

ANALÝZA OPOTŘEBENÍ A SPOTŘEBY PALIVA SPALOVACÍHO MOTORU - LASEROVÝ ANALYZÁTOR ČÁSTIC LNF

ANALYSIS OF COMBUSTION ENGINE'S WEAR AND FUEL CONSUMPTION – LASERNET FINES ANALYZER

Kateřina Veselá¹, Martin Pexa², Jakub Mařík³, Zdeněk Aleš⁴

Anotace: Provozní schopný a kvalitní výrobek je závislý na spolehlivosti celého výrobního zařízení, která jsou ovlivněna efektivními a pravidelnými údržbami, včetně kontroly a doplňování maziv a dalších provozních kapalin. Pro určení stavu maziva z provozních částí strojů lze využít laserový analyzátor částic LaserNet Fines®-C. Tento přístroj se používá ke klasifikaci částic (adhezivní, abrazivní, únavové, nekovové), pro přímou analýzu opotřebení a znečištění v použitých vzorcích oleje. Kromě získaných informací o počtu a velikosti jednotlivých částic jsou k hodnocení analyzovaného vzorku oleje použity normované kódy čistoty (ISO4406:1999). Příspěvek popisuje využití laserového analyzátoru částic při analýze maziva (motorový olej) z automobilu Škoda Felicia Combi 1.3 MPI během jeho prvních ujetých 40.000 kilometrů po celkové generální opravě. V souvislosti s opotřebením je uváděna také zaznamenávaná spotřeba používaného paliva LPG (zkapalněný ropný plyn).

Klíčová slova: laserový analyzátor částic, mazivo, opotřebení, spotřeba paliva.

Summary: Serviceable and quality product is dependent on reliable of the entire production device that are influenced by effective and regular maintenance, including checking and replenishing lubricants and other operating fluids. LaserNet Fines®-C can be used for determining condition of the lubricant and operating parts of machinery. This device is used to classify particles (adhesive, abrasive, fatigue, non-metallic) for direct analysis of wear and contamination in used oil samples. In addition, it is possible to obtain information about the number and size of individual particles and evaluate them according standardized cleanliness code (ISO 4406:1999). This paper describes the use of a laser particle analyzer to analyze lubricants (motor oil) from Skoda Felicia Combi 1.3 MPI during its first 40,000 km after complete overhaul. Consumption of used fuel LPG (liquefied petroleum gas) is also tracked in relation to the wear.

Key words: Particle Laser Analyzer, lubricant, wear, fuel consumption.

¹ Ing. Kateřina Veselá, Česká zemědělská univerzita v Praze, Technická fakulta, Katedra jakosti a spolehlivosti strojů, kamýčká 129, 16521 Praha 6 - Suchdol, Tel.: +420 224 383 309, E-mail: kvesela@tf.czu.cz

² doc. Ing. Martin Pexa, Ph.D., Česká zemědělská univerzita v Praze, Technická fakulta, Katedra jakosti a spolehlivosti strojů, kamýčká 129, 16521 Praha 6 - Suchdol, Tel.: +420 224 383 278, E-mail: pexa@tf.czu.cz

³ Ing. Jakub Mařík, Česká zemědělská univerzita v Praze, Technická fakulta, Katedra jakosti a spolehlivosti strojů, kamýčká 129, 16521 Praha 6 - Suchdol, Tel.: +420 224 383 304, E-mail: marikj@tf.czu.cz

⁴ Ing. Zdeněk Aleš, Ph.D., Česká zemědělská univerzita v Praze, Technická fakulta, Katedra jakosti a spolehlivosti strojů, kamýčká 129, 16521 Praha 6 - Suchdol, Tel.: +420 224 383 254, E-mail: ales@tf.czu.cz

ÚVOD

Poruchy a jimi vyvolaná přerušení provozu strojů jsou způsobeny celou řadou vlivů a procesů, které působí a probíhají přímo ve strojích. Tyto vlivy mají za následek změny vlastností strojních součástí. Tyto změny jsou prvotními technickými příčinami poruch. Souhrn těchto procesů se nazývá mechanismus poruch.

Při přibližování se povrchů se porušuje celistvost adsorpční vrstvy i oxidové vrstvy a povrchy tak přecházejí do kovového kontaktu (2). To má za následek tvorbu mikrospojů. V důsledku relativního pohybu povrchů dochází k oddělování kovových částic a přemísťování materiálu povrchů (7). Intenzita tohoto procesu závisí na řadě činitelů, z nichž mezi nejdůležitější se zařazují druh a vlastnosti vzájemně působících povrchů těles, přítomnost a vlastnosti média mezi povrchy, charakteristiky relativního pohybu povrchů a zatížení. Různé kombinace těchto uvedených faktorů působí různé druhy poškozování funkčních ploch. Rozlišují se tyto kategorie poškození: opotřebení, koroze, otláčení, deformace, trhliny a lomy, ostatní poškození (11).

