ASOCIÁCIA TECHNICKÝCH DIAGNOSTIKOV SLOVENSKEJ REPUBLIKY

ISSN 1337-8252

ATD SR
Asociácia technických diagnostikov Slovenskej republiky

SLOVO PREZIDENTA ASOCIÁCIE TECHNICKÝCH DIAGNOSTIKOV SLOVENSKEJ REPUBLIKY
SLOVO PREZIDENTA ATD ČR, Z.S.
DIAGNOSTIKA ŽIVOTNÉHO CYKLU INOVATÍVNYCH KOMPOZITNÝCH MATERIÁLOV A MOŽNOSTI ICH VYUŽITIA V PRIEMYSLE, DOPRAVE A LETECTVE
FILTRÁCIA A OŠETROVANIE VYSOKOVISKÓZNYCH PREVODOVÝCH OLEJOV
BEZKONTAKTNÁ OPTICKÁ DIAGNOSTIKA DEFORMAČNÉHO SPRÁVANIA AUXETICKÝCH ŠTRUKTÚR
VPLYV ULTRAJEMNÝCH ČASTÍC NA UDRŽATEĽNÚ MOBILITU
SLEDOVANIE PARAMETROV DEGRADÁCIE HYDRAULICKÉHO OLEJA
MANAŽÉRSKY REPORT PRE SYSTÉM DETEKCIE FEROMAGNETICKÝCH OBJEKTOV NA PÁSOVÝCH DOPRAVNÍKOCH
DIAGNOSTIKA DEGRADÁCIE ERGONOMICKÝCH PODMIENOK NA MONTÁŽNYCH PRACOVISKÁCH POČAS NÁBEHU VÝROBY V PROSTREDÍ GREENFIELD

SPRAVODAJ ATD SR

1 / 2026

XXIX. ročník DIS 2026

www.atdsr.sk



Sídlo ATD SR:
Technická univerzita v Košiciach
Letná 1/9, 042 00 Košice-Sever

ATD SR
Asociácia technických diagnostikov Slovenskej republiky

Letecká fakulta

ZSVTS

ZAP
ZVÄZ AUTOMOBILOVÉHO PRIEMYSLU SR

ATD ČR

SLOVENSKÁ SPOLOČNOSŤ ÚDRŽBY

KOŠICKÁ AKADÉMIA TAJOVSKÉHO 15

R·AS

TOMARK AERO

TRANS
TRANSPORT & LOGISTICS MANAGEMENT

SPRAVODAJ ATD SR 1/2026

Šéfredaktor: prof. Ing. Hana PAČAIOVÁ, PhD.

Hlavný redaktor: doc. Ing. Michal HOVANEC, PhD.

Redakčná rada: prof. Ing. Pavol KURDEL, PhD.
prof. Ing. Róbert GREGA, PhD.
Ing. Ivana KOLÁRIKOVÁ, PhD.
Ing. Volodymyr TYMOFIIV, PhD.
doc. Ing. Radoslav MAJDAN, PhD.
doc. Ing. Viera PEŤKOVÁ, PhD.
doc. Ing. Juraj GRENČÍK, PhD.
doc. Ing. Renáta TURISOVÁ, PhD.
Ing. Branislav KYSEĽ, PhD.
doc. Ing. František HELEBRAT, CSc.
Ing. Katarína Dojčánová

Vydavateľ: Asociácia technických diagnostikov Slovenskej republiky
Technická Univerzita v Košiciach
Letná 1/9, 042 00 Košice-Sever
Tel. č.: +421 55 6026107

Grafická úprava a tlač: WILLCOM - reklamná agentúra
Szakkayho 1
040 01 Košice

Rozširuje: Sekretariát ATD

Objednávku časopisu a inzercie prijíma vydavateľ.
Za pôvodnosť, vecnú správnosť alebo záväzky ručia autori príspevkov.

