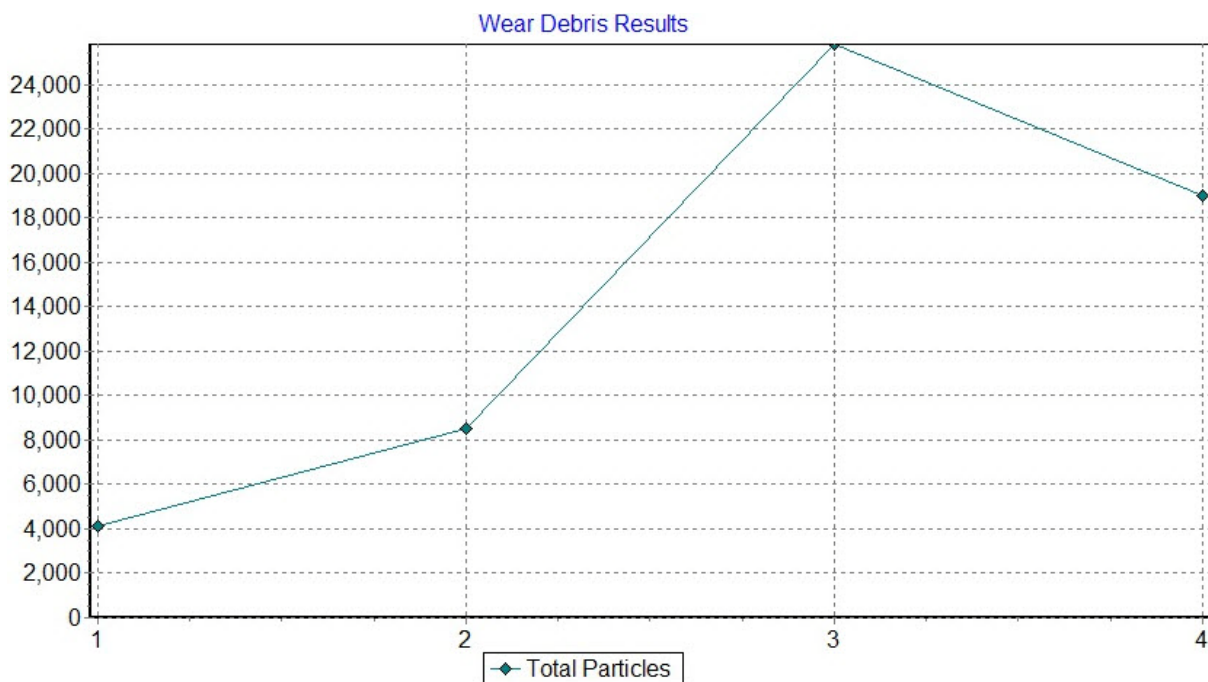
Tab. 18: Počty částic (Škoda Fabia 1,2 40 kW)

Číslo měření (kilometrů na olej)	Velikost částic (μm)			
	5 - 15	15 - 25	25 - 50	50 a více
1 (3 480 km) únor	165 626	1 480	207	15
2 (5 116 km) březen	71 850	354	69	5
3 (8 764 km) květen	56 743	484	83	62

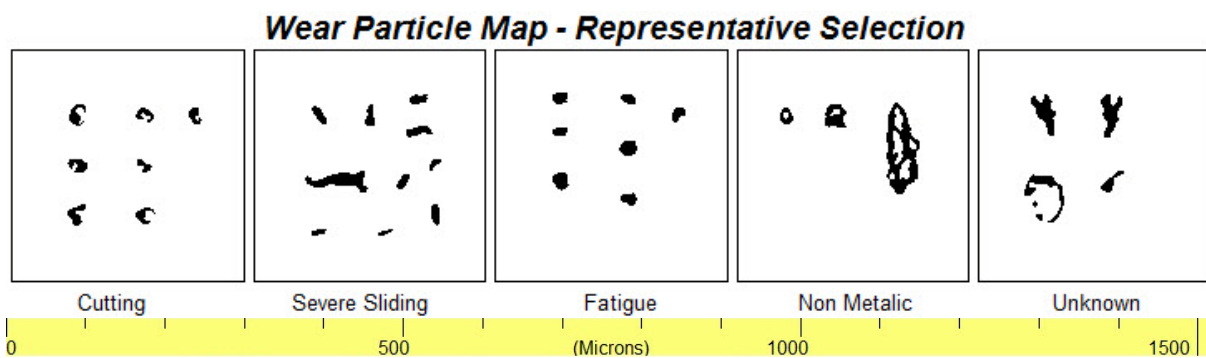


Obr. 37: Počet částic (Škoda Fabia 1,2 40 kW)

Volkswagen Caddy 2,0 SDI – první výměna olejové náplně
(proběh vozidla celkem: 211 024 km, km na olej: 2000)



Obr. 38: Trend celkového počtu částic (Volkswagen Caddy 2,0 SDI – první výměna olejové náplně)

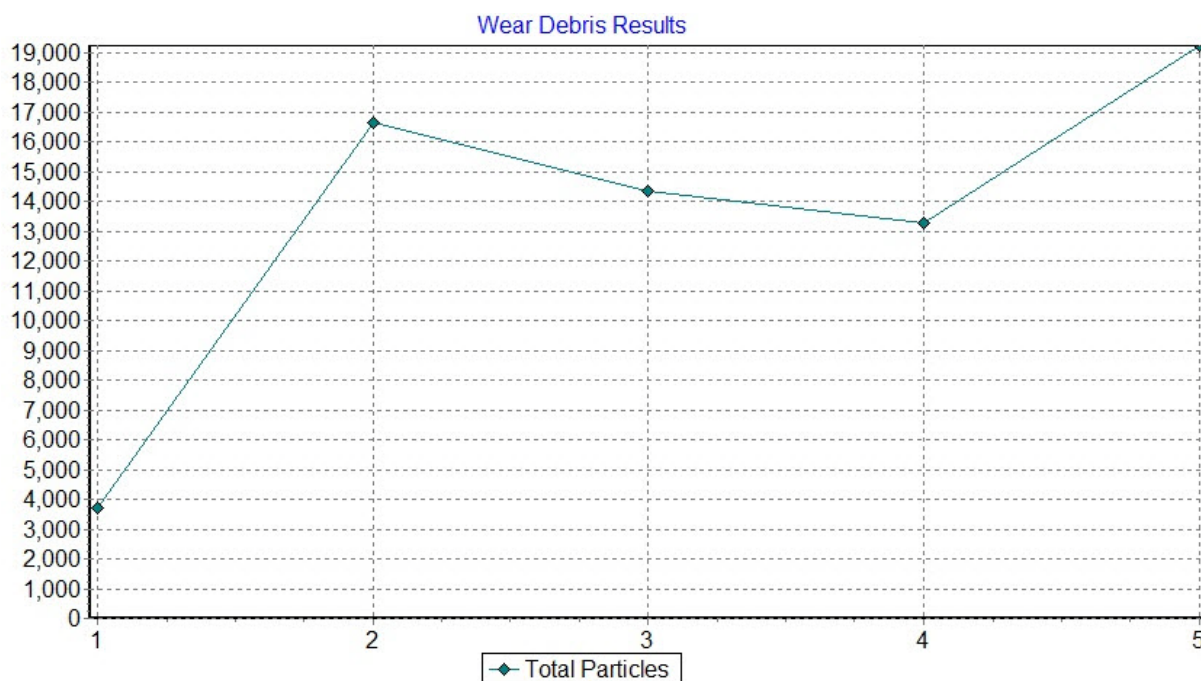


Obr. 39: Částice Volkswagen Caddy 2,0 SDI (vzorek po ujetí 2 000 km na olej)

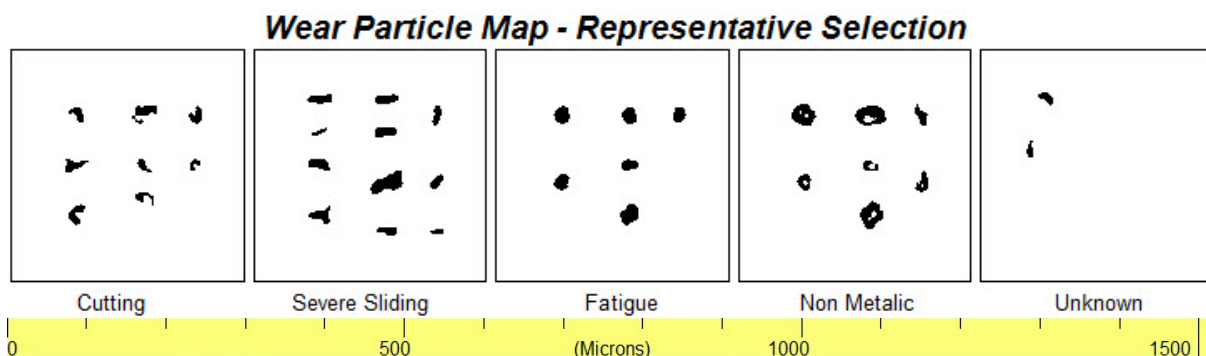
Tab. 19: Počty částic (Volkswagen Caddy 2.0 SDI) – první výměna olejové náplně

Číslo měření (kilometrů na olej)	Velikost částic (μm)			
	5 - 15	15 - 25	25 - 50	50 a více
1 (0 km) listopad	3 974	116	18	2
2 (2 000 km) listopad	7 913	400	155	18
3 (5 000 km) prosinec	24 292	1 115	391	22
4 (12 500 km) prosinec	18 826	163	16	2

Volkswagen Caddy 2,0 SDI – druhá výměna olejové náplně (proběh vozidla celkem: 223 227 km, km na olej: 6005)



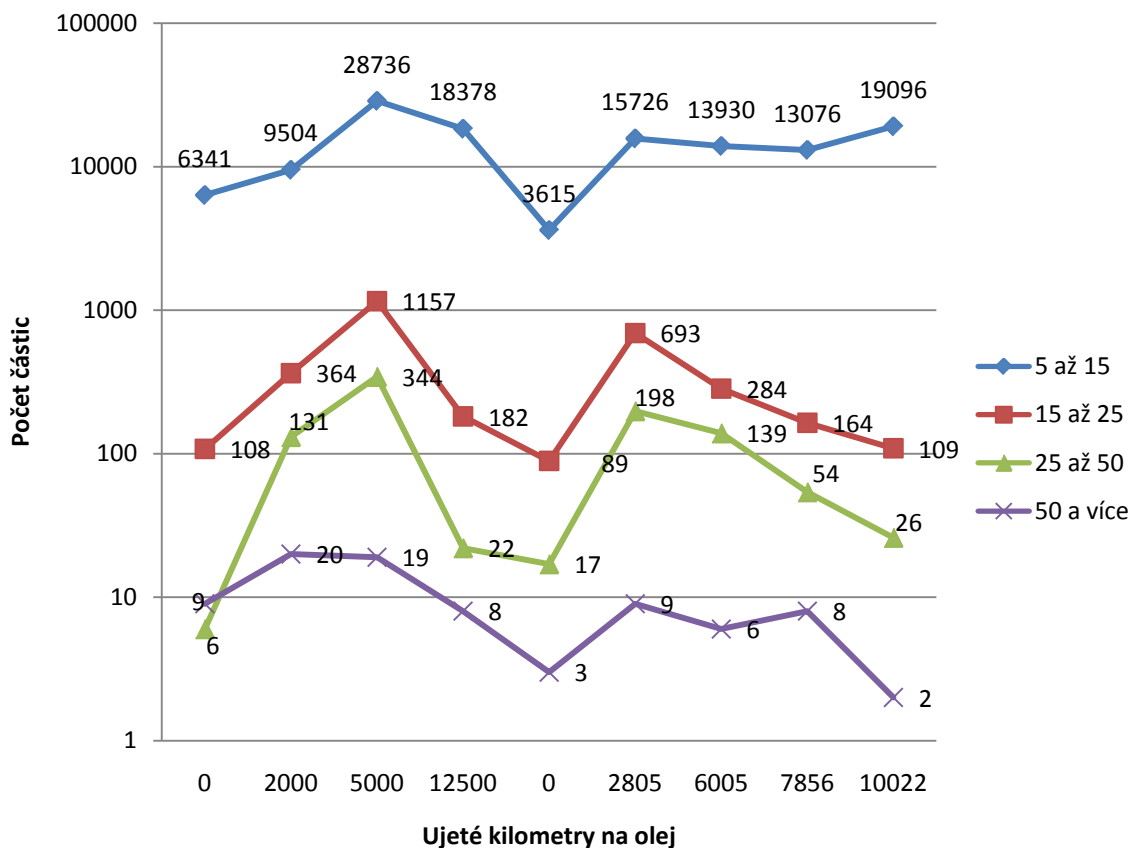
Obr. 40: Trend celkové počtu částic (Volkswagen Caddy 2.0 SDI – druhá výměna olejové náplně)



Obr. 41: Částice Volkswagen Caddy 2,0 SDI (vzorek po ujetí 6 005 km na olej)

