



Medzinárodná vedecká konferencia
„AKTUÁLNE PROBLÉMY VOJENSKEJ LOGISTIKY A MANAŽMENTU ZDROJOV
V OBLASTI OBRANY A BEZPEČNOSTI - 2024“
23. októbra 2024, Liptovský Mikuláš



VYUŽITÍ TRIBOTECHNICKÉ DIAGNOSTIKY PRO RACIONALIZACI PROVOZU POZEMNÍ VOJENSKÉ TECHNIKY

Petr PROCHÁZKA - Martin VLKOVSKÝ

USE OF TRIBOTECHNICAL DIAGNOSTICS FOR RATIONALIZATION OF GROUND MILITARY VEHICLES OPERATION

Abstract:

The article addresses the use of tribotechnical diagnostics for the rationalization of maintenance and operation of ground military vehicles in the Armed Forces of the Czech Republic (AČR). As a non-destructive method, tribodiagnosics provides comprehensive information about the technical condition of engines and lubricants, including the identification of degradation and contamination processes. Advanced instrumental methods, such as Atomic Emission Spectrometry (AES) and Fourier Transform Infrared Spectrometry (FTIR), were used for the analysis of engine oil samples. The experimental part of the study includes a case analysis of AČR vehicles, specifically the Land Rover DEFENDER 110, Tatra 810, and KBVP Pandur II models. The results highlight the importance of implementing predictive maintenance, which enables the optimization of operational costs, extension of vehicle life, and enhancement of reliability. This approach supports the transition from traditional preventive maintenance to more advanced condition-based maintenance strategies.

Keywords: land military vehicles, engine oil, degradation of the lubricant, tribotechnical diagnostics

ÚVOD

V současné době je technika nedílnou součástí každodenního života, což vyžaduje její systematickou údržbu pro zajištění spolehlivého provozu. V rámci Armády České republiky (AČR) se nachází různé typy techniky lišící se stářím a technickými parametry, což vede k potřebě různorodých přístupů k údržbě jednotlivých zařízení.

V rámci racionalizace provozu pozemní vojenské techniky (PVT) je výhodné implementovat metody technické diagnostiky. Z historického hlediska se údržba zdokonaluje od řešení systémem „oprava po poruše“ až po „proaktivní údržbu“, která představuje pomyslný vrchol v současných přístupech k údržbě. Tyto systémy vznikly na základě



zkušeností a poznatků s cílem zvýšit efektivnost práce (údržby), např. snížení nákladů na údržbu, urychlení procesu údržby a oprav, zvýšení spolehlivosti techniky aj.

Tribotechnická diagnostika, zejména ve spojení se spalovacími motory, které jsou u PVT prozatím výhradně využívány, představuje významnou součást údržby. Mazací médium poskytuje cenné informace o svých vlastnostech a složení, včetně aditiv, kontaminantů či otěrových částic. Změny v těchto parametrech mohou indikovat potenciální závady komponentů techniky.

Článek se zabývá principy sofistikovaných instrumentálních metod tribotechnické diagnostiky a jejich aplikací v podmínkách AČR, která vychází z reálných měření a umožňuje tak hodnotit současný („In Time“) stav sledovaného technického prostředku.

1 TRIBOTECHNICKÁ DIAGNOSTIKA

Tribotechnická diagnostika, známá též jako tribodiagnostika, je specifickou oblastí technické diagnostiky zaměřenou na bezdemontážní a nedestruktivní metody hodnocení (Non-Destructive Testing, NDT) technického stavu systémů. Tribotechnika jako vědní disciplína čerpá z poznatků výzkumu tření, opotřebení a mazání, s cílem snížit součinitele tření, optimalizovat jejich průběh a tím minimalizovat míru opotřebení pohybujících se součástí. Metodologie tribotechniky využívá mazací média jako zdroje vícerozměrných a komplexních dat poskytujících informace o probíhajících procesech a režimech opotřebení v daných systémech (Stodola, 2015).

Tribodiagnostické metody zahrnují aplikaci moderních instrumentálních technik, které poskytují uživateli přesné údaje o stavu maziva (kvalitativní analýza), jeho kontaminaci (kvantitativní hodnocení přítomnosti prvků), a především o mechanismech opotřebení a s tím souvisejících poruchách. Implementací těchto metod je možné provádět prediktivní údržbu technických zařízení, jako jsou například spalovací motory, čímž se zvyšuje efektivita a spolehlivost jejich provozu (Furch, 2022).