Evidenčné číslo časopisu: 19/08
IČO vydavateľa: 31 751 814
Ročník vydania periodickej tlače: 23. ročník
Dátum vydania: október 2026
Periodicita vydávania: 2x ročne

ISSN 1337-8252

OBSAH

SLOVO PREZIDENTA ASOCIÁCIE TECHNICKÝCH DIAGNOSTIKOV SLOVENSKEJ REPUBLIKY 2
Michal Hovanec

SLOVO PREZIDENTA ATD ČR, Z.S. 3
Ondřej Švec

DIAGNOSTIKA ŽIVOTNÉHO CYKLU INOVATÍVNYCH KOMPOZITNÝCH MATERIÁLOV A MOŽNOSTI ICH VYUŽITIA V PRIEMYSLE, DOPRAVE A LETECTVE 5
Michal Hovanec, Hana Pačaiová, Jaroslav Kessler, Štefan Kandráč, Ivana Kolláriková, Barabara Schürger, Volodymyr Tymofiiv, Marek Kišš

FILTRÁCIA A OŠETROVANIE VYSOKOVISKÓZNYCH PREVODOVÝCH OLEJOV 13
Igor Ubreži

BEZKONTAKTNÁ OPTICKÁ DIAGNOSTIKA DEFORMAČNÉHO SPRÁVANIA AUXETICKÝCH ŠTRUKTÚR 20
Barbara Schürger, Michal Hovanec, Ivana Kolláriková, Robert Szaniszló

VPLYV ULTRAJEMNÝCH ČASTÍC NA UDRŽATEĽNÚ MOBILITU 30
Lýdia Sobotová, Anna Badidová, Miroslav Badida

SLEDOVANIE PARAMETROV DEGRADÁCIE HYDRAULICKÉHO OLEJA 41
Daniel Skladaný, Milan Rášo, Radoslav Majdan, Tomáš Danek

MANAŽÉRSKY REPORT PRE SYSTÉM DETEKCIE FEROMAGNETICKÝCH OBJEKTOV NA PÁSOVÝCH DOPRAVNÍKOCH 50
Katarína Draganová, Karol Semrád, Miroslav Šmelko, Martin Fiľko

DIAGNOSTIKA DEGRADÁCIE ERGONOMICKÝCH PODMIENOK NA MONTÁŽNYCH PRACOVISKÁCH POČAS NÁBEHU VÝROBY V PROSTREDÍ GREENFIELD 59
Štefan Kandráč, Michal Hovanec, Hana Pačaiová, Samuel Dubovský

SLOVO PREZIDENTA ASOCIÁCIE TECHNICKÝCH DIAGNOSTIKOV SLOVENSKEJ REPUBLIKY



Vážené dámy, vážení páni,
vzácni hostia, milí kolegovia
a priatelia technickej diagnostiky,

Vážení účastníci medzinárodnej vedeckej konferencie DIS 2026, je mi veľkou cťou a potešením privítať vás na pôde konferencie DIS – Diagnostika strojov a výrobných zariadení.

Stretávame sa v období zásadnej transformácie priemyslu. Rok 2026 jasne ukazuje, že spoľahlivosť, bezpečnosť a prediktívna údržba už nie sú len podpornými zložkami výroby, ale kľúčovými piliermi konkurencieschopnosti celého nášho hospodárstva.

Žijeme v dobe rýchleho nástupu digitálnych technológií, pokročilých senzorických sietí a umelej inteligencie. Často počúvame, že algoritmy vyriešia všetko za nás. Skutočná diagnostická prax nás však učí niečo iné: moderné digitálne nástroje a AI nenahrádzajú inžiniersky rozum ani poctivú fyziku – sú ich zosilňovačom.

Ak chceme digitálne dáta správne interpretovať, musíme do hĺbky rozumieť fyzikálnej podstate dejov, dynamike strojov a mechanizmom degradácie materiálov. Skutočná pridaná hodnota vzniká práve vtedy, keď spojíme overené metódy klasickej technickej diagnostiky s možnosťami moderného digitálneho ekosystému.

Druhým, rovnako dôležitým rozmerom tohto podujatia je prepojenie akademickej obce s priemyselnou praxou. Univerzity a výskumné pracoviská potrebujú priamy kontakt s reálnymi výzvami výrobných podnikov a priemysel zase potrebuje prístup k novým poznatkom a najmä ku kvalitne pripraveným odborníkom. Výchova novej generácie diagnostikov, logistikov a inžinierov schopných pracovať v meniacich sa podmienkach je našou spoločnou zodpovednosťou.