Opotřebení je trvalá nežádoucí změna povrchů nebo rozměrů tuhých těles, vyvolaná vzájemným působením funkčních povrchů nebo funkčních povrchů a média, které opotřebení vyvolává. Projevuje se jako odstraňování nebo přemísťování částic hmoty z funkčního povrchu mechanickými účinky, doprovázenými někdy i jinými vlivy, jako jsou například chemické vlivy nebo elektrochemické. Obvykle se opotřebení rozlišuje na šest základních skupin: adhezivní, abrazivní, erozivní, kavitační, únavové a vibrační (11). Povahu opotřebení charakterizuje tvar, velikost a povrchová textura částic (10, 15). Dále jsou popsány typy opotřebení, které dokáže vyhodnotit použitý laserový analyzátor LaserNet Fines.

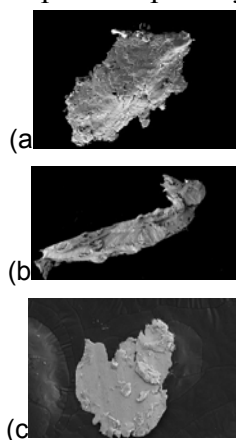
Adhezivní opotřebení – Adhezivní opotřebení je způsobeno silnými adhezivními silami, které se vytvořily mezi materiály v kontaktu (obr. 1a). Vzhledem k tomu, že styčné povrchy nejsou hladké, dochází ke kontaktům lokálně ve styku nerovností povrchů. Ve styku mikronerovností dochází k elastické a plastické deformaci (17, 18).

Abrazivní opotřebení – Abrazivní opotřebení je poškozování povrchu materiálu tvrdými částicemi nebo tvrdým drsným povrchem jiného materiálu, při čemž dochází k tvorbě rýh (obr. 1b a 2). Tvrdé částice při tomto procesu mohou vnikat do povrchu materiálu. Velikost abrazivního opotřebení roste s rostoucí tvrdostí abrazivních částic a naopak klesá s rostoucí tvrdostí opotřebovávaného materiálu (17, 19).

Únavové opotřebení – Únavové opotřebení je charakteristické postupnou kumulací poruch v povrchové vrstvě při opakovaných kontaktních napětích (obr. 1c a 3). Dosahují-li tato napětí hodnot nad mezí kluzu, jde o nízkocyklickou únavu, jsou-li pod mezí kluzu, jde o vysokocyklickou únavu (11, 17).

Je ale otázkou, jak zjistit o jaký druh poškození stroje se jedná, když stroj nelze demontovat na jednotlivé části. Kromě vibrodiagnostiky (vhodné pro rotační stroje - spektrum vibrací (3, 5)) a termodiagnostiky (nedestruktivní defektoskopie (8)) se jako jedno z významných řešení nabízí analýza oleje (tribodiagnostika), který je přímo ve styku s funkčními plochami namáhaných součástí a opotřebení (otěry) se v oleji přímo usazuje (12). Na základě vhodně zvolené analýzy lze zjistit, o jaký druh opotřebení funkčních ploch se jedná a zda je stav již havarijní či nikoli. V příspěvku je uvedena analýza částic pomocí

laserového analyzátoru LNF-C ve vzorcích polosyntetického motorového oleje Mogul GX-FE 10W-40 z motoru Škoda Felicie 1,3 MPI po generální opravě. Dále je k průběhům opotřebení doplněn průběh spotřeby paliva v závislosti na ujeté vzdálenosti.



Zdroj (16)

Obr. 1 - Částice opotřebení: a) adhezivní, b) abrazivní, c) únavová



Zdroj (9)

Obr. 2 - Příprava vzorku před analýzou povrchu



Zdroj (6)