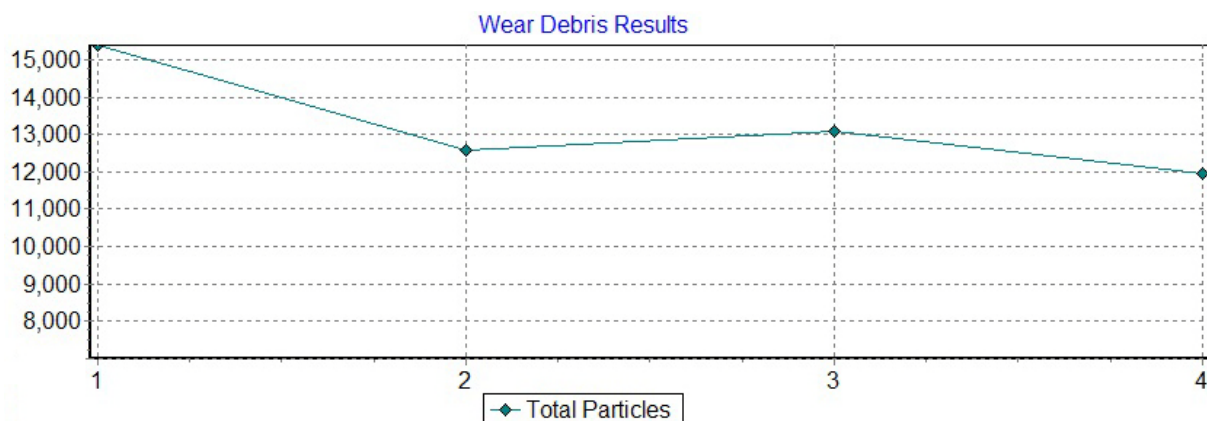
Tab. 20: Počty částic (Volkswagen Caddy 2.0 SDI) – druhá výměna olejové náplně

Číslo měření (kilometrů na olej)	Velikost částic (μm)			
	5 - 15	15 - 25	25 - 50	50 a více
1 (0 km) únor	3 615	89	17	3
2 (2 805 km) únor	15 726	693	198	9
3 (6 005 km) březen	13 930	284	139	6
4 (7 856 km) březen	13 076	164	54	8
5 (10 022 km) duben	19 096	109	26	2

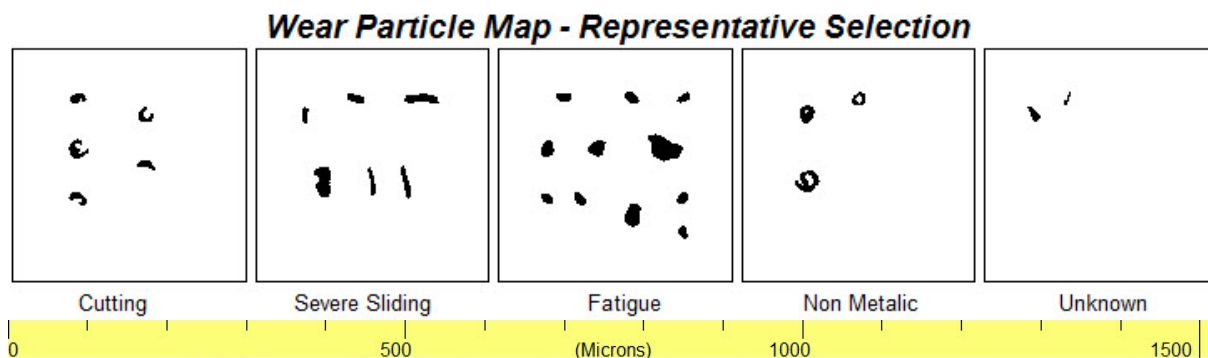


Obr. 42: Počet částic (Volkswagen Caddy 2,0 SDI) - první a druhá výměna olejové náplně

Škoda Octavia Tour Trumf Combi 1,9 TDI PD (106 172 km)
(proběh vozidla celkem: 106 172 km, km na olej: 12 871)



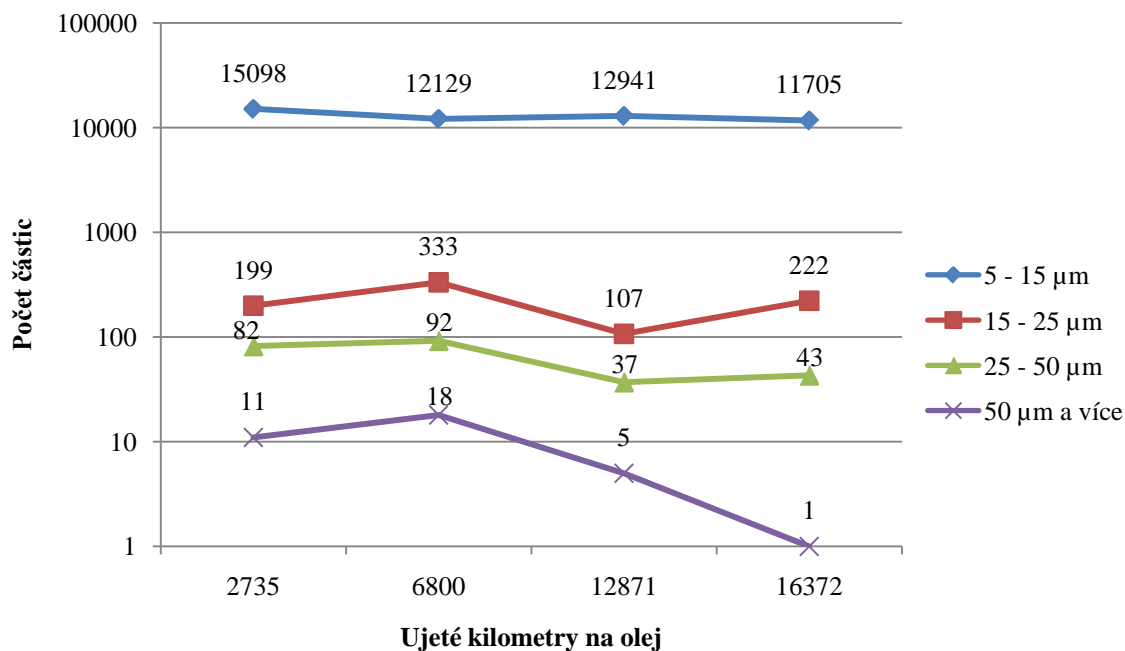
Obr. 43: Trend celkového počtu částic (Škoda Octavia Tour Trumf Combi 1,9 TDI PD)



Obr. 44: Částice Škoda Octavia Tour Trumf Combi 1,9 TDI PD (vzorek po ujetí 12 871 km na olej)

Tab. 21: Počty částic (Škoda Octavia Tour Trumf Combi 1,9 TDI PD)

Číslo měření (kilometrů na olej)	Velikost částic (μm)			
	5 - 15	15 - 25	25 - 50	50 a více
1 (2 735 km) únor	15 098	199	82	11
2 (6 800 km) březen	12 129	333	92	18
3 (12 871 km) duben	12 941	107	37	5
4 (16 372) květen	11 705	222	43	1



Obr. 45: Počet částic (Škoda Octavia Tour Trumf Combi 1,9 TDI PD)

Všechna vozidla jsou provozována celoročně, s vysokou zátěží. Na základě výstupů prezentujících počty částic jednotlivých tříd jsou jednoznačně odlišitelná vozidla s pečlivou údržbou od těch, která jsou užívána bez důsledné pravidelné péče. Počty částic se v těchto případech řádově liší. Na trendových záznamech a souhrnných grafických výstupech lze identifikovat doplňování oleje mezi jednotlivými odběry.

Podrobnější diskuse výsledků experimentálních prací, v níž jsou zahrnuta hodnocení částicové analýzy na SpectroLNF Q200i ferrografické analýzy a jsou doplněny závěry z FTIR spektrometrie,

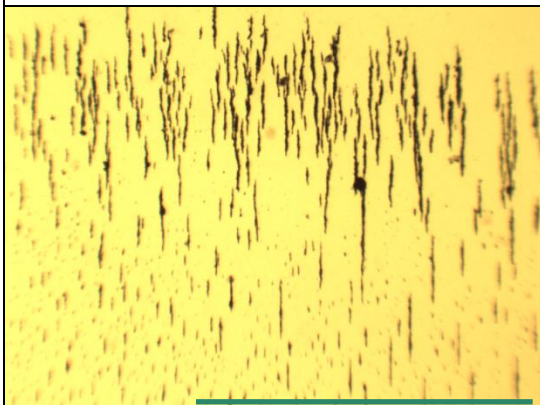
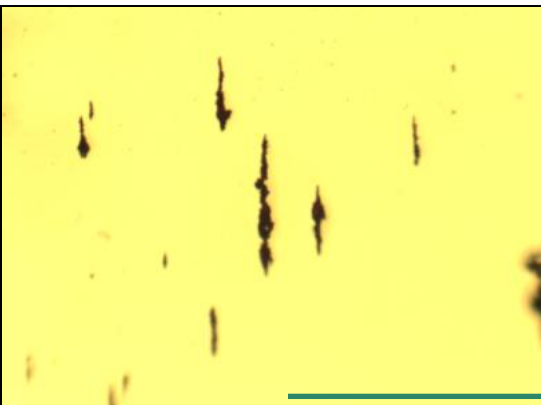
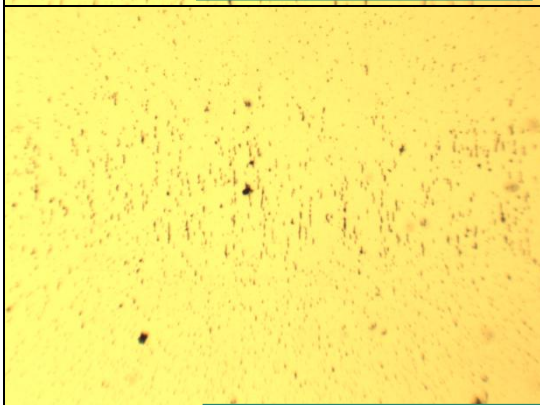
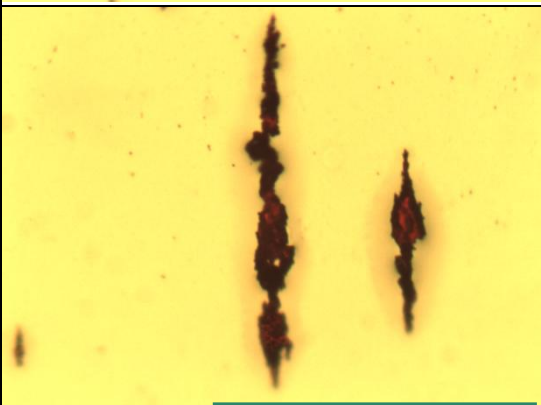
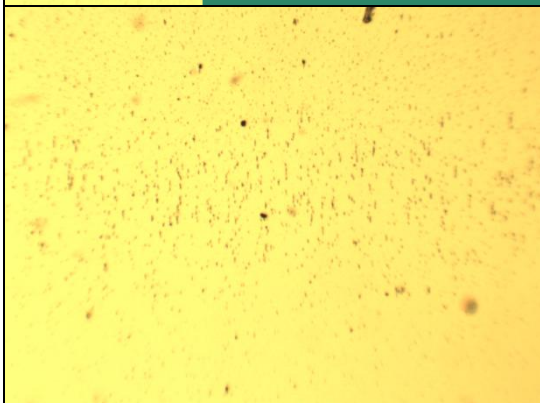
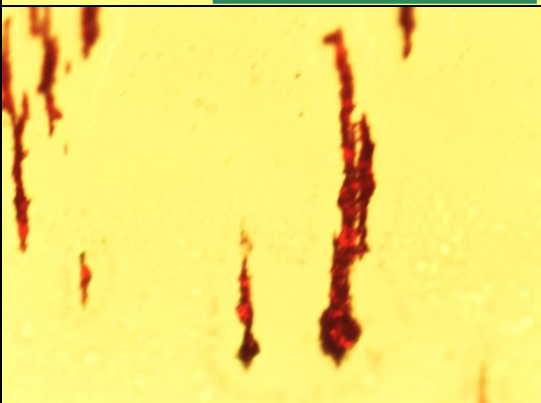
je součástí kap. 3.3.4 (včetně doporučení pro uživatele).

V průběhu měření na laserovém analyzátoru byly zaznamenávány i hodnoty dynamické viskozity (jsou uloženy na CD nosiči v příloze).

U jednotlivých odběrů nebyly zjištěny změny viskozity přesahující doporučený interval 10 %, s výjimkou vozidla Fiat Brava 1.4, kde jak první náplň (olej Divinol), tak druhá náplň (olej 77 MotorOil SM) vykazovaly nízké hodnoty viskozity a vysoké opotřebení (vysoké počty částic všech tříd, zejména třídy 5-15 µm). FTIR spektrometrie prokázala průnik paliva do oleje (kap. 3.3.2).