Želám konferencii DIS, aby bola otvoreným priestorom pre vecnú odbornú diskusiu, výmenu praktických skúseností a nadväzovanie nových spoluprác. Vám všetkým prajem inšpiratívne rokovacie dni, podnetné stretnutia a príjemne strávený spoločný čas.

Ďakujem za doterajšiu podporu.

doc. Ing. Michal Hovanec, PhD.
prezident ATD SR

Košice, október 2026

PRÍHOVOR PREZIDENTA ATD ČR Z PRÍLEŽITOSTI KONEFERENCIE DIS 2026

Ondřej Švec
ATD ČR, z.s.

Vážené dámy, vážení pánové,

milí kolegové, přátelé technické diagnostiky,

dovolte mi, abych vás jménem Asociace technických diagnostiků České republiky i jménem svým srdečně pozdravil na letošní konferenci DIS Košice 2026.

Je pro mě velkou ctí oslovit právě zde odbornou komunitu, která dlouhodobě ukazuje, že technická diagnostika není pouze o měření vibrací, teplot, maziv nebo elektrických veličin. Je především o spolehlivosti, bezpečnosti, předvídání rizik a odpovědnosti za zařízení, která drží náš průmysl v chodu.

A právě tato témata dnes nabývají ještě většího významu.

Žijeme v době, kdy si možná více než kdy dříve uvědomujeme, jak křehké mohou být dodavatelské řetězce a jak rychle může událost tisíce kilometrů od nás ovlivnit evropský průmysl. Situace kolem Hormuzského průlivu je toho velmi konkrétním příkladem. Tento úzký průchod je jednou z nejvýznamnějších světových energetických tepen a jeho narušení má dopady nejen na ceny ropy a plynu, ale také na dopravu, výrobu, chemický průmysl a celkovou energetickou bezpečnost.

Pro nás, kteří se zabýváme technickou diagnostikou, je v tom důležité jedno zásadní poselství: Odolnost průmyslu nezačíná až ve chvíli, kdy dojde k poruše. Odolnost vzniká dlouho před ní – správnou údržbou, kvalitní diagnostikou, řízením rizik a schopností včas rozpoznat varovné signály.

A právě zde vidím obrovský význam naší profese.

Když dnes sledujeme svět kolem sebe, vidíme rostoucí tlak na energetickou účinnost, dostupnost náhradních dílů, kvalifikované pracovníky, digitalizaci, automatizaci i využívání umělé inteligence. Současně ale zůstává jedna věc neměnná: technologie mohou být jakkoli moderní, ale bez kvalitních dat, zkušených lidí a správného rozhodování jejich potenciál nevyužijeme.

Technická diagnostika proto podle mého názoru stále více přestává být pouze podpůrnou činností údržby. Stává se součástí strategického řízení průmyslových podniků.

Naše práce nám umožňuje nejen říct, že se zařízení začíná chovat jinak. Dokážeme hledat odpověď na mnohem důležitější otázky:

Co se děje? Proč se to děje? Jak rychle se problém vyvíjí? Jaké bude riziko, pokud zasáhneme pozdě a jaké náklady přinese správné rozhodnutí dnes?

A právě v tom je síla naší odbornosti.

Vážení kolegové,

česká a slovenská diagnostická komunita má dlouhou tradici spolupráce. Máme společnou průmyslovou historii, podobnou technickou kulturu a především společný zájem – aby naše stroje, technologie a výrobní celky pracovaly bezpečně, spolehlivě a hospodárně.

Přeji proto konferenci DIS Košice 2026 mnoho kvalitních odborných přednášek, otevřených diskusí, nových poznatků a především nových kontaktů a spolupráce.

A přeji nám všem také dostatek odvahy dívat se dopředu.

Protože svět kolem nás se mění rychle. My však máme v rukou něco velmi důležitého – znalosti, zkušenosti a schopnost předcházet problémům dříve, než se z nich stanou skutečné krize.