Obr. 3 - Únavové opotřebení ložiska

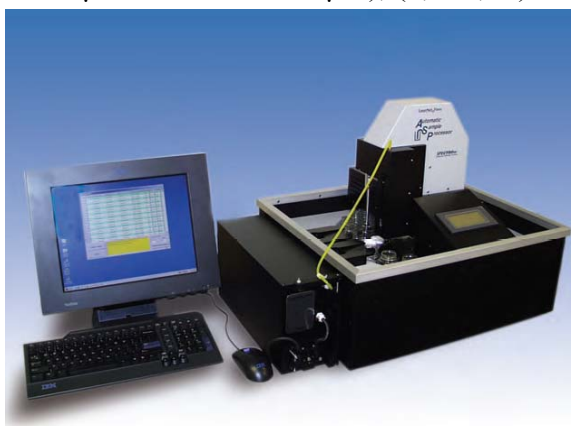
1. MATERIÁL A METODY

Laserový analyzátor částic LNF (obr. 4) je laboratorní analytický přístroj, který kombinuje techniku analýzy olejů podle tvaru částic, a zároveň klasifikuje jejich počet. Analyzuje olejové vzorky z různých typů strojů a zařízení, u kterých je monitorován jejich stav pomocí daného programu. Monitorování je založeno především na morfologických analýzách a velikosti částic abnormálního opotřebení, které jsou vytvořeny z vnitřních částí stroje. Analyzátor vyhodnotí nález částic v oleji a porovná ji s historií předchozích výsledků na daném stroji (13).

Z hlediska diagnostiky stroje a určení jeho opotřebení, je optimální kombinace stanovení obsahu otěrových kovů a stanovení velikosti a charakteru částic, které LNF je schopen analyzovat. Podle obrysu jsou klasifikovány částice s nejdelším rozměrem, větším než 20 μm do několika kategorií a to částice abrazivního opotřebení, částice únavového opotřebení, částice havarijního opotřebení, nekovové částice, vlákna, kapky vody a vzduchové bubliny s dalšími částicemi, které neodpovídají svým tvarem zkoumanému vzorku. Tvar částic specifikuje software podle testu kruhovitosti, aby byly odstraněny bubliny a kapky větší než 20 μm z částic, které počítá za výsledek. Přístroj je také schopen na základě této funkce dávat přibližné výsledky volné vody. LNF procesy ukládá v tisících obrázcích k získání výsledku s ohledem na statistiku.

Počet částic a jejich velikost je také hodnocena tak, aby bylo možné výsledky zobrazit podle normy ISO 4406:1999, takzvaného kódu čistoty (množství částic v kapalině – oleji). Původní zápis podle této normy z roku 1987 byl založen na hodnocení ve dvou rozměrech $\geq 5 \mu\text{m}$ a $\geq 15 \mu\text{m}$. Po novele normy z let 1991 a 1999 bylo hodnocení upraveno na tři hraniční

pásma a to $\geq 4 \mu\text{m}$, $\geq 6 \mu\text{m}$ a $\geq 14 \mu\text{m}$. Používá se i jiné členění, podle normy NAS1638 (5-15 μm , 15-25 μm , 25-50 μm , 50-100 μm a více než 100 μm), (4, 13, 14).



Zdroj (14)

Obr. 4 - Analyzátor částic LNF-C

V uvedeném případě, byl analyzován motorový polosyntetický olej Mogul GX FE 10W-40, který slouží pro mazání motoru 1,3 MPI z vozidla Škoda Felicia Combi. V současné době má vozidlo najeto cca 150 tis. km, ale při proběhu cca 108 tis. Km (v grafech je tento proběh uváděn jako ujetá vzdálenost 0 km) byla provedena generální oprava motoru zahrnující především výměnu ložisek klikového hřídele motoru, výměnu pístních vložek s písty. Základní technické údaje o vozidle jsou uvedeny v tabulce číslo 1.

Tab. 1 - Údaje o testovaném vozidle

Název modelu	Škoda Felicia Combi	Druh motoru	Čtyřdobý čtyřválec
Kategorie vozidla	osobní	Počet rychlostí	5 manuál
Zdvihový objem	1289 cm ³	Max. výkon	50 kW při 5 000 1/min
Nejvyšší rychlost	163 km/h	Celková hmotnost	1460 kg
Počet kilometrů	cca 150000 km	Rok výroby	1998