1.1 Degradáční a kontaminační procesy v údržbě mazacích médií

Degradáční a kontaminační procesy představují inherentní součást používání olejových náplní ve spalovacích motorech. Degradáční procesy se projevují změnami vlastností maziva. Jedná se, například o pokles alkalické rezervy (Total Base Number, TBN), zatímco kontaminační procesy zahrnují přítomnost cizorodých látek, které se do systému dostávají vlivem vnějších faktorů, jako jsou otěrové kovy nebo kontaminanty z nasávaného



vzduchu. Tyto procesy spolu úzce súvisia a obvykle vedú ke znehodnotení maziva (Stodola, 2015).

Úplné odstránenie týchto procesov nie je možné, ale ich vplyv možno účinne znížiť pravidelným sledovaním stavu olejovej náplne. V tejto súvislosti je nevyhnutné pripojiť sa k metódam tribotechnickej diagnostiky, ktoré umožňujú kontinuálne monitorovanie technického stavu motorov. Táto diagnostika slúži na včasnú detekciu potenciálnych porúch a určenie vhodnosti ďalšieho používania maziva, čo vedie k implementácii tzv. „údržby podľa skutočného stavu“. Tento prístup racionalizuje náklady na prevádzku a údržbu, zvyšuje prevádzkovú efektívnosť a spoľahlivosť techniky.

2 MATERIÁL A POUŽITÉ METODY

K analýze technického stavu mazacích médií vo vzorkách motorového oleja bola využitá atomová emisná spektrometria (AES) a infračervená spektrometria s Fourierovou transformáciou (Fourier-transform infrared spectroscopy, FTIR). Tieto metódy boli aplikované v rámci prípadovej štúdie zamerané na diagnostiku prevádzkovej spoľahlivosti motorov PVT.

2.1 Atomová emisná spektrometria

Atomová emisná spektrometria je vysoko presná analytická metóda využívaná na kvantifikáciu obsahu najmä kovových prvkov vo vzorkách mazacích médií. Využíva sa najmä na monitorovanie opotrebovaných kovov, ktoré môžu indikovať mieru opotrebovania vnútorných súčastí motoru (Bruce, 2012).

Táto metóda poskytuje informácie nielen o opotrebovaných prvcích, ale aj o kontaminantoch, ako sú kremík (Si) a sodík (Na), a o aditívach obsiahnutých v motorovom oleji (napr. vápnik (Ca), bor (B), fosfor (P)). Tieto údaje sú kľúčové pre stanovenie opotrebovania jednotlivých súčastí motoru a identifikáciu možných prevádzkových problémov (Glos, 2013).

2.2 Infračervená spektrometria s Fourierovou transformáciou

Infračervená spektrometria s Fourierovou transformáciou je metóda využívajúca infračervené žiarenie na sledovanie zmien chemických vlastností mazacieho média. Je založená



na schopnosti molekúl absorbovať infračervené žiarenie pri špecifických vlnových dĺžkach, čo vyvoláva vibračné pohyby v molekulárnej štruktúre (Griffiths, 2007).

Tato metóda nabízí řadu výhod, včetně rychlé analýzy a možnosti sledování více parametrů v jednom měření. Je schopna detekovat degradační procesy ale i přítomnost kontaminantů, což je klíčové pro posouzení stavu maziva a předpověď potenciálních problémů spojených s jeho degradací a kontaminací.

Kombinované využití AES a FTIR umožňuje komplexní sledování jak chemických, tak fyzikálních vlastností mazacího média, čímž poskytuje úplný obraz o jeho stavu.

2.3 Sledovaná vozidla

Tato experimentální studie byla provedena na vozidlech, zavedených v AČR, které jsou v užívání dostatečně dlouho dobu za účelem poskytnutí relevantních dat. Jedná se o vzorek zabezpečující techniky (první dvě PVT) a bojové techniky (poslední PVT).

Analýzovaná PVT:

- Land Rover DEFENDER (LRD) 110
- Tatra 810
- Kolové bojové vozidlo pěchoty (KBVP) Pandur II

3 PŘÍPADOVÁ STUDIE – ANALÝZA VYBRANÝCH VOZIDEL AČR

U sledovaných vozidel byla provedena analýza AES a FTIR, použitého a měněného (nového) motorového oleje.