Buďme proto nejen diagnostiky poruch, ale především diagnostiky budoucnosti.

Věřím, že společně dokážeme přispět k tomu, aby český, slovenský i evropský průmysl byl bezpečnější, spolehlivější a odolnější.

Přeji vám úspěšnou konferenci DIS Košice 2026, mnoho inspirace, příjemná setkání a hlavně – ať nám naše diagnostika stále pomáhá vidět problémy dříve, než je uvidí samotný stroj.

Děkuji vám a přeji vaší konferenci mnoho zdaru!

Ondřej Švec

Prezident Asociace technických diagnostiků
České republiky

Ostrava, október 2026

DIAGNOSTIKA ŽIVOTNÉHO CYKLU INOVATÍVNYCH KOMPOZITNÝCH MATERIÁLOV A MOŽNOSTI ICH VYUŽITIA V PRIEMYSLE, DOPRAVE A LETECTVE

Lifecycle Diagnostics of Innovative Composite Materials and Their Potential Applications in Industry, Transport and Aviation

Michal Hovanec, Hana Pačaiová, Jaroslav Kessler, Štefan Kandráč, Ivana Koláriková, Barabara Schürger, Volodymyr Tymofiiv, Marek Kišš
Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta

Anotácia

Rozvoj inteligentného priemyslu, dopravy a letectva zvyšuje požiadavky na ľahké konštrukčné materiály s kontrolovateľnou životnosťou a možnosťou hodnotenia technického stavu. Perspektívnu skupinu predstavujú kompozitné materiály vystužené čadičovými vláknami, pri ktorých dostupná literatúra dokumentuje mechanické vlastnosti, vplyv rozhrania vlákno–matrica, teplotnú a hygrotermálnu degradáciu, delamináciu aj dlhodobú trvanlivosť. Príspevok prepája tieto poznatky s výskumným rámcom projektu KOMITMENT. Cieľom je navrhnúť aplikačno-diagnostický rámec, v ktorom sú návrh receptúry, digitálne modelovanie, experimentálne testovanie, monitorovanie, diagnostika a predikcia životnosti chápané ako jeden životno-cyklový proces. Navrhnutý reťazec smeruje od materiálovej charakterizácie cez health index a odhad zostávajúcej životnosti k rozhodovaniu o ďalšom použití komponentu. Aplikačný potenciál je diskutovaný pre inteligentný priemysel, dopravu a perspektívne letecké/UAS aplikácie. Článok je koncepčný; neprezentuje experimentálne overené parametre projektu ani certifikovanú leteckú aplikáciu.

Kľúčové slová: čadičové vlákna, kompozitné materiály, technická diagnostika, životný cyklus, doprava

Abstract

The development of intelligent industry, transport and aviation increases the demand for lightweight structural materials with controllable lifetime and assessable technical condition. Basalt-fibre-reinforced composites represent a promising material group for which the available literature reports mechanical behaviour, fibre–matrix interface effects, thermal and hygrothermal degradation, delamination and long-term durability. This paper links these findings with the research framework of the KOMITMENT project. The aim is to propose an application-diagnostic framework in which material formulation, digital modelling, experimental testing, monitoring, diagnostics and lifetime prediction form one lifecycle process. The proposed chain connects material characterisation with health-index assessment, remaining useful life estimation and decision support for further component use. Application potential is discussed for intelligent industry, transport and prospective aviation/UAS scenarios. The paper is conceptual and does not present experimentally validated project performance or a certified aviation application.

Keywords: *basalt fibres, composite materials, technical diagnostics, lifecycle, transport*

Úvod

Požiadavky na znižovanie hmotnosti, energetickej náročnosti a environmentálnej stopy technických systémov podporujú rozvoj kompozitných materiálov s vysokým pomerom funkčných vlastností k hmotnosti. Medzi perspektívne riešenia patria kompozity vystužené čadičovými vláknami (BFRP). Základné práce opisujú zloženie, výrobu a vlastnosti čadičových vlákien [1], vzťah chemického zloženia a mechanických vlastností v porovnaní so sklenými vláknami [2] a mechanické správanie BFRP kompozitov [3]. Výsledná funkčnosť pritom nezávisí iba od vlákna; významnú úlohu má aj úprava povrchu a adhézia na rozhraní vlákno–matrica [4].