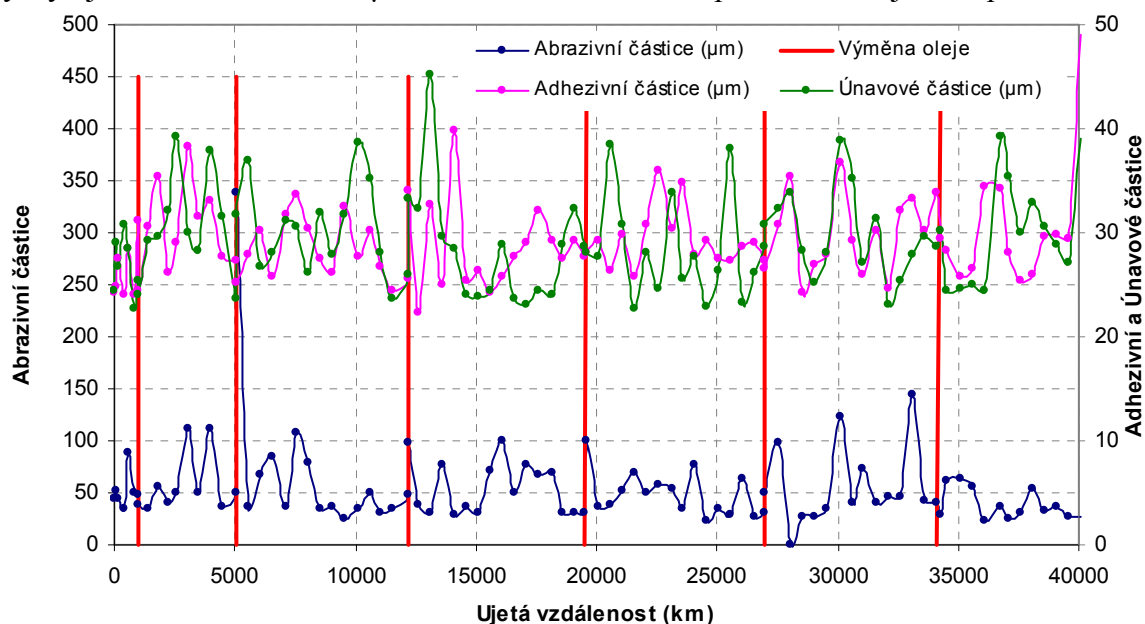
Zdroj (Autoři)

2. VÝSLEDKY

Na obrázku číslo 5 je uveden průběh průměrné velikosti abrazivních, adhezivních a únavových částic opotřebení motoru v závislosti na ujeté vzdálenosti v kilometrech s vyznačenými intervaly výměny olejové náplně. První výměna oleje byla po 1.000 km, které vozidlo absolvovalo na palivo Natural 95. Poté už jezdí na zkapalněný ropný plyn (LPG). Druhý interval výměny byl po 4.000 km a nadále se provádí výměna v intervalu 7.500 km.

Z uvedených závislostí na obrázku číslo 5 vyplývá, že průběh průměrné velikosti částic adhezivního, abrazivního a únavového opotřebení v jednotlivých vzorcích oleje je konstantní a to i přes to, že s ujetou vzdáleností se výrazně měnil celkový počet částic. Před první výměnou (ujetá vzdálenost 1.000 km) byl celkový počet částic ve vzorku motorového oleje až 6x vyšší než v dalším období. Jedná se však převážně o částice menší než 20 μm a tedy pod

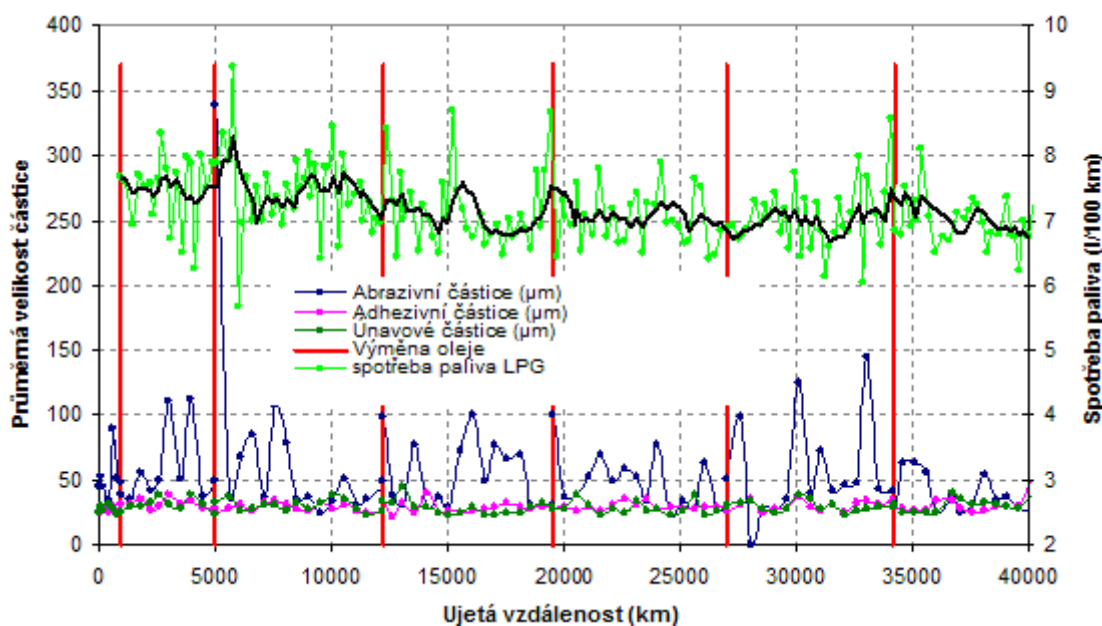
hranicí rozlišitelnosti jednotlivých druhů opotřebení. Také se ve vzorcích oleje téměř nevyskytují částice větší než 50 μm na což má vliv filtrace používané olejové náplně.