Z hlediska obsažených částic (metoda AES) jsou sledovány následující kategorie:

- aditiva (prvky B, Ca, Mg, Mo, P a Zn) [ppm],
- kontaminanty (prvek Si) [ppm],
- otěrové kovy (prvky Al, Cr, Cu, Fe) [ppm].

Z analýzy pomocí FTIR jsou sledovány:

- obsah otěrových aditiv (AW aditiva) [% požadovaného množství],
- obsah glykolu [%], sazí [%],
- TBN [mg KOH/g].
- obsah vody [ppm],



Pro každé vozidlo jsou uvedeny dvě tabulky – parametrů maziva a obsahu sledovaných částic. Hodnoty dané vlastnosti, které jsou mimo limit, jsou vyznačeny červeným podbarvením. Hodnoty, které jsou ještě přípustné, ale už znamenají odklon od normálu, jsou vyznačeny žlutým podbarvením. U každého vozidla byl proveden rozbor naměřených dat a specifikováno doporučení pro údržbu.

3.1 Land Rover DEFENDER 110

Analýza AES poukazuje na zvýšené koncentrace boru (B) a hořčíku (Mg). Tyto prvky bývají zpravidla součástí aditiv, nicméně v tomto případě bor představuje kontaminant a hořčík (pravděpodobně) otěrový prvek. Závadu chladicí soustavy lze vyloučit, jelikož se přítomnost glykolu nepotvrdila (dle FTIR). Analýza FTIR však poskytla dva důležité ukazatele. Prvním je obsah sazí – téměř 1 %, což sice nepředstavuje riziko, ale poukazuje obecně na větší tvorbu sazí v případě vznětových agregátů oproti zážehovým motorům. Druhým rizikovým faktorem je obsah TBN ve vzorku. Hodnota 2,0 mg KOH/g je už podlimitní (stanovený limit je min. 2,5 mg KOH/g).

Tabulka 1 Výsledky analýzy AES a FTIR – Land Rover DEFENDER 110

	Limit	Nový	Použitý
olej [km]		0	8230
motor [km]		0	114690
Parametry maziva			
AW aditiva [%]		99	92
glycol [%]	0	0	0
saze [%]	3,00	0,06	0,96
TBN[mg KOH/g]	min. 2,5	9,7	2,0
Voda [ppm]	2000	134	340

	Limit	Nový	Použitý
Aditiva [ppm]			
B	bez limitu	1,26	171,46
Ca	bez limitu	3153,67	2135,33
Mg	bez limitu	8,70	304,27
Mo	bez limitu	111,60	55,63
P	bez limitu	1178,33	1327,33
Zn	bez limitu	1650,67	894,46
Kontaminanty [ppm]			
Si	25	8,87	9,62
Otěrové prvky [ppm]			
Al	35	1,82	5,97
Cr	20	0,26	2,31
Cu	45	0,00	2,98
Fe	75	1,92	46,21

Zdroj: vlastní

3.2 Tatra 810

Analýza náplně byla provedena při plánované údržbě po 2 letech. V tomto případě lze pozorovat, že určité prvky, které jsou v nové náplni aditiv, mohou být i v průběhu



používání PVT zároveň kontaminanty – např. vápník (Ca). Z hlediska analýzy FTIR je zajímavý jeden ukazatel – vyšší obsah vody v nové olejové náplni – 810 ppm. Nové náplně by neměly vykazovat žádný obsah vody. Vysvětlení lze však nalézt ve skladování – nové náplně v podmínkách AČR jsou odebírány a uchovávány v sudech po velkých objemech a záleží na přístupu vzduchu, tedy i vlhkosti do těchto sudů, z čehož pak plyne určitý obsah vody již v nové náplni. Tento jev byl pozorován u všech odběrů oleje ze sudů (LRD 110, T810 i Pandur II).