Pre priemyselné a dopravné použitie je rozhodujúca nielen počiatočná pevnosť, ale aj zmena vlastností v čase. Literatúra dokumentuje vplyv teplotného namáhania [5, 6], hygrotermálneho starnutia [7], poruchy rozhrania, medzivrstvového šmyku a delaminácie [8] a dlhodobú degradáciu a predikciu trvanlivosti BFRP [9]. Tieto poznatky vytvárajú prirodzený prechod od materiálového výskumu k technickej diagnostike: predmetom hodnotenia už nie je iba vlastnosť vzorky, ale trend degradácie, aktuálny technický stav a odhad ďalšej použiteľnosti komponentu.

Projekt KOMITMENT – „Komplexný výskum inovatívnych kompozitných materiálov pre široké spektrum aplikovateľnosti v inteligentnom priemysle“ – spája návrh receptúr, digitálne modelovanie, CAD/CAM simulácie, experimentálne testovanie, senzoriku a predikciu životného cyklu. Road map projektu smeruje k systému tvorby IKM vzoriek na úrovni TRL4 a k platforme komponentov IKM/IIKM na úrovni TRL5 [10]. Cieľom príspevku je na tomto základe navrhnúť stručný diagnostický rámec a pomenovať realistické smery ďalšieho aplikačného overovania v priemysle, doprave a letectve.

1. Čadičové kompozity ako objekt diagnostiky a životného cyklu

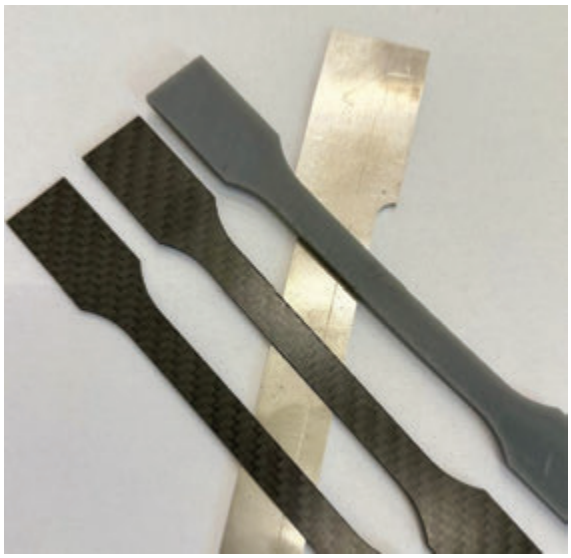
Pri klasickom materiálovom prístupe sa skúšky sústreďujú na charakterizáciu nominálnych mechanických alebo fyzikálnych vlastností. Pre technický komponent je však potrebné sledovať celý reťazec: požiadavky – návrh materiálu – výroba – integrácia – prevádzkové zaťaženie – degradácia – diagnostika – rozhodnutie o ďalšom použití. Pri BFRP sú z hľadiska diagnostiky relevantné najmä zmeny pevnosti a tuhosti, stav rozhrania vlákno–matrica, delaminácia, interlaminárne šmykové porušenie a účinky teploty, vlhkosti a cyklického namáhania [6–9].

Preto je vhodné oddeliť štyri nadväzujúce úlohy: detekciu odchýlky, identifikáciu mechanizmu poškodenia, posúdenie závažnosti a prognózu ďalšieho vývoja. Výstupom diagnostiky nemá byť iba hodnota senzora, ale informácia použiteľná na odhad health indexu, rizika alebo zostávajúcej životnosti (RUL) a následné rozhodovanie o kontrole, oprave, výmene alebo ďalšom použití komponentu.