Zdroj (Autoři)

Obr. 5 - Průměrná velikost abrazivních, adhezivních a únavových částic opotřebení v závislosti na ujeté vzdálenosti

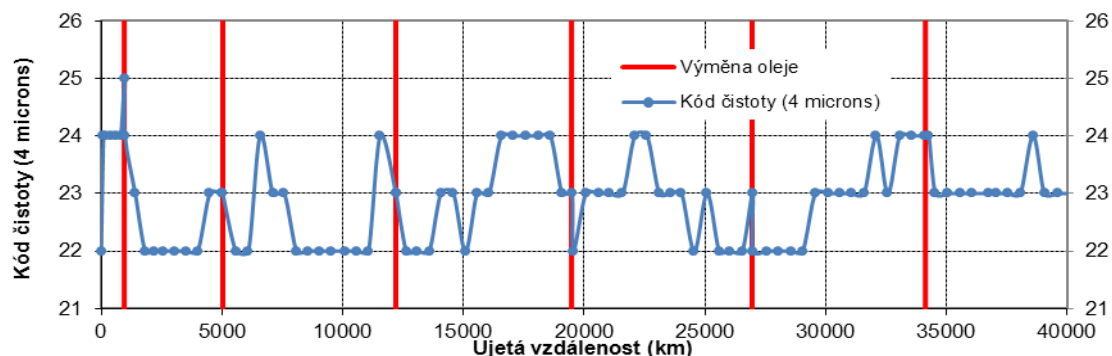
Během celé doby provozu byla také sledována spotřeba paliva (LPG). Její závislost na ujeté vzdálenosti je doplněna do předchozího obrázku číslo 5 a vychází z ní obrázek číslo 6, kde je patrné, že během doby provozu postupně klesla spotřeba paliva v době záběhu. V porovnání s prvními 10.000 km je to snížení spotřeby paliva až o 0,4 l/100 km. Tento klesající trend je patrný do ujeté vzdálenosti 25.000-30.000 km a od té vzdálenosti je spotřeba paliva vyrovnaná.



Zdroj (Autoři)

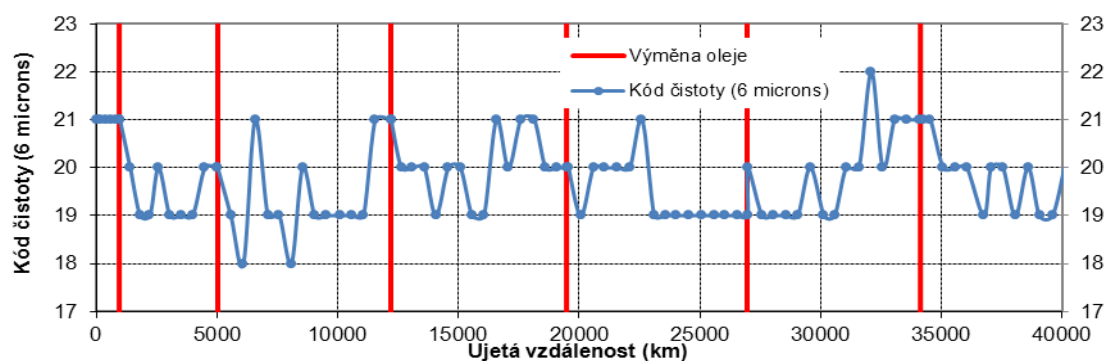
Obr. 6 - Spotřeba paliva (LPG) a průměrná velikost částic v závislosti na ujeté vzdálenosti

Jako ukazatel počtu částic opotřebení v motorovém oleji, který je znázorněn na obrázcích 7, 8, 9, je kód čistoty podle normy ISO 4406:1999, pro stupně velikosti částic 4 μm , 6 μm a 14 μm .