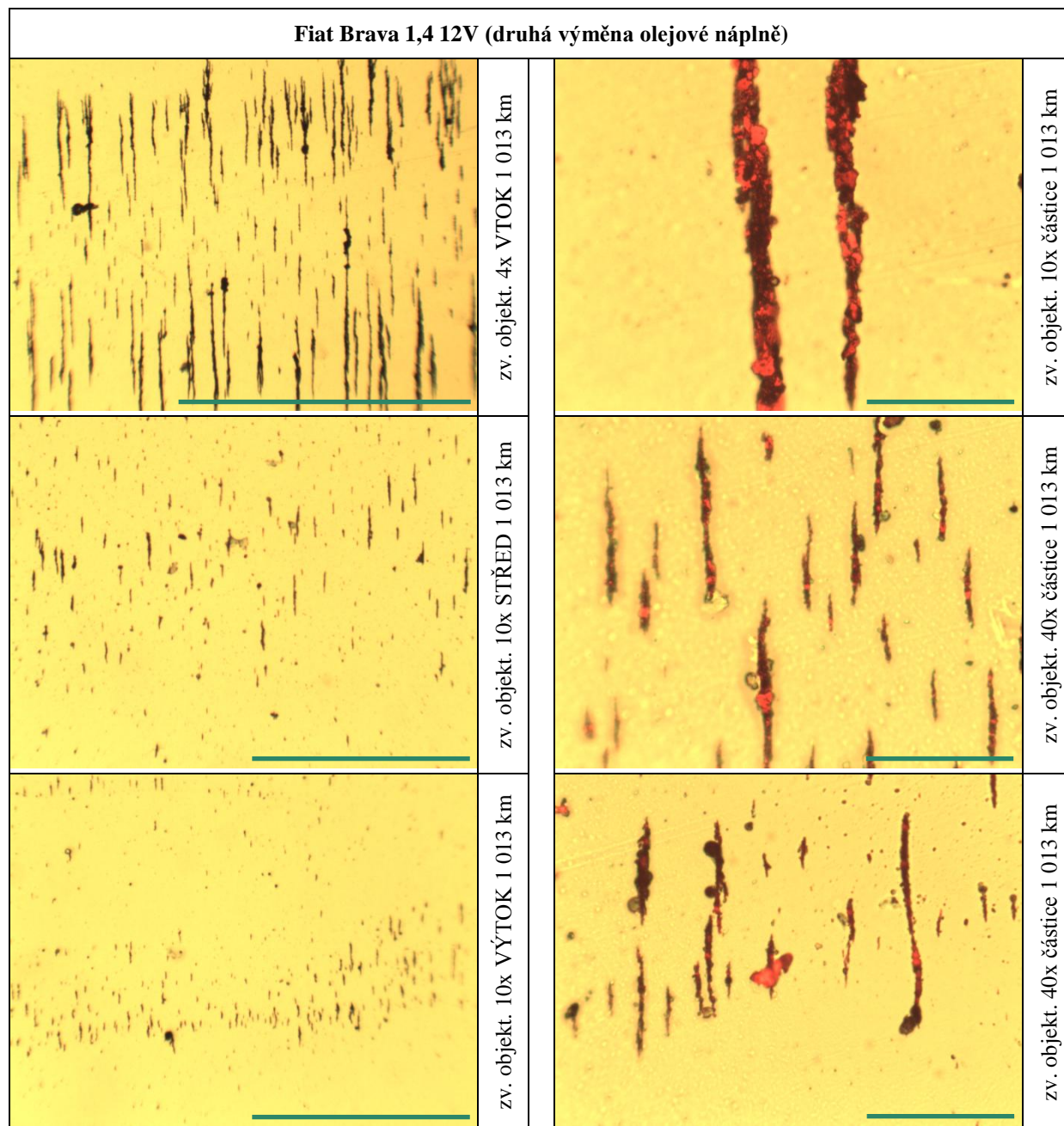
3.3.2 Výsledky ferrografické analýzy

Tab. 22: Fiat Brava 1,4 12V (první výměna olejové náplně)

Fiat Brava 1,4 12V (první výměna olejové náplně)			
	zv. objektivu 4x VTOK 5 822 km		zv. objekt. 10x částice 2 678 km
	zv. objekt. 4x STŘED 5 822km		zv. objekt. 25x částice 2 678 km
	zv. objekt. 4x VÝTOK 5 822 km		zv. objekt. 40x částice 2 678 km

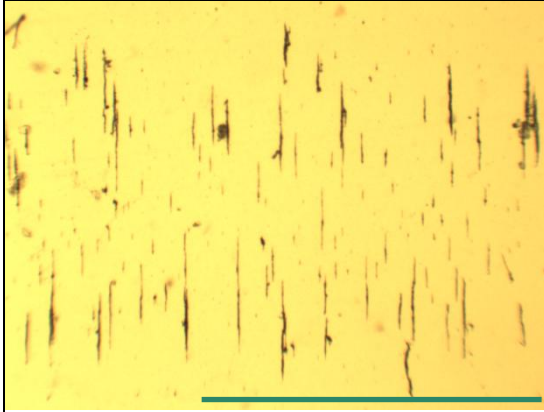
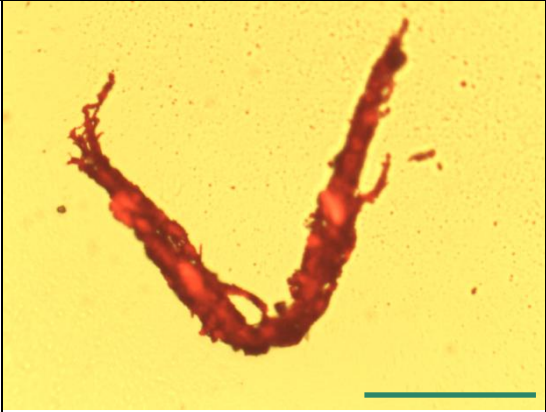
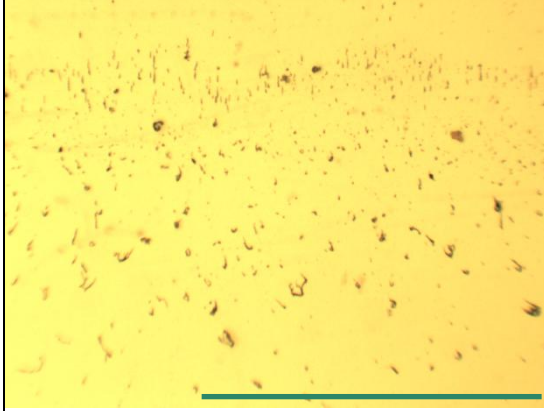
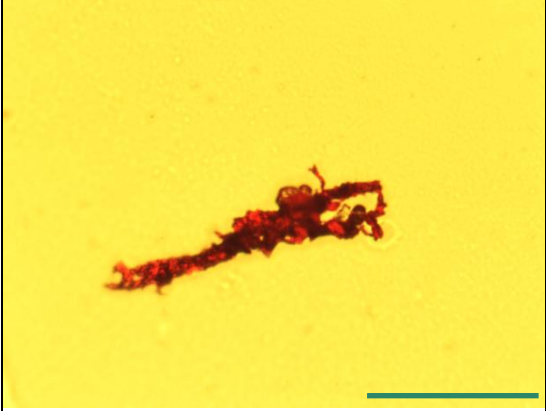
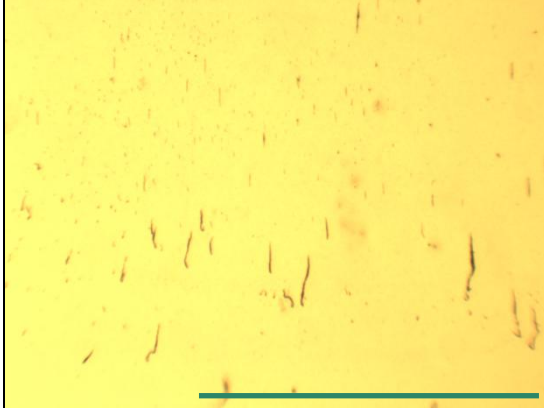
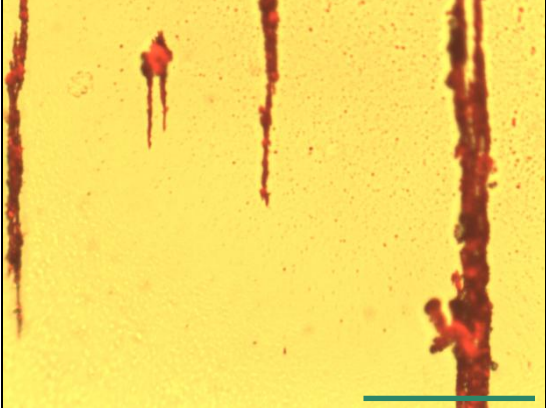
Zvětšení objektivem	Délka úsečky ve snímku odpovídá
4x	1 000 μm
10x	300 μm
25x	150 μm
40x	50 μm

Tab. 23: Fiat Brava 1,4 12V (druhá výměna olejové náplně)



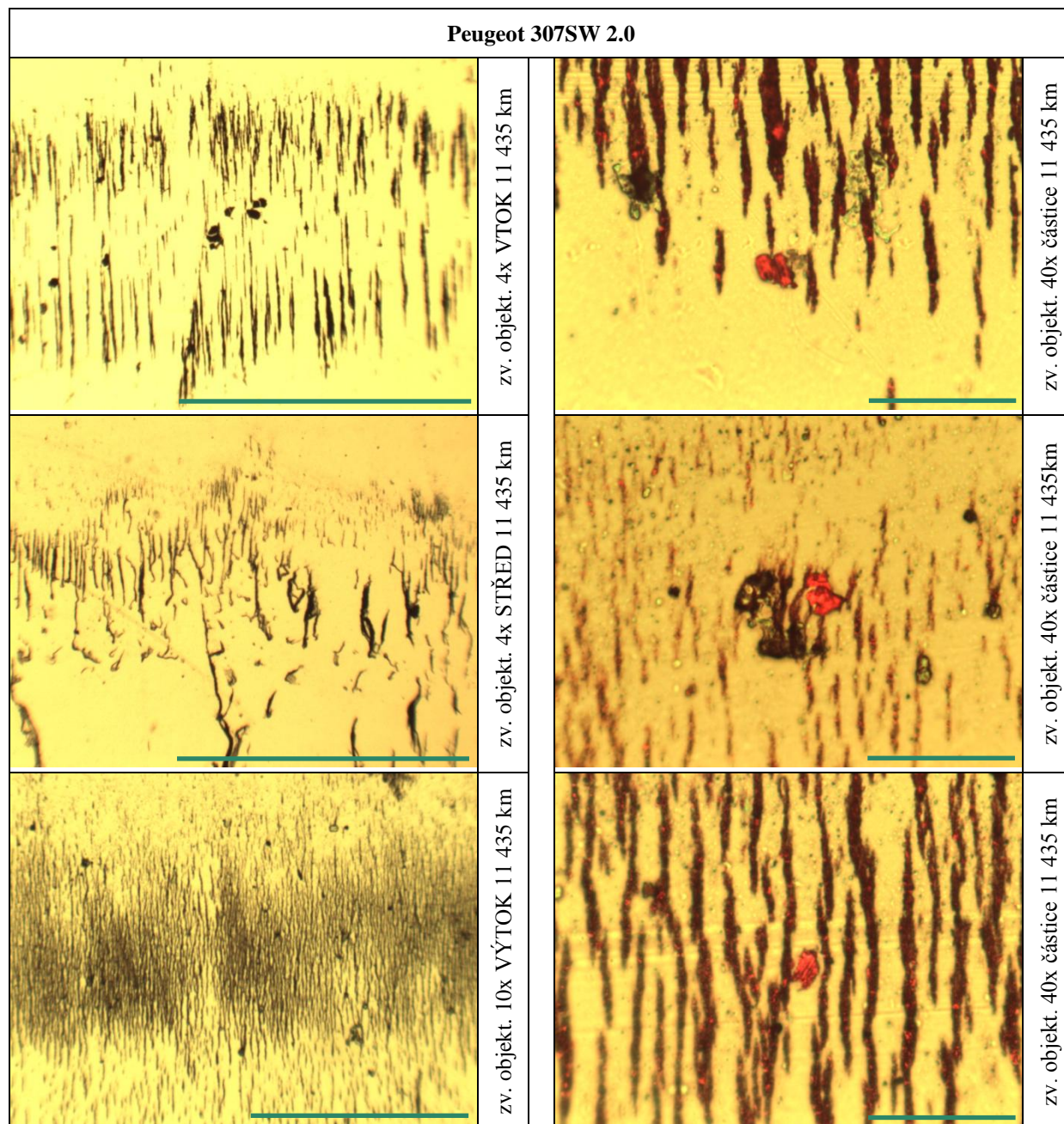
Zvětšení objektivem	Délka úsečky ve snímku odpovídá
4x	1 000 μm
10x	300 μm
40x	50 μm

Tab. 24: Škoda Fabia 1,2 HTP 47 kW

Škoda Fabia 1,2 HTP 47 kW			
	zv. objekt. 4x VTOK 3 072 km		zv. obj. 40x částice 3 072 km
	zv. objekt. 4x STŘED 3 072 km		zv. obj. 40x částice 3 072 km
	zv. objekt. 4x VÝTOK 3 072 km		zv. obj. 40x částice 3 072 km