2. Projekt KOMITMENT ako rámec výskumu, validácie a aplikácie

Road map projektu KOMITMENT vytvára logickú postupnosť od algoritmizácie návrhu receptúr a predikčného modelu životného cyklu cez simulácie a experimentálne overovanie až

po validáciu a platformu komponentov [10]. Aktivita P1HM02, za ktorú zodpovedá Letecká fakulta TUKE, zahŕňa simuláciu návrhových situácií a overovanie v CAD/CAM prostredí, validáciu a kalibráciu predikčného modelu AISIKM_LC na základe experimentálnych a simulačných dát a porovnanie IKM a IIKM z hľadiska životnosti a aplikovateľnosti [10].



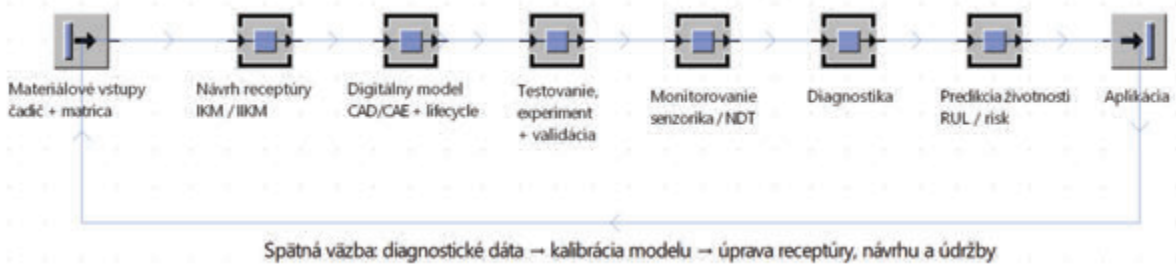
Obr. 1 Prehľad experimentálnych vzoriek využiteľných pre nastavenie digitálneho dvojčaťa rôznych materiálov

Komplementárne aktivity projektu zahŕňajú experimentálne testovanie a validačné dáta, špecifikáciu senzoriky a dátových rozhraní, návrh senzorovej siete a verifikáciu technológie monitorovania. Takéto členenie umožňuje chápať projekt nielen ako vývoj nového materiálu, ale ako budovanie dátového a diagnostického reťazca potrebného na prechod od vlastnosti materiálu k rozhodovaniu o stave komponentu.



Obr. 2 Integrovaný materiálovo-diagnostický a životnocyklo-vý reťazec navrhnutý pre aplikačné overovanie výsledkov projektu KOMITMENT

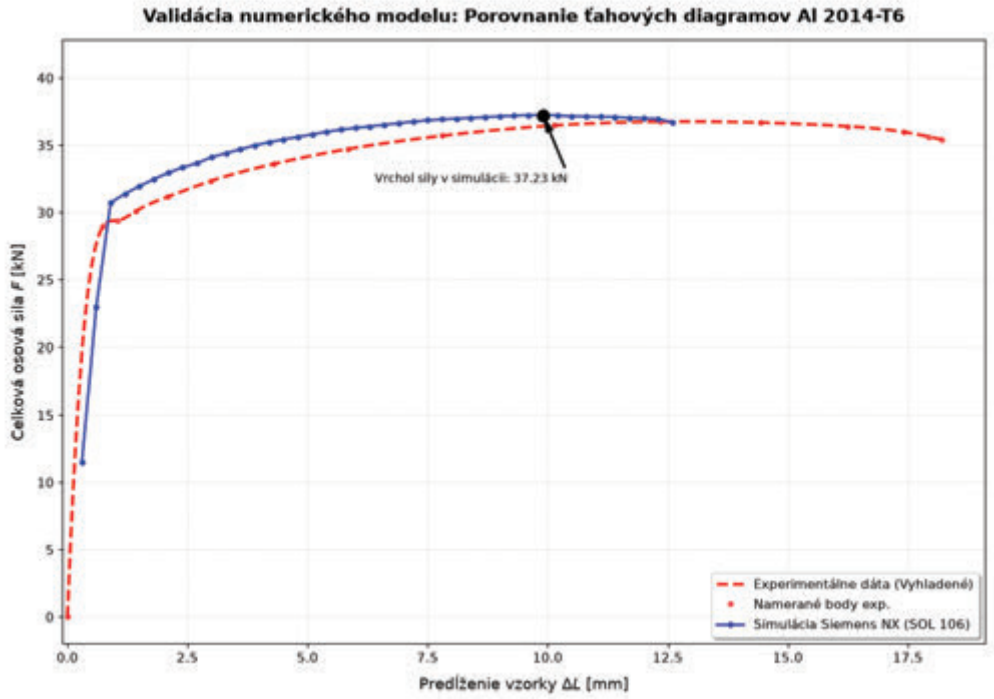
Model vytvorený v Siemens Plant Simulation (Obr. 3) bol do práce zaradený ako názorná reprezentácia systémovej a procesnej vrstvy navrhnutého rámca. Jeho úlohou nie je nahrádzať materiálové alebo mechanické modely, ale demonštrovať, ako možno jednotlivé etapy životného cyklu od návrhu a testovania až po monitorovanie, diagnostiku a rozhodovanie o ďalšom použití komponentu a prepojiť do jedného simulačného prostredia. Takýto prístup umožňuje sledovať väzby medzi jednotlivými procesmi, identifikovať úzke miesta a vytvoriť základ pre spätnú väzbu medzi diagnostickými údajmi, modelom životnosti a následnou optimalizáciou procesu.