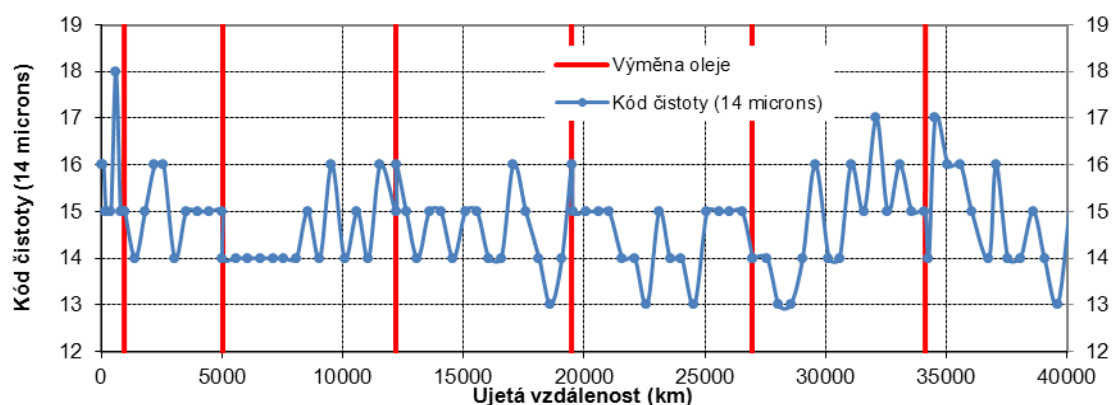
Zdroj (Autoři)

Obr. 7 - Kód čistoty pro 4 μm v závislosti na ujeté vzdálenosti



Zdroj (Autoři)

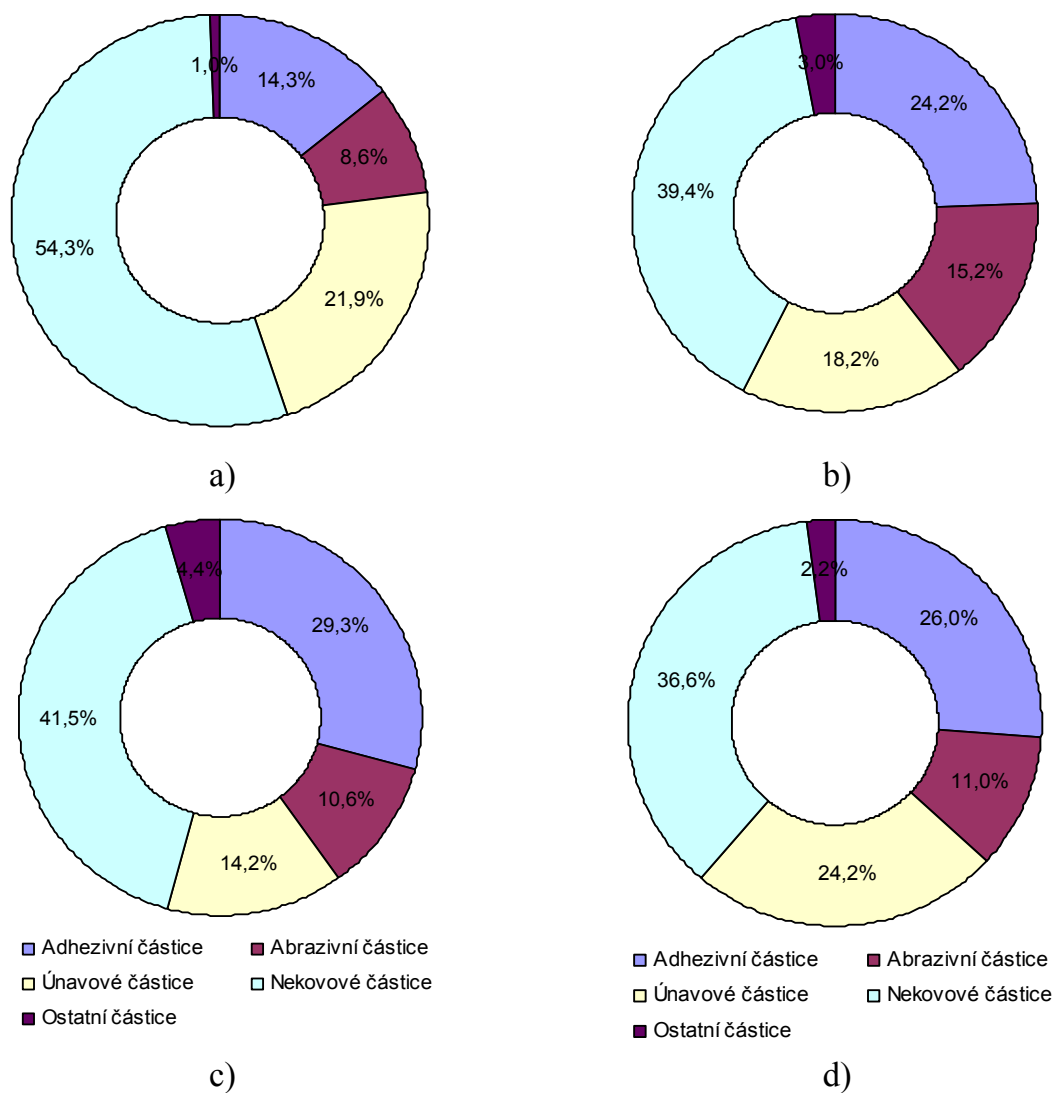
Obr. 8 - Kód čistoty pro 6 μm v závislosti na ujeté vzdálenosti