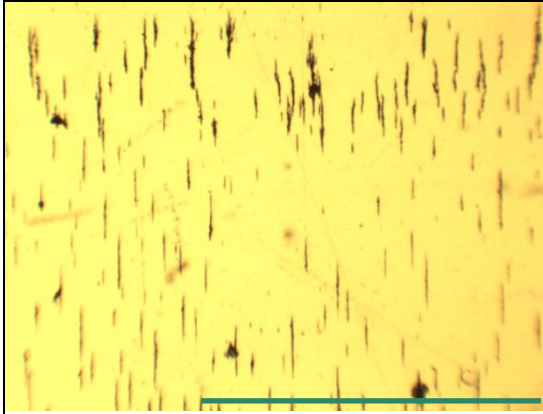
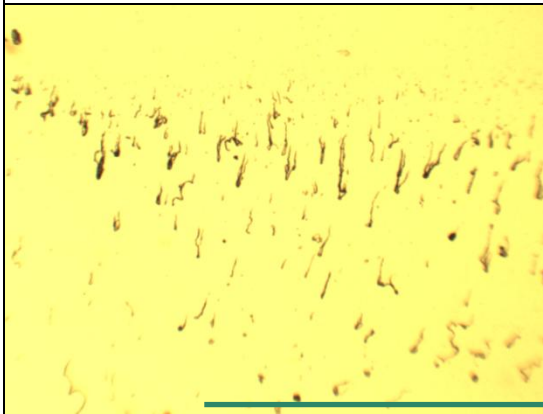
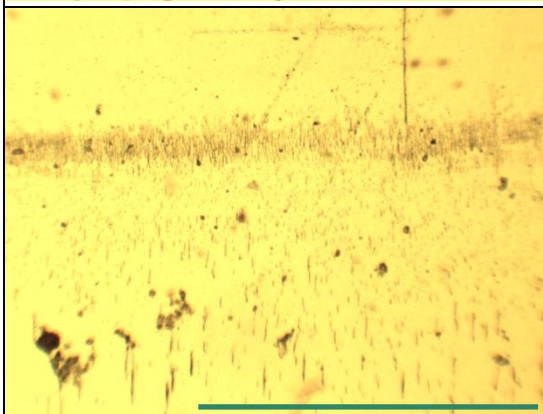
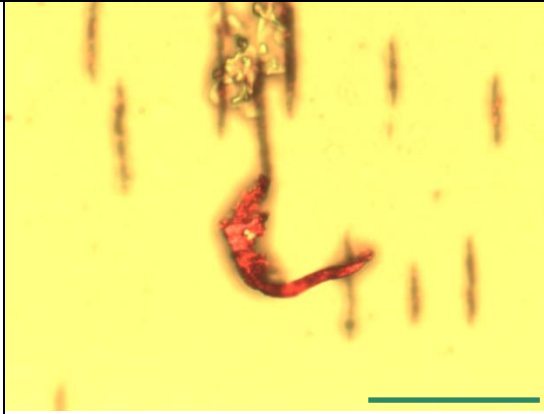
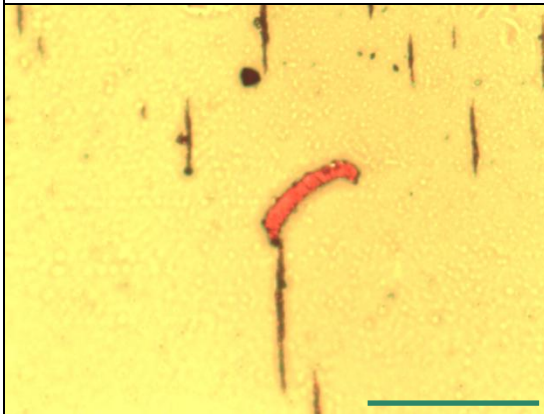

Zvětšení objektivem	Délka úsečky ve snímku odpovídá
4x	1 000 μm
40x	50 μm

Tab. 25: Peugeot 307 SW 2.0



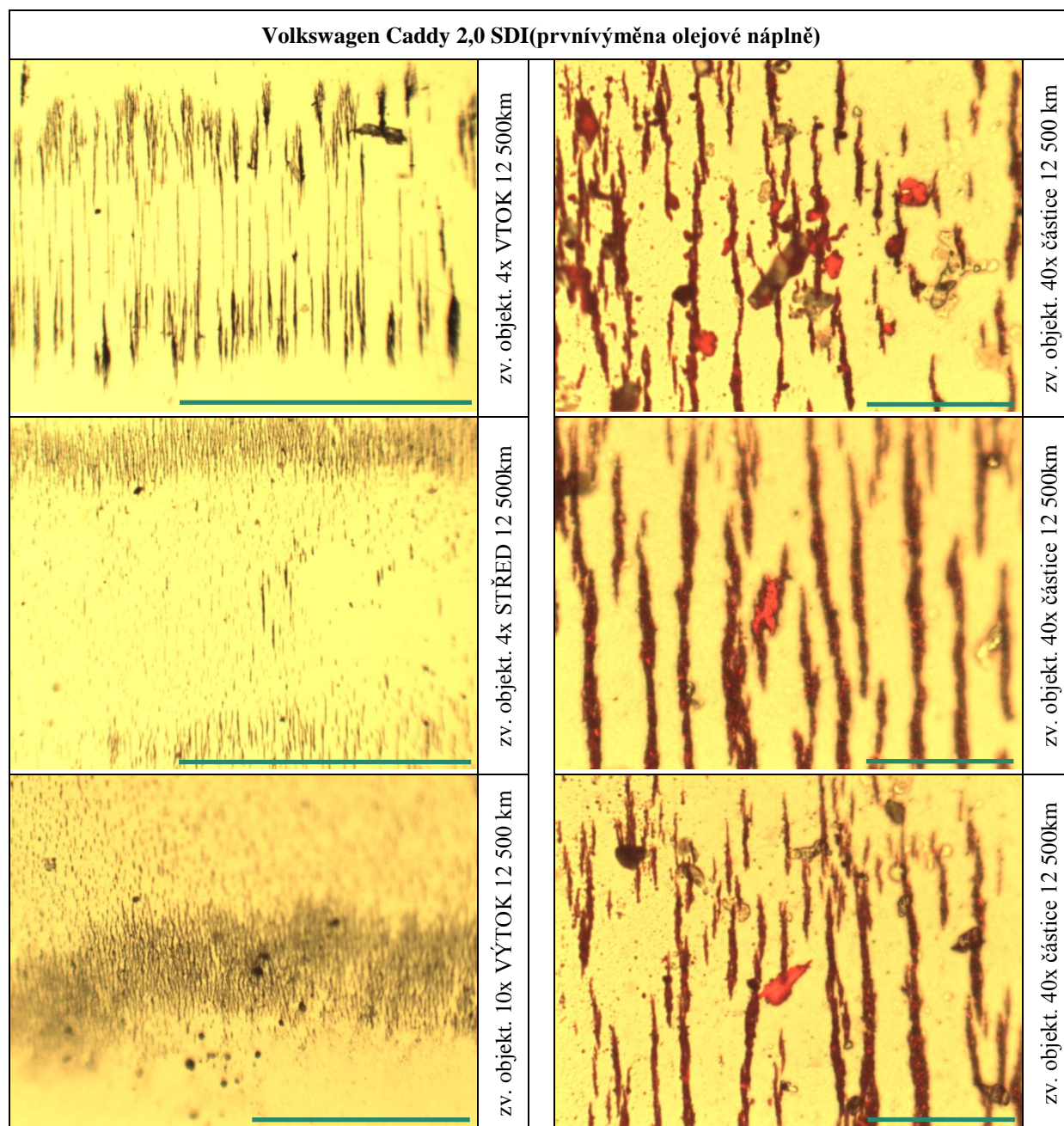
Zvětšení objektivem	Délka úsečky ve snímku odpovídá
4x	1 000 μm
10x	300 μm
40x	50 μm

Tab. 26: Škoda Fabia 1,2 40 kW

Škoda Fabia 1,2 40 kW	
	zv. objekt. 4x VÝTOK 3 480 km
	zv. objekt. 4x STŘED 3 480 km
	zv. obj. 4x VÝTOK 3 480 km
	zv. objekt. 40x částice 3 480 km
	zv. objekt. 40x částice 3 480 km
	zv. objekt. 40x částice 3 480 km

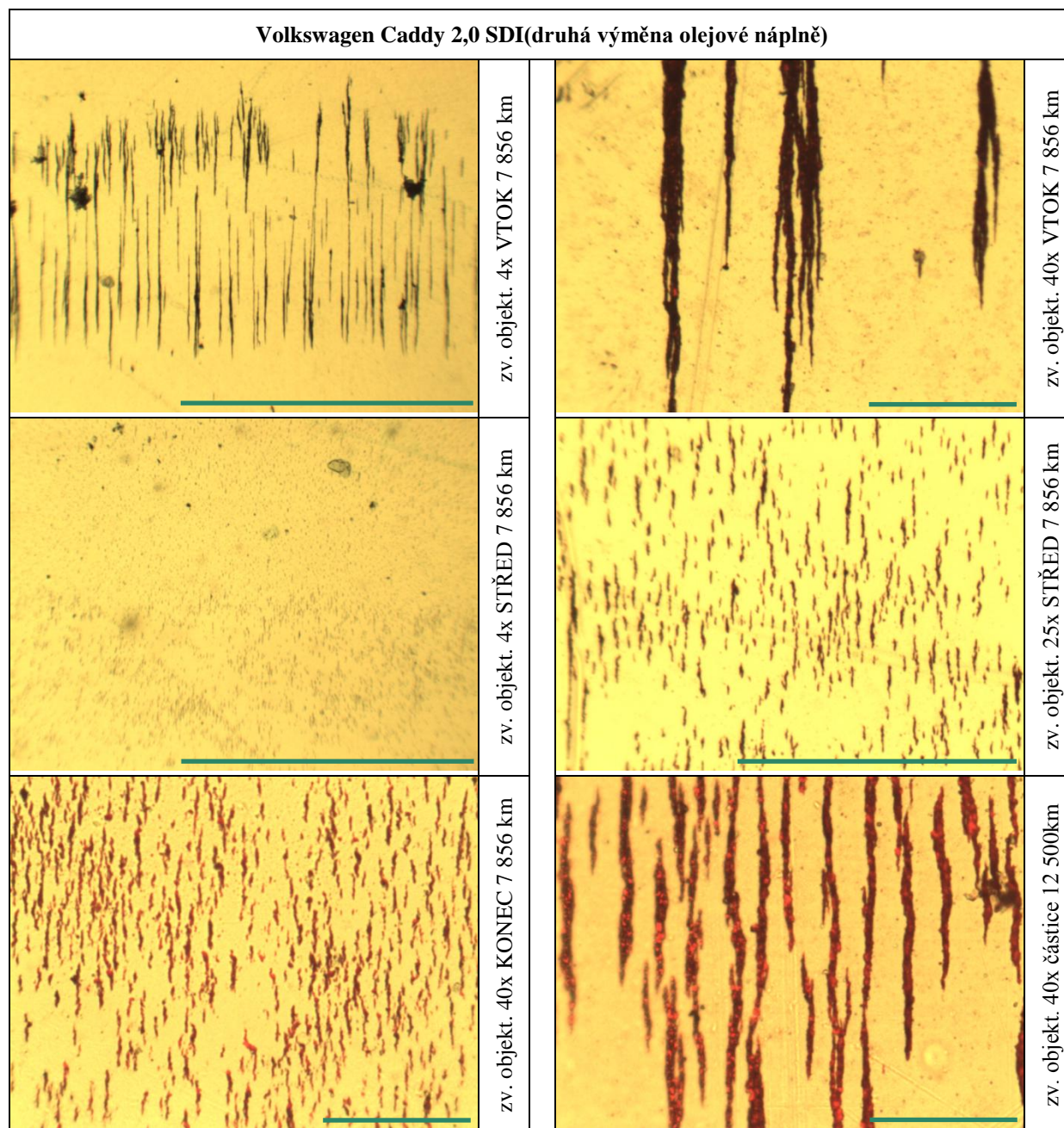
Zvětšení objektivem	Délka úsečky ve snímku odpovídá
4x	1 000 μm
40x	50 μm

Tab. 27: Volkswagen Caddy 2,0 SDI (první výměna olejové náplně)



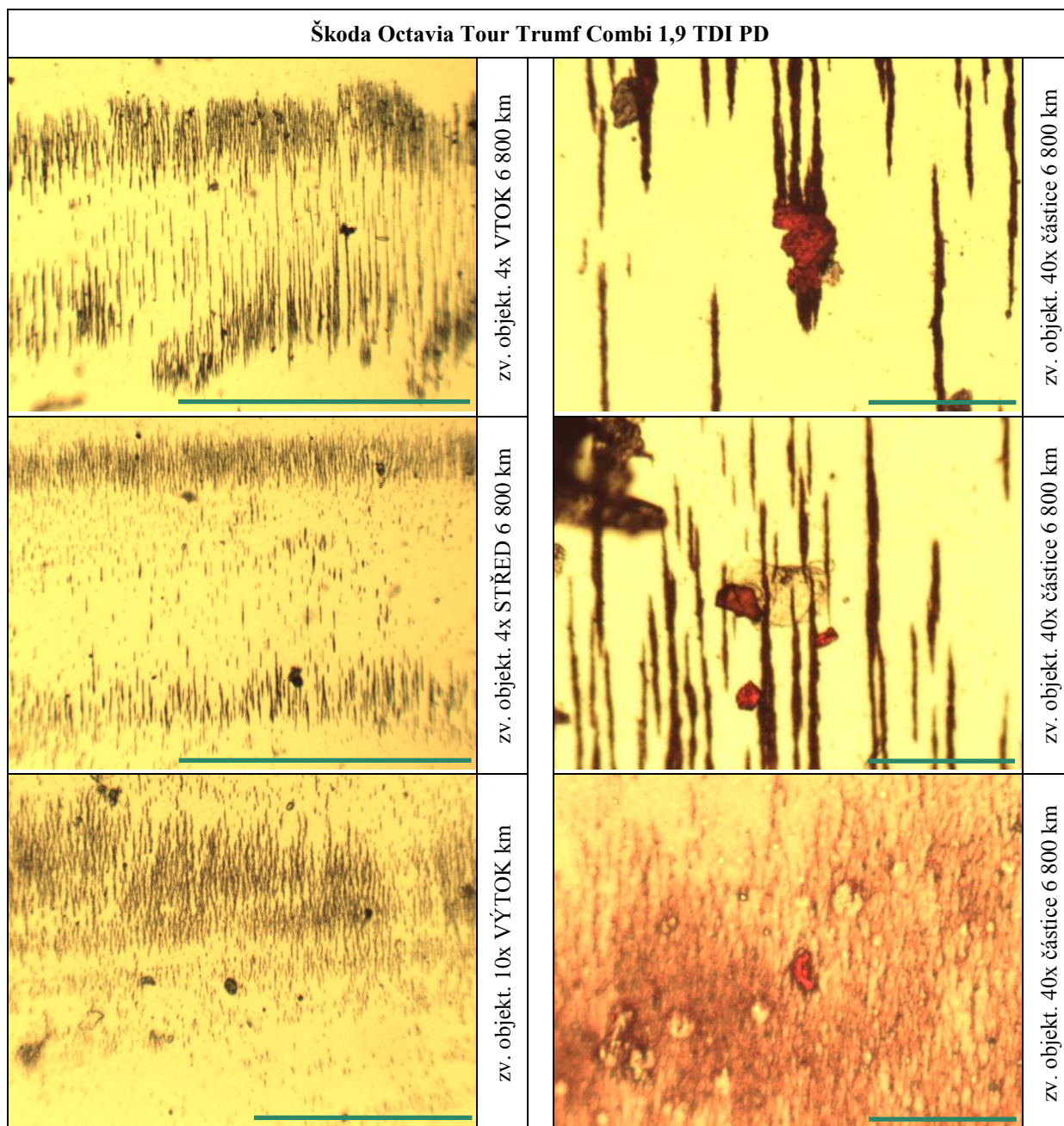
Zvětšení objektivem	Délka úsečky ve snímku odpovídá
4x	1 000 μm
10x	300 μm
40x	50 μm