Obr. 3 Koncepčný model životno-cyklického procesu a spätnej väzby v prostredí Siemens Plant Simulation

3. Návrh aplikačno-diagnostického rámca

Navrhovaný rámec vychádza z princípu, že aplikačné rozhodnutie musí byť viazané na konkrétny komponent, zaťažovací scenár a merateľné kritériá. V prvej úrovni sa definujú požiadavky: funkcia, hmotnosť, mechanické a environmentálne zaťaženie, bezpečnostná kritickosť a očakávaný životný cyklus. V druhej úrovni sa materiálové skúšky a CAD/CAE model spoja do referenčného digitálneho modelu. Porovnanie výsledných simulačných hodnôt s experimentálnymi dátami získanými statickou skúškou je zobrazené na obrázku 4. V tretej úrovni sa určia monitorované veličiny, spôsob zberu dát a diagnostické príznaky. Štvrtá úroveň vyhodnocuje trend degradácie, health index a podľa dostupnosti dát aj RUL alebo risk score. Piata úroveň predstavuje experimentálnu validáciu a kalibráciu modelu; šiesta úroveň prenáša výsledok do aplikačného rozhodnutia a spätnej väzby pre návrh receptúry a komponentu.



Obr. 4 Porovnanie výsledkov nelineárnej simulácie a experimentálne získaných dát

Dôležitým metodickým pravidlom je oddeliť experimentálne namerané údaje od modelových predpokladov. V tejto fáze nemožno z projektovej road map odvodzovať konkrétne hodnoty pevnosti, životnosti ani úspory hmotnosti; tieto parametre musia byť výsledkom plánovaného testovania, simulácií a validácie. Rovnaké obmedzenie platí pre leteckú certifikáciu.

4. Možnosti využitia v priemysle, doprave a letectve

V inteligentnom priemysle možno perspektívne uvažovať o ľahkých krytoch, pomocných konštrukčných prvkoch, komponentoch robotických a autonómnych logistických systémov alebo o inteligentných komponentoch s integrovanou senzorikou. V doprave je relevantné overovanie ľahkých panelov, sekundárnych prvkov a komponentov vystavených opakovanému mechanickému, vibračnému a environmentálnemu zaťaženiu. Literatúra o BFRP zároveň ukazuje širokú skúsenostnú bázu s mechanickou charakterizáciou a dlhodobou

trvanlivosťou, hoci značná časť doterajších aplikácií je orientovaná na stavebné konštrukcie [11,12].

Pre letectvo a UAS je vhodné hovoriť o perspektívnych scenároch ďalšieho výskumu, nie o už preukázanej aplikovateľnosti. Ako kandidáti na overovanie sa ponúkajú nekritické sekundárne prvky, kryty, panely, vybrané komponenty malých UAS a pozemné alebo logistické letecké zariadenia. Pre akúkoľvek bezpečnostne významnú aplikáciu bude potrebné samostatne preukázať materiálové charakteristiky, výrobné opakovateľnosti, poškodenie a toleranciu poškodenia, environmentálnu odolnosť, diagnostické metódy a príslušné validačné a certifikačné požiadavky.