Zdroj (Autoři)

Obr. 9 - Kód čistoty pro 14 μm v závislosti na ujeté vzdálenosti

Z hlediska počtu částic lze konstatovat, že zůstává taktéž konstantní. Postupný nárůst počtu částic je patrný pouze před první výměnou motorového oleje, kde docházelo k významnému záběhu spalovacího motoru. V další době se již počet částic nemění, na čemž se výrazně podílí také filtrace motorového oleje.



Zdroj (Autoři)

Obr. 10 - Procentní rozložení částic v době provozu a) 1.000 km, b) 10.000 km, c) 25.000, d) 40.000 km

Na obrázku číslo 10 (a, b, c, d) je zobrazeno procentní zastoupení částic opotřebení ve vzorku oleje ve vybraných ujetých vzdálenostech a to 1.000 (a), 10.000 (b), 25.000 (c) a 40.000 km (d). Z těchto obrázků a zejména pak z celkového průběhu rozložení procentní zastoupení částic lze konstatovat, že k žádné výrazné změně nedochází. Větší odchylka je patrná pouze ve vzorcích do ujeté vzdálenosti 1.000 km.

3. DISKUSE A ZÁVĚR

V příspěvku je uvedeno využití laserového analyzátoru LNF-C pro analýzu částic v olejové náplni motoru vozidla Škoda Felicia Combi se zážehovým motorem 1,3 MPI po generální opravě. Oprava se uskutečnila v 107.898 km, což je také označeno jako výchozí bod měření a to 0 ujetých km. Generální oprava zahrnovala především výměnu hlavních ložisek a vložek válců i s písty.

Očekávalo se, že v době záběhu budou výrazné počty částic a to především částic velkých, což se projeví ve větší průměrné velikosti částic. Z výsledků však lze konstatovat, že k výraznému záběhu došlo během prvního 1.000 ujetých kilometrů (tedy do první výměny oleje). V ostatních případech jsou velikosti i počty částic vyjádřené kódem čistoty konstantní. Velký vliv na tyto konstantní průběhy má především průběžná filtrace oleje, která omezuje v oleji především částice velkého charakteru a vliv mohou mít i moderní výrobní technologie jednotlivých dílů použitých pro generální opravu. Jen na obrázku číslo 5, hodnota abrazivních částic při 5.000 ujetých kilometrech vystoupala nepřiměřeně k ostatním. Tato anomálie byla pravděpodobně způsobena špatně odebraným vzorkem oleje, čímž bylo zkreslené měření.

Současně s hodnocením počtu a velikosti částic opotřebení bylo hodnoceno jejich procentní zastoupení v analyzovaném vzorku olejové náplně. Lze konstatovat, že také tyto hodnoty jsou ustálené bez velké změny. Aby bylo možné doložit, že skutečně došlo k záběhu motoru byla sledována spotřeba paliva. Její závislost na ujeté vzdálenosti je znázorněna na obrázku číslo 6, kde je patrné, že během doby provozu postupně klesla spotřeba paliva. V porovnání s prvními 10.000 km je to snížení spotřeby paliva až o 0,4 l/100 km. Tento klesající trend je patrný do ujeté vzdálenosti 25.000-30.000 km a od té doby je spotřeba paliva vyrovnaná.

Při analýzách filtrovaných olejových náplní je velmi důležité sledovat stav filtrace, protože ta o technickém stavu vozidla a oleje přináší více informací než vzorek odebraný přímo z olejové nádrže. V tom je možno zaregistrovat až zvýšené opotřebení, které se projevuje skokovým navýšením počtu částic a zvýšením jejich velikosti a tudíž blížící se havarijní poruchou. I přes tato úskalí má laserový analyzátor částic v tribodiagnostice strojů své místo a pro systémy nefiltrované nebo filtrované s malým oběhovým číslem přináší neocenitelné informace pro rozhodnutí o provedení či neprovedení údržby a tím vede k úsporám, které se projevují odloženou údržbou nebo odhalenou blížící se havarijní poruchou.

Príspevek byl vytvořen s grantovou podporou – CZU 31190 / 1312 / 3123 – Vliv způsobu provozu spalovacího motoru na množství nečistot v motorovém oleji.