Tabulka 2 Výsledky analýzy AES a FTIR – Tatra 810

	Limit	Nový	Použitý
olej [km]		0	18257
motor [km]		0	49323
Parametry maziva			
AW aditiva [%]		104	77
glycol [%]	0	0	0
saze [%]	3,00	0,06	0,19
TBN[mg KOH/g]	min. 2,5	9,3	7,5
Voda [ppm]	2000	810	914

	Limit	Nový	Použitý
Aditiva [ppm]			
B	bez limitu	399,77	276,32
Ca	bez limitu	3207,67	3341,33
Mg	bez limitu	13,02	39,16
Mo	bez limitu	42,00	33,85
P	bez limitu	1157,00	1254,33
Zn	bez limitu	1610,67	1656,00
Kontaminanty [ppm]			
Si	25	12,49	7,67
Otěrové prvky [ppm]			
Al	35	2,09	5,59
Cr	20	0,34	6,85
Cu	45	0,00	5,65
Fe	75	1,85	24,30

Zdroj: vlastní

3.2 KBVP Pandur II

Jako zástupce bojové techniky byl pro analýzu zvolen KBVP Pandur II. Odběr tohoto konkrétního vzorku proběhl při „Technické údržbě č. 1“ (TÚ1) a doba provozu od poslední výměny motorového oleje byla cca 13 měsíců. Pro tento typ vozidla je stanovena výměna náplní 1x za 2 roky nebo po ujetí 10000 km. Na základě výsledků analýzy AES a FTIR lze konstatovat, že náplň je dále použitelná. Bude-li však pokračovat stejný trend degradace a kontaminace jako doposud, bude po 2 letech provozu již obsah železa (Fe) nadlimitní – cca 105 ppm (limit max. 75 ppm pro vznětové motory) a obsah vody bude na hranici použitelnosti – cca 0,23 % hm. (limit 0,2 % hm.). Vyznačený obsah sazí potvrzuje jejich vyšší obsah u vznětových motorů oproti zážehovým.



Tabuľka 3 Výsledky analýzy AES a FTIR – Pandur II

	Limit	Nový	Použitý
olej [km]		0	4261
motor [km]		0	9992
Parametry maziva			
AW aditiva [%]		104	84
glycol [%]	0	0	0
saze [%]	3,00	0,06	0,60
TBN[mg KOH/g]	min. 2,5	9,4	8,2
Voda [ppm]	2000	561	1229

	Limit	Nový	Použitý
Aditiva [ppm]			
B	bez limitu	409,32	338,59
Ca	bez limitu	3610,67	3602,00
Mg	bez limitu	15,03	13,04
Mo	bez limitu	42,23	42,80
P	bez limitu	1026,67	1178,33
Zn	bez limitu	1829,33	1711,33
Kontaminanty [ppm]			
Si	25	15,99	21,73
Otěrové prvky [ppm]			
Al	35	1,82	4,33
Cr	20	0,00	2,30
Cu	45	0,00	18,55
Fe	75	2,03	57,21

Zdroj: vlastní

ZÁVĚR

Článek poukázal na výhodnost používání tribotechnické diagnostiky, jako bezdemontážní a nedestruktivní metody stanovení technického stavu PVT a potencionálně i u dalších technických zařízení.

Podstatou předložené případové studie není primárně stanovení stavu olejové náplně (mazacího média), ale poskytnutí informace o možných nadměrných opotřebeních, resp. poruchách předmětných skupin či soustav. Provedené analýzy jsou tak podkladem pro doporučení, zda lze náplň dále používat nebo je vhodná její výměna, příp. zda nedochází k nadměrnému opotřebení nebo kontaminaci, které mohou poukázat na příslušné poruchy.

V současné době probíhá spolupráce několika vybraných vojenských útvarů AČR s Vojenským technickým ústavem Vyškov, jsou realizovány odběry vzorků a následné analýzy předmětných náplní. Poté jsou zpětně distribuovány výsledky a doporučení pro danou konkrétní techniku a na základě toho přijímána nápravná opatření zajišťující kalibraci systému údržby PVT. Zobecněním získaných poznatků lze postupně dospět k rekalibraci celého systému údržby a oprav a racionalizovat jej.