Tab. 28: Volkswagen Caddy 2,0 SDI (druhá výměna olejové náplně)



Zvětšení objektivem	Délka úsečky ve snímku odpovídá
4x	1 000 μm
25x	150 μm
40x	50 μm

Tab. 29: Škoda Octavia Tour Trumf Combi 1,9 TDI PD



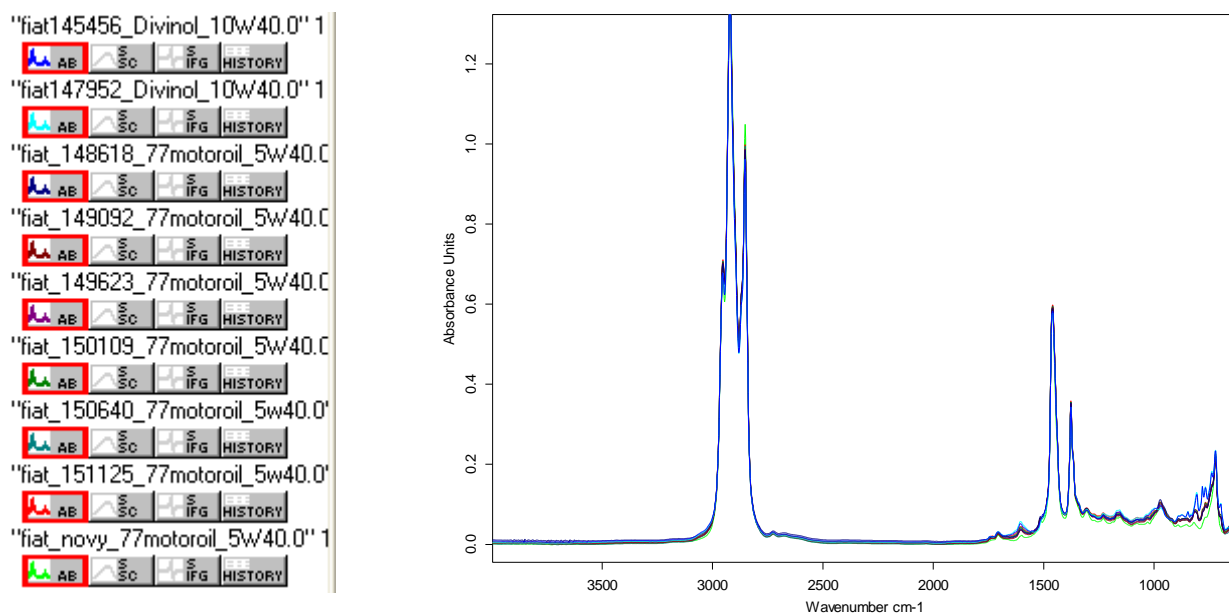
Zvětšení objektivem	Délka úsečky ve snímku odpovídá
4x	1 000 μm
10x	300 μm
40x	50 μm

Výsledky ferrografické analýzy odpovídají výsledkům měření na laserovém analyzátoru. Podrobnější diskuze výsledků, v níž jsou zahrnuta hodnocení provedených experimentálních prací, je součástí kap. 3.3.4 (včetně doporučení pro uživatele).

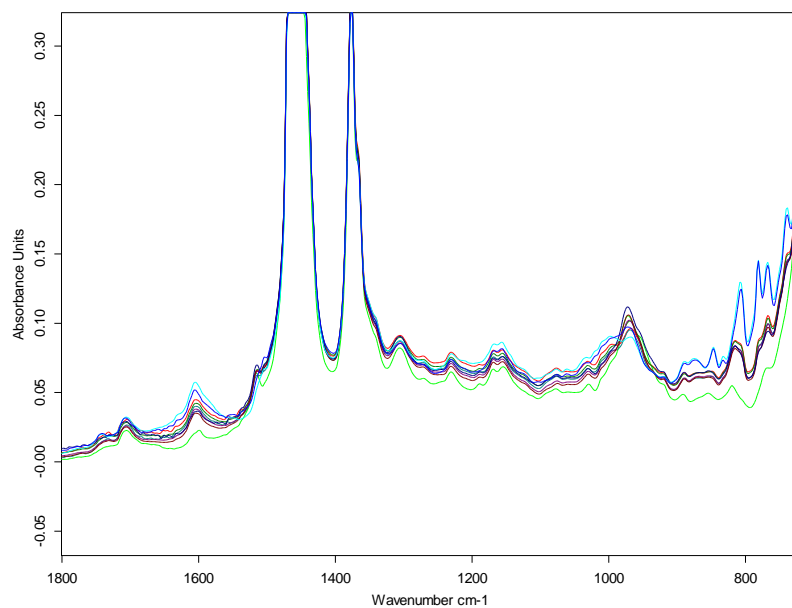
3.3.3 Výsledky FTIR spektrometrie

Vybrané vzorky motorových olejů byly analyzovány spektrometricky. Výsledky jsou souhrnně prezentovány na obr. 46a až 50, kompletní dokumentace spekter ve formátu *OPUS Spectrum* je součástí elektronické přílohy na CD nosiči.

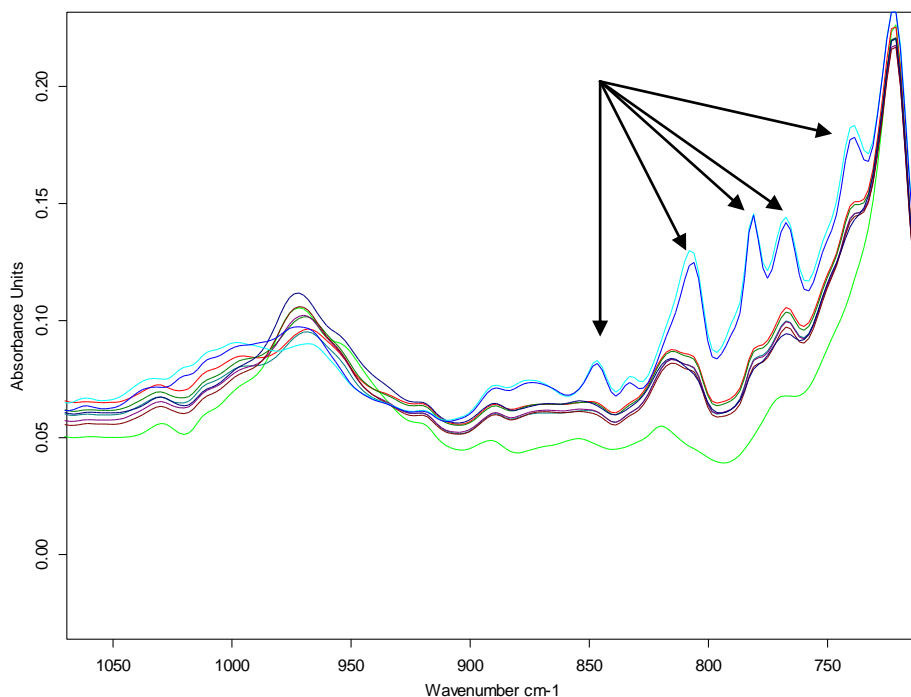
Fiat Brava 1,4



Obr. 46a: Infračervené spektrum vzorků z jednotlivých odběrů motorového oleje z vozidla (celý měřený rozsah)



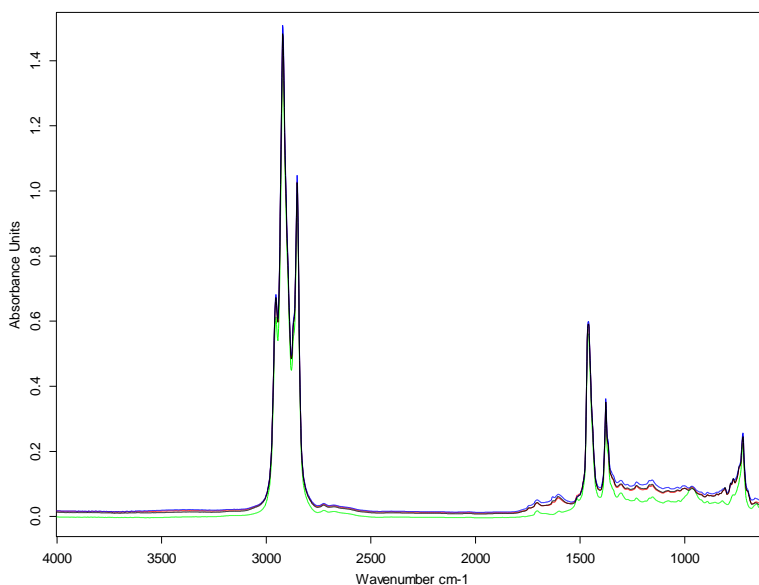
Obr. 46b: Detail oblasti 1800–700 cm⁻¹



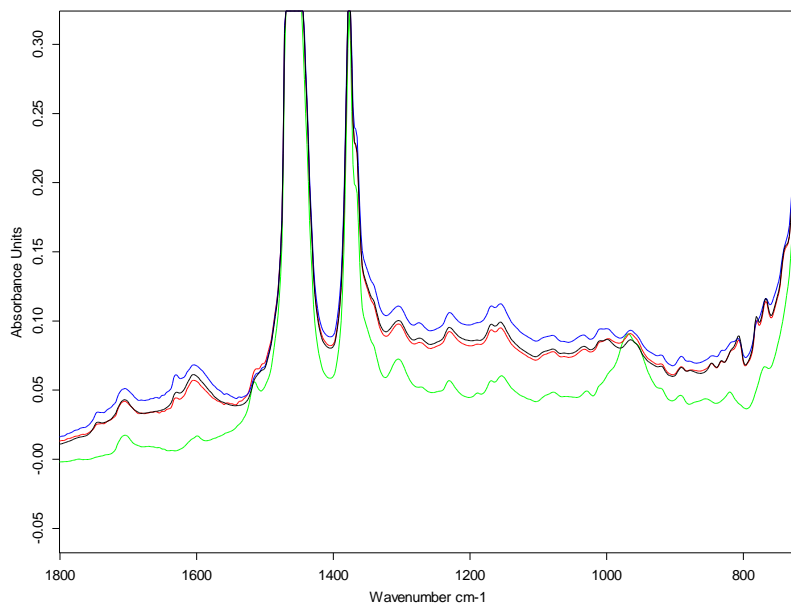
Obr. 46c: Detail oblasti $1050\text{--}700\text{ cm}^{-1}$ (šipky označují piky, které prokazují průnik paliva do oleje v oblasti $<950\text{ cm}^{-1}$)

Škoda Fabia 1,2 HTP 47 kW

```
"fabia_100292_abx quality5w40.0"
"fabia_102294_abx quality5w40.0"
"fabia_98008_abx quality5w40.0"
"fabia_novy_abx quality5w40.0"
```



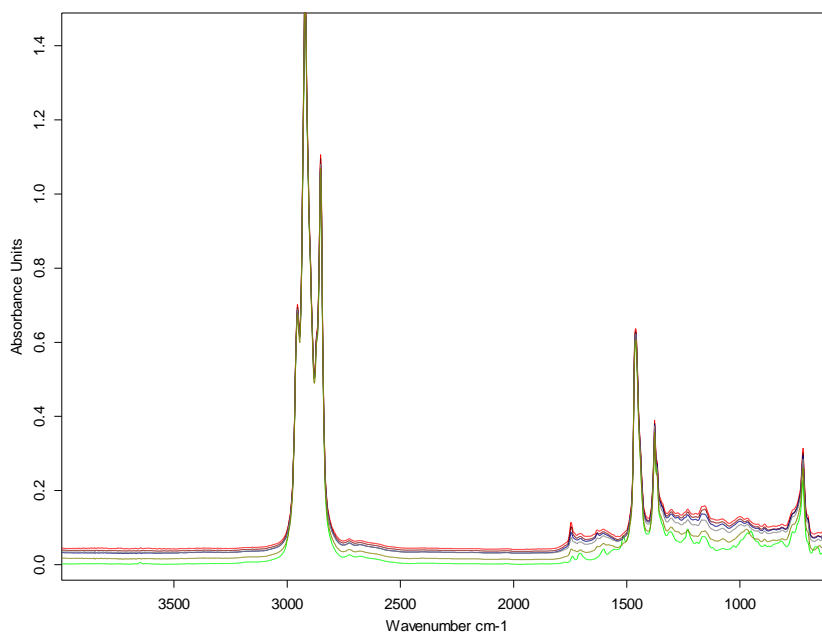
Obr. 47a: Infračervené spektrum vzorků z jednotlivých odběrů motorového oleje z vozidla (celý měřený rozsah)