POUŽITÁ LITERATURA

- (1) ALEŠ, Z., PEXA, M.: Diagnostika maziv s využitím laserového analyzátoru LaserNet Fines ®-C, *Strojírenská technologie*, Ústí nad Labem, 2010, roč. 14, č. zvláštní číslo, s. 8 – 11. ISSN 1211-4162
- (2) BUYANOVSKII, I. A. Boundary lubrication by an adsorption layer. *Journal of friction and wear*, 2010, Volume 31, Issue 1 Pages 33-47. ISSN 1068-3666
- (3) FERNÁNDEZ-FRANCOS, D., MARTÍNEZ-REGO, D., FONTENLA-ROMERO, O., & ALONSO-BETANZOS, A. Automatic bearing fault diagnosis based on one-class v-SVM. *Computers and Industrial Engineering*, 2012, Volume 64, Issue 1, Pages 357-365. ISSN: 0360-8352
- (4) FILICKY, D., SEBOK, T., MATLE, L., ANDERSON, D. *LaserNet Fines – A New Tool for the Oil Analysis Toolbox*. Machinery Lubrication, Noria. [online] [cit. 2012-12-

- 10]. Dostupné z: <<http://www.machinerylubrication.com/Read/383/lasernet-fines-oil-analys>>
- (5) FRYŠČOK, T. Rotor dynamics of modern turbochargers. *Perner's Contacts*, 2012, Volume 7, Issue 2, Pages 40-50. ISSN 1801-674X
 - (6) HARVEY, T. J., WOOD, R. J. K., & POWRIE, H. E. G. Electrostatic wear monitoring of rolling element bearings. *Wear*, 2007, Volume 263, Special issue (7-12), Pages 1492-1501, ISSN 0043-1648
 - (7) KOTUS, M., ANDRÁŠYOVÁ, Z., ČIČO, P., FRIES, J., HRABĚ, P. Analysis of wear resistant weld materials in laboratory conditions. *Research in Agricultural Engineering (RAE)*. 2011, Volume 57, Special issue, s.74-78. ISSN 1212-9151
 - (8) LI, T., ALMOND, D. P., & REES, D. A. S. Crack imaging by scanning laser-line thermography and laser-spot thermography. *Measurement Science and Technology*, 2011, Volume 22, Issue 3. ISSN: 0957-0233
 - (9) MORINA, A., LEE, P. M., PRIEST, M., & NEVILLE, A. Challenges of simulating 'fired engine' ringliner oil additive/surface interactions in ringliner bench tribometer. *Tribology - Materials, Surfaces and Interfaces*, 2011, Volume 5, Issue 1, Pages 25-33. ISSN: 1751-5831
 - (10) PODSIADLO, P., STACHOWIAK, G.W. Scale-invariant analysis of wear particle morphology—a preliminary study, *Tribology International*, April 2000, Volume 33, Issues 3–4, Pages 289-295, ISSN 0301-679X
 - (11) POŠTA, J. *Provozní schopnost strojů*. Vyd. 1. V Praze: Česká zemědělská univerzita, Technická fakulta, 2002, 95 s. ISBN 80-213-0966-0.
 - (12) REINTJES, J., MAHON, R., DUNCAN, M. D., TANKERSLEY, L. L., SCHULTZ, A., CHEN, V. C., KOVER, D. J., HOWARD, P. L., CHAMBERLAIN, M., SRINIRAGHAVAN, AND NARESHGUPTA, "Optical Debris Monitoring", JOAP Annual Meeting, Pensacola FLA, November 1994.
 - (13) SPECRON, INC. LaserNet Fines – ParticleCounting and ShapeRecognitionfor In-ServiceOils. Industrytribology Systems, USA, s. 1 – 13.
 - (14) SPECRON, INC. Automatic Sample Processorfor LaserNet Fines. USA [online] [cit. 2012-12-11]. Dostupné z: <<http://www.omnitek.nl/en/products/particle/asp/asp.pdf>>
 - (15) STACHOWIAK, G.W. Numerical characterization of wear particles morphology and angularity of particles and surfaces, *Tribology International*, January 1998, Volume 31, Issues 1–3, Pages 139-157, ISSN 0301-679X
 - (16) STACHOWIAK G.P., STACHOWIAK G.W., PODSIADLO P. Automated classification of wear particles based on their surface texture and shape features. *Tribology International*, 2008, Volume 41, Issue 1, Pages. 34-43. ISSN 0301-679X
 - (17) STODOLA, J. Mechanical systeme wear and degradation processes modelling. *Perner's Contacts*, 2010, Volume 5, Issue 4, Pages 248-264. ISSN 1801-674X
 - (18) SUCHÁNEK, J. Adhezivní opotřebení. *TriboTechnika*. 2010. č. 2. S. 66 – 71.
 - (19) VOJTĚCH, D. *Kovové materiály*. 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006, 185 S. ISBN 80-7080-600-1.