Pro dosažení uvedeného cíle, zpočátku pro vybrané druhy PVT, je vhodné/nezbytné zvýšit množství zapojených vojenských útvarů (tedy i kusů PVT). Získaná data na reprezentativním vzorku PVT mohou postupně zvyšovat úroveň údržby a posouvat



ji od „preventivní“ směrem k „prediktivní“, kde platí – čím vyšší úroveň údržby, tím vyšší efektivnost.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- 2023 International Conference on Military Technologies (ICMT). Trends and the Possibility of Using Tribodiagnostic in Internal Combustion Engines of Combat Vehicles during Maintenance. 2023. Online. IEEE, ISBN 979-8-3503-2568-3. DOI: 10.1109/ICMT58149.2023.10171199.
- BIRESAW, Gebre a MITTAL, Kash L., eds. *Surfactants in Tribology*. Svazek 2. 1. vyd. Boca Raton: CRC Press, 2011. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/b10868>.
- BRUCE, Robert W., ed. *Handbook of Lubrication and Tribology, Volume II: Theory and Design*. 2. vydání. Boca Raton: CRC Press, 2012. ISBN 978-1-4200-6908-2.
- FURCH, J. a J. JELÍNEK. Design of a tribotechnical diagnostics model for determining the technical condition of an internal combustion engine during its lifecycle. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 2022, 24(3), s. 437–445. DOI: <http://doi.org/10.17531/ein.2022.3.5>.
- GLOS, Josef. *Instrumentální metody v diagnostice technického stavu skupin nově zaváděných bojových a speciálních vozidel*. Brno, 2013. Disertační práce. Univerzita obrany. Vedoucí práce Prof. Ing. Jiří STODOLA, DrSc.
- GRIFFITHS, Peter R. a James A. DE HASETH. *Fourier Transform Infrared Spectrometry*. 2. vydání. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007. ISBN 978-0470106310. <https://doi.org/10.1002/9780470106310.ch9>.
- KLOUDA, Pavel. *Moderní analytické metody*. Třetí, upravené vydání. Ostrava: Pavel Klouda - nakladatelství Pavko, 2016. ISBN 978-80-86369-22-8.
- LUDEMA, C.; LAYO, A. *Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology*. Boca Raton: CRC Press, 2018. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/9780429444715>.
- MANSOR, M.; OHSATO, A.; SULAIMAN, S. Knowledge Management for Maintenance Activities in the Manufacturing Sector. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*. 2012, roč. 5, č. 2229-8649, s. 612-621.
- Směrnice pro používání pozemní techniky AČR v míru*. Praha: MO ČR – GŠ AČR, 2006. č.j.: 6272- 2/2006/DP-3042.



Medzinárodná vedecká konferencia
„AKTUÁLNE PROBLÉMY VOJENSKEJ LOGISTIKY A MANAŽMENTU ZDROJOV
V OBLASTI OBRANY A BEZPEČNOSTI - 2024“
23. októbra 2024, Liptovský Mikuláš



STACHOWIAK, Gwidon W.; BATCHELOR, Andrew W. *Engineering Tribology*. 4. vyd. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. ISBN 978-0-12-397047-3.

STODOLA, Jiří a Pavel NOVOTNÝ. *Tribodiagnostika BSV*. Brno: Univerzita obrany, 2015. ISBN 978-80-7231-984-8.

STODOLA, Jiri; STODOLA, Petr. *Tribodiagnosticsofenginesforspecialvehicles*. Preprint (verze 1). 18. dubna 2023. Dostupné z: Research Square <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2816542/v1>.

TROJAN, Flavio; MARÇAL, Rui. *Sortingmaintenancetypes by multi-criteriaanalysis to clarify maintenanceconcepts in POM*. 2016.

VALIŠ, David; ŽÁK, Libor; POKORA, Ondřej; LÁNSKÝ, Petr. *Perspectiveanalysisoutcomesof selectedtribodiagnostic data used as input forconditionbasedmaintenance*. *Reliability Engineering&SystemSafety*. 2016, roč. 145, s. 231-242. ISSN 0951-8320. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.07.026>.

WAX, S.; FEHRENBACHER, L.; OELRICH, Ivan. *Role ofTribology in Military Systems*. In: *EncyclopediaofTribology*. 2008. DOI: 10.1002/9780470320280.ch47.

npor. Ing. Petr PROCHÁZKA

Univerzita Obrany, katedra logistiky, Kounicova 65, 662 10 Brno-střed
petr.prochazka6@unob.cz

plk. doc. Ing. Martin VLKOVSKÝ, Ph.D.

Univerzita Obrany, katedra logistiky, Kounicova 65, 662 10 Brno-střed
martin.vlkovsky@unob.cz