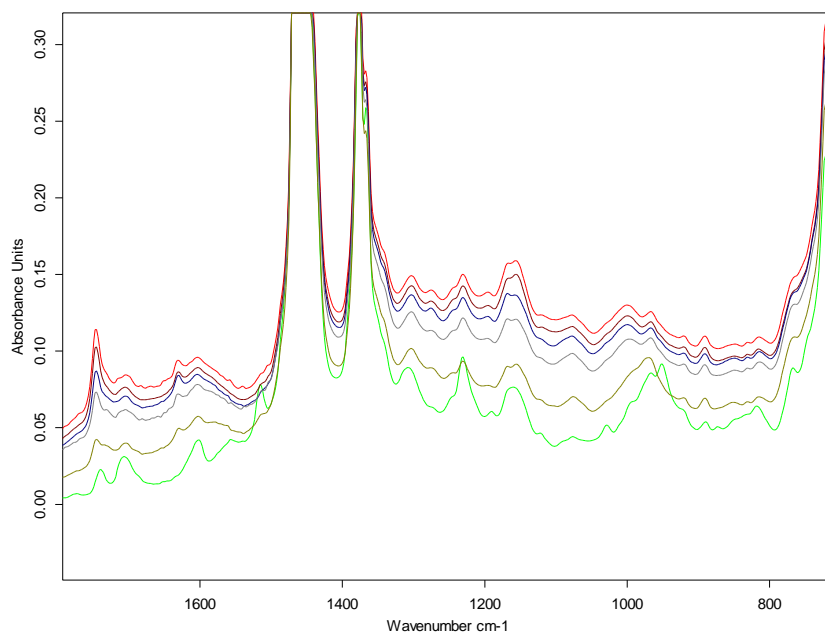
Obr. 47b: Detail oblasti 1800–700 cm^{-1} (oblast $\sim 1600 \text{ cm}^{-1}$ – průnik spalných plynů (NO-skupina), 970 cm^{-1} – úbytek aditiv, $< 800 \text{ cm}^{-1}$ – mírný průnik paliva)

Peugeot 307 SW 2.0

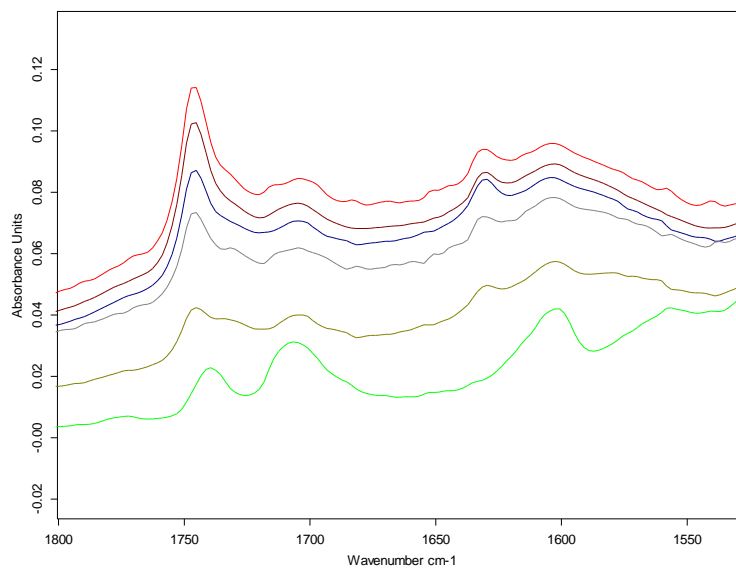
```
"peugeot_110954_mobil10w40.0"
"peugeot_117135_mobil10w40.0"
"peugeot_120138_mobil10w40.0"
"peugeot_125031_mobil10w40.0"
"peugeot_126333_mobil10w40.0"
"peugeot_novy_mobil10w40.0"
```



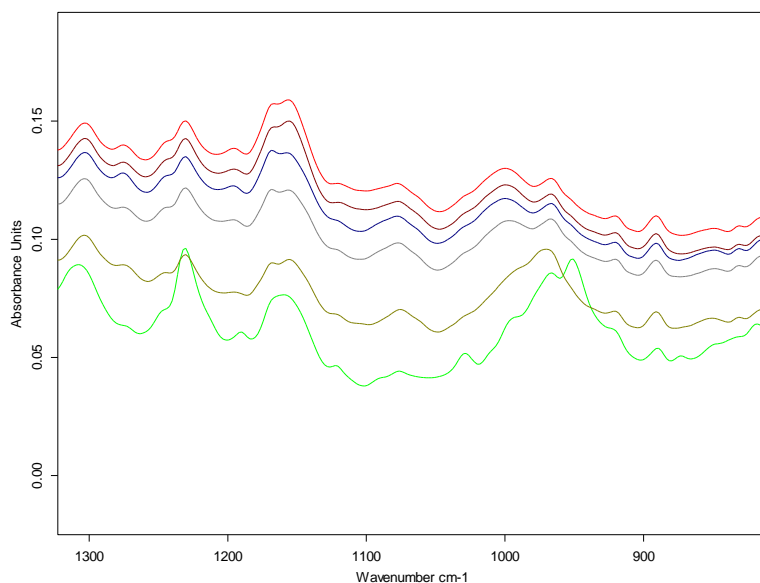
Obr. 48a: Infračervené spektrum vzorků z jednotlivých odběrů motorového oleje z vozidla (celý měřený rozsah)



Obr. 48b: Detail oblasti 1700–700 cm^{-1} (oblast $\sim 970 \text{ cm}^{-1}$ – úbytek aditiv, 1750 cm^{-1} – nárůst oxidačních produktů)



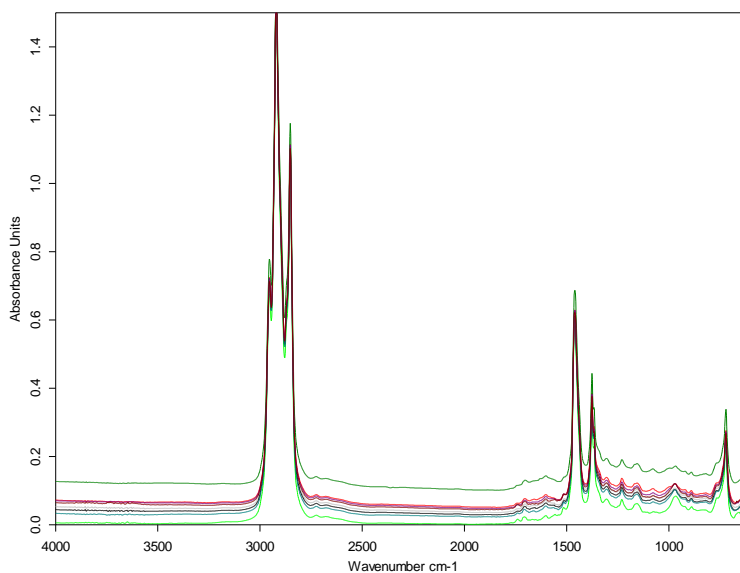
Obr. 48c: Detail oblasti 1800–1550 cm^{-1} (nárůst oxidačních produktů)



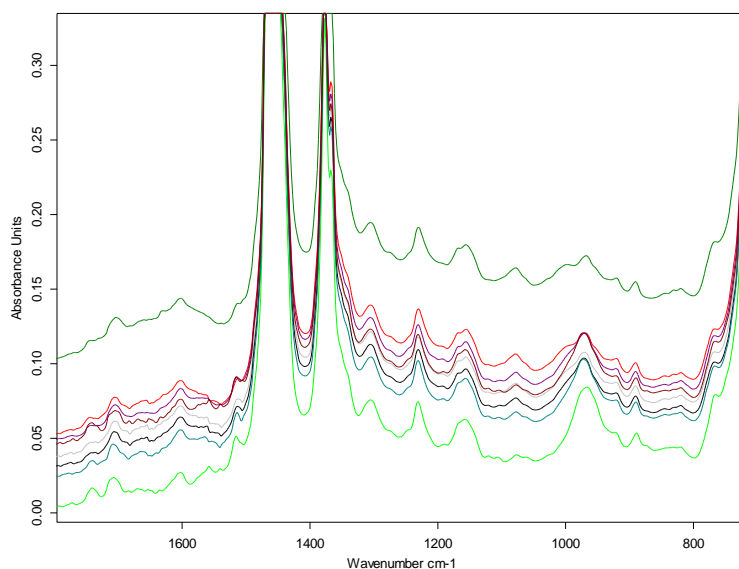
Obr. 48d: Detail oblasti 1800–1550 cm^{-1} (úbytek aditiv)

Volkswagen Caddy 2,0 SDI

- "caddy200500_Castrol_5W40.0"
- "caddy203500_Castrol_5W40.0"
- "caddy211024_Castrol_5W40.0"
- "caddy216060_Castrol_5W40.0"
- "caddy219210_Castrol_5W40.0"
- "caddy221061_Castrol_5W40.0"
- "caddy223227_Castrol_5W40.0"
- "new_Castrol_5W40.0" 1

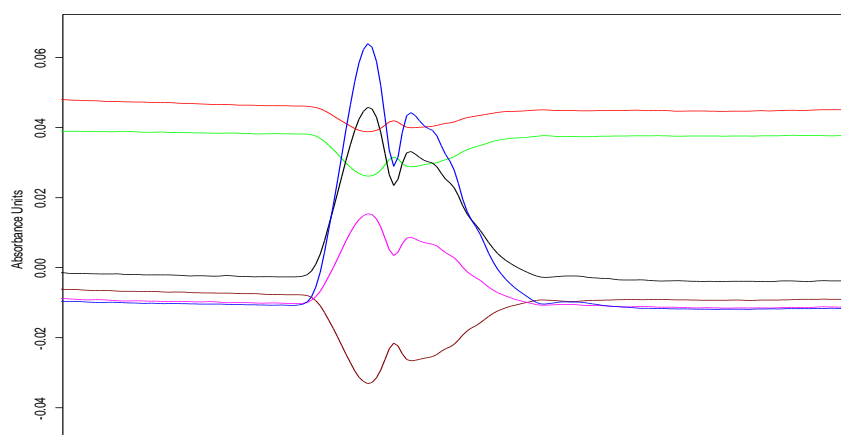


Obr. 49a: Infračervené spektrum vzorků z jednotlivých odběrů motorového oleje z vozidla (celý měřený rozsah)



Obr. 49b: Detail oblasti 1800–700 cm^{-1}

V rozmezí 2250 – 2400 cm^{-1} se u spekter měřených metodou HATR objevuje dvojitý pík (obr. 50), který souvisí s přítomností 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 byl použit u spekter, uvedených v této práci).



Obr. 50: Detail reálných spekter v oblasti (2400 – 2280 cm^{-1}) s dvojitým píkem oxidu uhličitého

Cílem této části experimentálních prací bylo posoudit stav vzorků motorového oleje postupně odebíraných ze sledovaných vozidel. Na základě analýzy infračervených spekter (obr. 46 až 49) lze konstatovat:

- Koncentrace protioděrových aditiv se během provozu u některých vozidel (Peugeot 307 SW 2.0, Škoda Fabia 1,2 HTP 47 kW) postupně snížila (hodnotí se v oblasti vlnočtu kolem 970 cm^{-1}); u některých z odebraných vzorků je již pokles poměrně významný, může vyvolat zvýšené opotřebení v důsledky zhoršení mazací funkce oleje).

U ostatních vozidel je koncentrace protioděrových aditiv dostatečná, olej tedy dobře plní svoji ochrannou funkci (během provozu došlo ve srovnání s novým olejem zpravidla jen k nepatrnému poklesu obsahu aditiv). Výměnný interval je z tohoto hlediska správně stanoven a provozovatelem dodržován.

- Vzorky motorových olejů vykazují v jediném případě (Škoda Fabia 1,2 HTP 47 kW) nadměrnou kontaminaci sloučeninami dusíku (projevuje se ostrým píkem na vlnočtu cca $1610\text{--}1630\text{ cm}^{-1}$), která může být způsobena profukem spalných plynů do prostoru klikové skříně netěsnostmi mezi pístem a válcem.
- V několika vzorcích byla identifikována přítomnost oxidačních produktů v oblasti $1720\text{--}1780\text{ cm}^{-1}$ (vozidlo Peugeot 307 SW 2.0); příčinou je oxidace uhlovodíkových složek oleje (skupina C=O) při dlouhodobém zatěžování oleje vysokými teplotami resp. při překročení výměnné lhůty.
- Nebyl prokázán nález plochého píku v oblasti $3300\text{--}3600\text{ cm}^{-1}$ ani trojice píků na vlnočtu $880, 1040$ a 1080 cm^{-1} signalizující průnik vody resp. chladicí kapaliny na bázi glykolů do mazacího systému.
- Pouze dva vzorky (z vozidel Volkswagen Caddy 2.0 SDI a Peugeot 307 SW 2.0) vykazují zvýšený obsah sazí, který se projevuje celkovým posunem spektra směrem k vyšším hodnotám absorpance. Saze a karbon způsobují vyšší absorpci infračerveného záření vzorkem (sleduje se v oblasti kolem 2000 cm^{-1} , kde se u olejů ve spektru nevyskytují žádné píky či pásy).
- V žádném ze vzorků nebylo prokázáno závažné snížení obsahu vysokoteplotních antioxidantů ($1180\text{--}1120\text{ cm}^{-1}$)
- Ve dvou případech (Fiat Brava 1,4 a jen mírně u vozidla Škoda Fabia 1,2 HTP 47 kW) byl zjištěn průnik paliva do oleje (oblast $815\text{--}750\text{ cm}^{-1}$).

- U žádného z odebraných vzorků nedošlo k poklesu absorpance píku $\sim 1737 \text{ cm}^{-1}$. Nelze tedy usuzovat na částečný rozklad modifikátorů viskozity (vlnočet odpovídá skupině $=\text{C}=\text{O}$), jehož příčinou je často dlouhodobé intenzivní mechanické namáhání oleje a následná destrukce polymeru. Důsledkem je pak zhoršení viskozitního indexu a pokles vysokoteplotní viskozity, tedy zhoršení mazání při vysokých provozních teplotách.

3.3.4 Souhrn experimentálních výsledků a doporučení pro uživatele

V kap. 3.3.1, 3.3.2 a 3.3.3 jsou uvedeny výsledky analýz vzorků olejů, postupně odebíraných z šesti sledovaných vozidel v období XI/2010–V/2011. Dílčí závěry přímo navazují na použité metody, tj. analýzu částic na laserovém analyzátoru SpectroLNF Q200, na analytickou ferrografii a FTIR spektrometrii.

V této kapitole jsou shrnuty jednotlivé dílčí výsledky a jsou zde formulována doporučení pro uživatele resp. provozovatele jednotlivých vozidel.

Fiat Brava 1.4

Vozidlo je provozováno jako soukromé, celkově ujetu cca 150 tisíc km.

Částicovou i ferrografickou analýzou bylo prokázáno zvýšené opotřebení, způsobené pravděpodobně nízkou viskozitou oleje (souběžným měřením na LNF byly stanoveny hodnoty dynamické viskozity $\sim 30 \text{ mPa}\cdot\text{s}/40 \text{ }^\circ\text{C}$), stav se nezlepšil ani po výměně oleje (první náplň – Divinol Multilight 10W/40, druhá náplň po výměně 77 MotorOil SM 5W/40). Na základě analýzy infračerveného spektra (kap. 3.3.3) je zřejmé, že olej je ředěn palivem, nemá dostatečnou mazací schopnost a obsahuje proto velký počet otěrových částic všech tříd.

Doporučení: provést výměnu oleje SAE 5W/40 za 10W/40 a zjistit důvod průniku paliva do oleje.

Škoda Fabia 1.2 HTP 47 kW

Soukromé vozidlo, pravidelná údržba, v poměrně dobrém stavu i po ujetí 100 tisíc km. Částicová analýza neprokázala anomální trendy. Vzhledem k průniku spalných plynů do oleje a k slabému průniku paliva je vhodné provést podrobnější kontrolu (nejedná se však o havarijní stav). Olej vykazuje pokles koncentrace protiotěrových aditiv.

Doporučení: údržbu zaměřit na kontrolu těsnosti spalovacího prostoru (zejména stavu pístních kroužků), používaný olej vyhovuje (doporučeno mírné zkrácení výměnné lhůty).

Peugeot 307 SW 2.0

Firemní automobil (naftový motor), náročný provoz, ujetu cca 125 tisíc km.

Překročení výměnné lhůty o 5000 km se projevilo velmi vysokým počtem otěrových částic (třída 5–15 μm ve druhém odběru téměř 2 mil. částic na 1 ml oleje, mimořádně vysoký je i obsah velkých částic $< 50 \mu\text{m}$), je nutno průběžně doplňovat nový olej (což obsah částic v objemové jednotce přiměřeně snižuje). Na ferrogramech se vyskytují velké částice, svědčící o zvýšeném opotřebení povrchových vrstev, z nichž se odlupují ploché lupínkovité útvary. FTIR spektrometrie prokázala vyčerpání protiotěrových aditiv a přítomnost termooxidačních produktů (jednalo se o vzorek po překročené výměnné lhůtě).

Doporučení: dodržovat (případně na základě častější kontroly zkrátit) výměnné lhůty (včetně výměny filtrů).

Škoda Fabia 1.2 40 kW

Firemní vozidlo, ujetu 260 tisíc km; vzhledem ke způsobu provozu a vysokému proběhu vyžaduje časté doplňování olejové náplně (dochází k úkapům oleje). Tomu odpovídají i výsledky částicové analýzy na LNF i ferrografu. Olej nebyl hodnocen FTIR spektrometrií (nebylo možno získat vzorek původního nepoužitého oleje).

Doporučení: dodržovat výměnné lhůty, nepřetěžovat vozidlo, dbát na pravidelnou údržbu – provést kontrolu těsnosti a opravu olejové vany.

Volkswagen Caddy 2.0 SDI

Firemní vozidlo, ujeté téměř 260 tisíc km – ve velmi dobrém stavu, počty otěrových částic jsou poměrně nízké (viz. též dokumentaci ferrografické analýzy v kap. 3.3.2). Sledování proběhlo při sedmi postupných odběrech. Během této doby byl olej 2x vyměněn (bez průběžného dolévání). Nebyly zjištěny závažnější chemické změny v oleji, koncentrace aditiv je dostatečná.

Doporučení: vyhovuje stávající systém údržby i používaný olej.

Škoda Octavia Tour Trumf Combi 1,9 TDI PD

Firemní vozidlo (naftový motor), v dobrém stavu (nízký otěr). V průběhu sledování byl doléván olej, což ovlivnilo výsledky částicové analýzy na laserovém analyzátoru i na ferrografu. Olej nebyl hodnocen FTIR spektrometrií (nebylo možno získat vzorek původního nepoužitého oleje).

Doporučení: vyhovuje stávající systém údržby i používaný olej.

4. ZÁVĚR

Tato diplomová práce byla zaměřena na hodnocení otěrových částic v motorových olejích, jejichž vzorky byly odebrány z osobních automobilů. Byly použity pokročilé instrumentální metody – analýza s použitím laserového analyzátoru částic a klasická analytická ferrografie. Na analyzátoru SpectroLNF Q200, který byl na DFJP nově pořízen na konci r. 2010, byly provedeny úvodní experimenty, ověřena metodika a základní postupy analýzy motorových olejů

jak analýzy částic, tak stanovení dynamické viskozity. Použití laserového analyzátoru částic v tribodiagnostické laboratoři DFJP umožňuje získat hlubší poznatky o procesech, které probíhají v mazaných systémech různých druhů vozidel. Přínosem analyzátoru pro rozšíření dosavadních znalostí a informací v oblasti tribologie je především možnost kvantifikace počtu a morfologie částic obsažených v mazacích olejích (do budoucna se předpokládá využití přístroje i při analýzách převodových a hydraulických olejů, používaných v dopravních prostředcích i průmyslových strojích).

Jako doplňující metoda umožňující posouzení míry degradace maziv v provozních podmínkách byla aplikována infračervená spektrometrie.

Cílem této práce bylo vypracovat přehled současného stavu poznatků o možnostech uplatnění částicové analýzy při sledování procesu opotřebení motorů silničních vozidel a o procesu degradace motorových olejů v provozu, analyzovat vzorky odebraných olejů na laserovém analyzátoru, na ferrografu a na infračerveném spektrometru, výsledky experimentálních prací vyhodnotit a závěry zpracovat ve formě doporučení pro uživatele v praxi.

Teoretická část práce je zaměřená na problematiku tribotechniky a tribotechnické diagnostiky, na obecnou charakterizaci funkcí a vlastností motorového oleje a na definování příčin opotřebení oleje v provozu. Závěr této části práce je věnován vybraným metodám tribotechnické diagnostiky – jsou v ní podrobně popsány principy použitých experimentálních metod.

V experimentální části práce byla provedena analýza vzorků motorových olejů, odebíraných během provozu v období listopad 2010 až květen 2011 ze šesti sledovaných vozidel

(Fiat Brava 1,4 12V, Škoda Fabia 1,2 HTP 47 kW, Peugeot 307 SW 2.0, Škoda Fabia 1,2 40 kW, Volkswagen Caddy 2.0 SDI, Škoda Octavia Tour Trumf Combi 1,9 TDI PD).

Výsledky této diplomové práce prokázaly, že použité metody významně přispívají k rozšíření možností tribotechnické diagnostiky v oblasti hodnocení provozního opotřebení motorových olejů pro silniční vozidla i součásti, které jsou těmito oleji mazány. Kombinace těchto metod umožňuje komplexně zhodnotit jak průběh opotřebení motoru, tak i stupeň degradace oleje a jeho použitelnost pro další provoz.

Na základě výsledků provedených provozních a instrumentálních zkoušek byla vypracována doporučení uživatelům sledovaných automobilů; budou jim dána k dispozici.

Ferrografická fotodokumentace zhotovená v rámci této práce bude použita k doplnění atlasu otěrových částic, který je zpracováván na katedře dopravních prostředků a diagnostiky Dopravní fakulty Jana Pernera Univerzity Pardubice.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] STODOLA, J. *Provozní spolehlivost a diagnostika*. Brno: Jirí Stodola, 2002.
- [2] *Tribotechnika – základy oboru*. [online]. [cit. 2011–05–16]. Dostupné na WWW: <<http://www.tribotechnika.cz>>.
- [3] MACHALÍKOVÁ, J., CHÝLKOVÁ, J., ŠELEŠOVSKÁ, R. *Tribotechnické aplikace vybraných instrumentálních metod*. Vědeckotechnický sborník ČD č. 21/2006. [online]. [cit. 2011–05–16]. Dostupné na WWW: <<http://www.cd rail.cz/VTS/CLANKY/vts21/2112.pdf>>.
- [4] *Tribotechnická diagnostika*. Technický týdeník 19/2007. [online]. [cit. 2011–03–20]. Dostupné na WWW: <<http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=3198&mark>>.
- [5] STODOLA, J., MACHALÍKOVÁ, J. *Spolehlivost a diagnostika BSV*. Brno: Univerzita Obrany, 2006. ISBN 80–7231–167–0.
- [6] TROYER, D., FINCH, J. *Oil analysis basics*. Tulsa, Oklahoma USA: Noria Corporation 2001. ISBN 0–9675964–1–7.
- [7] KOCOUREK, L. *Analýza mazacích olejů v tribotechnické diagnostice*. Univerzita Pardubice: Diplomová práce, 2010.
- [8] *Základové oleje* [online]. [cit. 2011–05–16]. Dostupné na WWW: <http://www.oleje.cz/index.php?left=main&page=uzitecne_zakl_oleje>.
- [9] *Aditiva – přísady do olejů* [online]. [cit. 2011–05–16]. Dostupné na WWW: <http://www.oleje.cz/index.php?left=main&page=uzitecne_aditiva>.
- [10] PILÁRIK, M., PABST, J. *Automobily pro 2. a 3. ročník SOU*. 3., přeprac. vyd. Praha: 1997 ISBN 80-86073-02-5.
- [11] MACHALÍKOVÁ J. *Diagnostika provozních kapalin – návody na cvičení*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2010.
- [12] ČERNÝ, J., *Vlastnosti motorových olejů – HTHS viskozita a lehkoběžné oleje*. [online]. [cit. 2011–05–16]. Dostupné na WWW: <http://www.oleje.cz/index.php?left=main&page=clanky_vlastnosti_oleju3>.
- [13] ČERNÝ, J., *Vlastnosti motorových olejů – Viskozita*. [online]. [cit. 2011–05–16]. Dostupné na WWW: <http://www.oleje.cz/index.php?left=main&page=clanky_vlastnosti_oleju2>.

UNIVERZITA PARDUBICE Dopravní fakulta Jana Pernera	DIPLOMOVÁ PRÁCE	Strana - 86 -
---	-----------------	---------------

- [14] STRAKA, B.: *Motorové oleje a tribotechnická diagnostika naftových motorů*. Praha: NADAS, 1986.
- [15] KRETHER, R.: *Possibilities and frontiers of ferrography*. Tribologie und Schmierungstechnik. Vol. 48, no. 4, pp. 48-54. July-Aug. 2001.
- [16] Spectro CS. *Návod k obsluze – Příručka operátora pro obsluhu a údržbu přístroje SpectroLNF Q200*.
- [17] *Tribotechnika – Časopis 1 /2008* [online]. [cit. 2011–05–16]. Dostupné na WWW: <<http://www.tribotechnika.cz/doc/TTI-1-2008.pdf>>.
- [18] FILICKY, D., SEBOK, T., MALTE, L., ANDERSON, D. *LaserNet Fines – A New Tool for the Oil Analysis Toolbox*. Machinery Lubrication, Noria. [online]. [cit. 2011–04–10]. Dostupné na WWW: <<http://www.machinerylubrication.com/Read/383/lasernet-fines-oil-analys>>.
- [19] *Particle Characterization – HORIBA*. [online]. [cit. 2011-05-16]. Dostupné na WWW: <<http://www.horiba.com/scientific/products/particle-characterization/>>.
- [20] *Analytical Tools to Detect and Quantify Large Wear Particles in Used Lubricating Oil – by Spectro Inc.* [online]. [cit. 2011–04–06]. Dostupné na WWW: <<http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=3394>>.
- [21] *Atlas otěrových částic pro ferrografii*. Ostrava: REO TRADE s.r.o.
- [22] BARRETT, M., MCMAHON, M. *Analytical Ferrography – Make It Work For You*. Machinery Lubrication, Noria. [online]. [cit. 2011–04–19]. Dostupné na WWW: <<http://www.machinerylubrication.com/Read/5/analytical-ferrography>>.
- [23] *Infračervená spektrometrie* [online]. [cit. 2011-05-16]. Dostupné na WWW: <www.tribologie.nl/book/contents.htm>.
- [24] KOMÍNKOVÁ, J., MESTEK, O. *Atomová absorpční spektrometrie* [online]. [cit. 2011-05-16]. Dostupné na WWW: <<http://www.vscht.cz/anl/lach2/AAS.pdf>>.
- [25] 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. 16. března 2010]. Dostupné na WWW: <<http://www.machinerylubrication.com/Read/997/understand-lubricants>>.
- [26] ROBINSON, N., *Monitoring Oil Degradation With Infrared Spectroscopy*. Machinery Lubrication, Noria. [online]. [cit. 2010–04–04]. Dostupné na WWW: <<http://www.machinerylubrication.com/Read/1109/oil-degradation-spectroscopy>>.

UNIVERZITA PARDUBICE Dopravní fakulta Jana Pernera	DIPLOMOVÁ PRÁCE	Strana - 87 -
---	-----------------	---------------

- [27] HANYKO PRAHA, s. r. o., *Firemní materiály ke kameře Micrometrics 318CU*.
- [28] TEPLÝ, M. *Analýza částic separovaných z olejových filtrů*. Univerzita Pardubice: Bakalářská práce, 2008.
- [29] SOUKENKA, M. *Analýza opotřebení olejů a jimi mazaných součástí*. Univerzita Pardubice: Diplomová práce, 2007.
- [30] KRTIČKA, F. *Analýza paliv a maziv pro silniční vozidla s využitím moderních instrumentálních metod*. Univerzita Pardubice: Bakalářská práce, 2005.
- [31] LOUDA, J. *Analýza procesu provozního opotřebení olejů pro silniční vozidla se zaměřením na instrumentální metody*. Univerzita Pardubice: Diplomová práce, 2004.
- [32] DOLEŽAL, J. *Analýza vybraných provozních hmot pro silniční vozidla s využitím moderních instrumentálních metod*. Univerzita Pardubice: Diplomová práce, 2005.
- [33] TEPLÝ, M. *Aplikace částicové analýzy v tribodiagnostice*. Univerzita Pardubice: Diplomová práce, 2010.
- [34] CHROUST, J. *Aplikace FTIR spektrometrie při analýze provozního opotřebení olejů pro železniční vozidla*. Univerzita Pardubice: Diplomová práce, 2001.
- [35] SOUKENKA, M. *Aplikace moderních instrumentálních metod v tribotechnické diagnostice silničních vozidel*. Univerzita Pardubice: Bakalářská práce, 2005.
- [36] MÁLEK, T. *Aplikace moderních instrumentálních metod v tribotechnické diagnostice silničních vozidel a zemědělských strojů*. Univerzita Pardubice: Diplomová práce 2004.
- [37] BAŽANT, L. *Aplikace vybraných experimentálních metod při optimalizaci výměnných lhůt maziv pro dopravní prostředky*. Univerzita Pardubice: Diplomová práce, 2009.
- [38] MOTL, O. *Aplikace vybraných experimentálních metod v tribotechnické diagnostice*. Univerzita Pardubice: Diplomová práce, 2010.
- [39] SVOBODA, T. *Aplikace vybraných instrumentálních metod v analýze mazacích olejů*. Univerzita Pardubice: Diplomová práce, 2006.
- [40] *Plošně ekvivalentní průměr* [online]. [cit. 2011-05-18]. Dostupné na WWW: <http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/plosne_ekvivalentni_prumer_castice.html>.

SEZNAM TABULEK

- Tab. 1 Přehled vlnočtů kontaminantů běžně přítomných v mazacích olejích
- Tab. 2 Olejová náplň Divinol 10W-40
- Tab. 3 Olejová náplň 77 Motor Oil SM 5W-40
- Tab. 4 Olejová náplň ABX QUALITY 5W-40
- Tab. 5 Olejová náplň Mobil XHP LE 10W-40
- Tab. 6 Olejová náplň Mobil 5W-40
- Tab. 7 První výměna olejové náplně: Castrol Magnatec 5W-40
- Tab. 8 Druhá výměna olejové náplně: Castrol Magnatec 5W-40
- Tab. 9 Olejová náplň Shell Helix Ultra Extra 5W-30
- Tab. 10 Částice zachycené na vstupním filtru SpectroLNF Q200
- Tab. 11 Výsledky hodnocení opakovatelnosti (s jednorázovou homogenizací před začátkem série analýz)
- Tab. 12 Statistické vzorce
- Tab. 13 Výsledky hodnocení opakovatelnosti (s homogenizací před každým měřením)
- Tab. 14 Počty částic (Fiat Brava 1,4) – první výměna olejové náplně
- Tab. 15 Počty částic (Fiat Brava 1,4) – druhá výměna olejové náplně
- Tab. 16 Počty částic (Škoda Fabia 1,2 HTP 47 kW)
- Tab. 17 Počty částic (Peugeot 307 SW 2.0)
- Tab. 18 Počty částic (Škoda Fabia 1,2 40 kW)
- Tab. 19 Počty částic (Volkswagen Caddy 2.0 SDI) – první výměna olejové náplně
- Tab. 20 Počty částic (Volkswagen Caddy 2.0 SDI) – druhá výměna olejové náplně
- Tab. 21 Počty částic (Škoda Octavia Tour Trumf Combi 1,9 TDI PD)
- Tab. 22 Fiat Brava 1,4 12V (první výměna olejové náplně)
- Tab. 23 Fiat Brava 1,4 12V (druhá výměna olejové náplně)
- Tab. 24 Škoda Fabia 1,2 HTP 47 kW

Tab. 25 Peugeot 307 SW 2.0

Tab. 26 Škoda Fabia 1,2 40 kW

Tab. 27 Volkswagen Caddy 2.0 SDI (první výměna olejové náplně)

Tab. 28 Volkswagen Caddy 2.0 SDI (druhá výměna olejové náplně)

Tab. 29 Škoda Octavia Tour Trumf Combi 1,9 TDI PD

SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1 Schéma laserového automatického čítače částic
- Obr. 2 Princip činnosti LNF
- Obr. 3 Příklady zobrazení částic pomocí LNF
- Obr. 4 Příklad výstupu komplexní částicové analýzy provedené na SpectroLNF Q200
- Obr. 5 Schematické znázornění ferrogramu
- Obr. 6 Typické pásy v FTIR spektru motorového oleje
- Obr. 7 Fiat Brava 1,4 12V [vlastní foto]
- Obr. 8 Škoda Fabia 1,2 HTP 47 kW [vlastní foto]
- Obr. 9 Peugeot 307 SW 2.0 [vlastní foto]
- Obr. 10 Škoda Fabia 1,2 40 kW [vlastní foto]
- Obr. 11 Volkswagen Caddy 2.0 SDI [vlastní foto]
- Obr. 12 Škoda Octavia Tour Trumf Combi 1,9 TDI PD [vlastní foto]
- Obr. 13a Pracoviště LNF analýzy [vlastní foto]
- Obr. 13b Ultrazvuková lázeň pro odplynění vzorků [vlastní foto]
- Obr. 14 Digitální mikroskop s USB připojením [vlastní foto]
- Obr. 15 Pracoviště analytické Ferrografie [vlastní foto]
- Obr. 16 FTIR spektrometr Vector 22 s HATR-jednotkou [vlastní foto]
- Obr. 17 Zobrazení testovacích mikrokuliček o průměru $49,0 \mu\text{m} \pm 1,4 \mu\text{m}$
- Obr. 18 Průměr ekvivalentního kruhu d_A , ECAD (schématické znázornění) – průměr kruhu, který má stejnou plochu jako objekt
- Obr. 19 Snímky kruhových částic s údaji o jejich velikosti
- Obr. 20 Měření bez průběžné homogenizace vzorku (v μm)
- Obr. 21 Měření s průběžnou homogenizací vzorku (v μm)

- Obr. 22 Příklad výstupu částicové analýzy vzorků odebraných z osobního automobilu Peugeot (modrý – odběr 7. 11. 2010, zelený – odběr 21. 12. 2010 po 6181 km, na olejovou náplň ujetu 11 435 km, k 21. 12. 2010 proběh vozidla celkem 117 135 km); motorový olej Mobil XHP LE 10W/40
- Obr. 23 Trend celkového počtu částic (Fiat Brava 1,4 – první výměna olejové náplně)
- Obr. 24 Částice Fiat Brava 1,4 (vzorek po ujetí 5 822 km na olej)
- Obr. 25 Počet částic (Fiat Brava 1,4) – první výměna olejové náplně
- Obr. 26 Trend celkového počtu částic (Fiat Brava 1,4 – druhá výměna olejové náplně)
- Obr. 27 Částice Fiat Brava 1.4 (vzorek po ujetí 482 km na olej)
- Obr. 28 Počet částic (Fiat Brava 1,4) – druhá výměna olejové náplně
- Obr. 29 Trend celkového počtu částic (Škoda Fabia 1,2 HTP 47 kW)
- Obr. 30 Částice Škoda Fabia 1,2 HTP 47 kW (vzorek po ujetí 5 356 km na olej)
- Obr. 31 Počet částic (Škoda Fabia 1,2 HTP 47 kW)
- Obr. 32 Trend celkového počtu částic (Peugeot 307 SW 2.0)
- Obr. 33 Částice Peugeot 307 SW 2.0 (vzorek po ujetí 14 438 na olej)
- Obr. 34 Počet částic (Peugeot 307 SW 2.0)
- Obr. 35 Trend celkového počtu částic (Škoda Fabia 1,2 40 kW)
- Obr. 36 Částice Škoda Fabia 1,2 40 kW (vzorek po ujetí 3 480 km na olej)
- Obr. 37 Počet částic (Škoda Fabia 1,2 40 kW)
- Obr. 38 Trend celkového počtu částic (Volkswagen Caddy 2.0 SDI – první výměna olejové náplně)
- Obr. 39 Částice Volkswagen Caddy 2.0 SDI (vzorek po ujetí 2 000 km na olej)
- Obr. 40 Trend celkového počtu částic (Volkswagen Caddy 2.0 SDI – druhá výměna olejové náplně)
- Obr. 41 Částice Volkswagen Caddy 2.0 SDI (vzorek po ujetí 6 005 km na olej)
- Obr. 42 Počet částic (Volkswagen Caddy 2.0 SDI) – první a druhá výměna olejové náplně
- Obr. 43 Trend celkového počtu částic (Škoda Octavia Tour Trumf Combi 1,9 TDI PD)

- Obr. 44 Částice Škoda Octavia Tour Trumf Combi 1,9 TDI PD (vzorek po ujetí 12 871 km na olej)
- Obr. 45 Počet částic (Škoda Octavia Tour Trumf Combi 1,9 TDI PD)
- Obr. 46a Infračervené spektrum vzorků z jednotlivých odběrů motorového oleje z vozidla (celý měřený rozsah)
- Obr. 46b Detail oblasti $1800\text{--}700\text{ cm}^{-1}$
- Obr. 46c Detail oblasti $1050\text{--}700\text{ cm}^{-1}$ (šipky označují píky, které prokazují průnik paliva do oleje v oblasti $<950\text{ cm}^{-1}$)
- Obr. 47a Infračervené spektrum vzorků z jednotlivých odběrů motorového oleje z vozidla (celý měřený rozsah)
- Obr. 47b Detail oblasti $1800\text{--}700\text{ cm}^{-1}$ (oblast $\sim 1600\text{ cm}^{-1}$ – průnik spalných plynů (NO-skupina), 970 cm^{-1} – úbytek aditiv, $< 800\text{ cm}^{-1}$ – mírný průnik paliva)
- Obr. 48a Infračervené spektrum vzorků z jednotlivých odběrů motorového oleje z vozidla (celý měřený rozsah)
- Obr. 48b Detail oblasti $1700\text{--}700\text{ cm}^{-1}$ (oblast $\sim 970\text{ cm}^{-1}$ – úbytek aditiv, 1750 cm^{-1} – nárůst oxidačních produktů)
- Obr. 48c Detail oblasti $1800\text{--}1550\text{ cm}^{-1}$ (nárůst oxidačních produktů)
- Obr. 48d Detail oblasti $1800\text{--}1550\text{ cm}^{-1}$ (úbytek aditiv)
- Obr. 49a Infračervené spektrum vzorků z jednotlivých odběrů motorového oleje z vozidla (celý měřený rozsah)
- Obr. 49b Detail oblasti $1800\text{--}700\text{ cm}^{-1}$
- Obr. 50 Detail reálných spekter v oblasti ($2400\text{--}2280\text{ cm}^{-1}$) s dvojitým píkem oxidu uhličitého

PŘÍLOHY

Kompletní dokumentace k experimentální části práce je uvedena na přiloženém CD.