Obr. 5 Aplikačný rámec IKM/IIKM a väzba na technickú diagnostiku v troch cieľových oblastiach

5. Diskusia

Literárny prehľad ukazuje, že pri čadičových kompozitoch je k dispozícii odborná báza od základných materiálových vlastností až po mechanizmy degradácie. Súčasne však existuje medzera medzi materiálovou charakterizáciou a integrovaným diagnostickým modelom pre konkrétne dopravné alebo letecké komponenty. Projekt KOMITMENT túto medzeru môže adresovať kombináciou experimentálnych dát, digitálneho modelovania, senzoriky a predikcie životného cyklu. Významným výsledkom by preto nemala byť iba databáza vlastností, ale kalibrovaná väzba „zaťaženie – degradácia – diagnostický príznak – health index – RUL/riziko – rozhodnutie“.

Limity navrhovaného rámca sú dané súčasnou úrovňou rozpracovania projektu. Bez validačných dát nie je možné kvantifikovať diagnostickú presnosť, spoľahlivosť predikcie ani prevádzkový prínos. Pred reálnym nasadením bude potrebné definovať reprezentatívne zaťažovacie spektrá, failure modes, metódy NDT/SHM, metriky neistoty a validačné kritériá pre konkrétnu triedu komponentu.

Záver

Príspevok prepojil poznatky o čadičových vláknach a BFRP kompozitoch s výskumným rámcom projektu KOMITMENT a navrhol koncepčný reťazec od návrhu materiálu cez digitálny model, experiment, monitorovanie a diagnostiku až po predikciu životnosti a aplikačné rozhodnutie. Hlavným prínosom takto formulovaného prístupu je posun od statického hodnotenia počiatočných materiálových vlastností k riadeniu technického stavu počas životného cyklu. Pre priemysel a dopravu vzniká priestor na aplikačné overovanie ľahkých a inteligentných komponentov; pre letectvo a UAS ide v súčasnosti o perspektívne výskumné scenáre, ktoré si vyžadujú samostatné materiálové, diagnostické a bezpečnostné overenie. Ďalšia práca by mala smerovať k experimentálnej validácii diagnostického reťazca, definovaniu health indexu a kalibrácii predikčného modelu AISIKM_LC na dátach získaných v projekte.

Poďakovanie

Príspevok vychádza z odborného rámca projektu KOMITMENT, kód 401101C721, „Komplexný výskum inovatívnych kompozitných materiálov pre široké spektrum aplikovateľnosti v inteligentnom priemysle“, realizovaného v rámci výzvy PSK-MSVVM-020-2024-DV-EFRR – Strategický výskum a vývoj prostredníctvom partnerstiev.

Použitá literatúra:

[1] SINGHA, K. A Short Review on Basalt Fiber. 2012. DOI: 10.5923/j.textile.20120104.02.

[2] DEÁK, T.; CZIGÁNY, T. Chemical Composition and Mechanical Properties of Basalt and Glass Fibers: A Comparison. 2009. DOI: 10.1177/0040517508095597.

[3] LOPRESTO, V.; LEONE, C.; DE IORIO, I. Mechanical Characterisation of Basalt Fibre Reinforced Plastic. 2011. DOI: 10.1016/j.compositesb.2011.01.030.

[4] MANIKANDAN, V. et al. Investigation of the Effect of Surface Modifications on the Mechanical Properties of Basalt Fibre Reinforced Polymer Composites. 2012. DOI: 10.1016/j.compositesb.2011.11.009.

[5] MILITKÝ, J.; KOVAČIČ, V.; RUBNEROVÁ, J. Influence of Thermal Treatment on Tensile Failure of Basalt Fibers. 2002. DOI: 10.1016/S0013-7944(01)00119-9.

[6] KARVANIS, K. et al. Preparation, Thermal Analysis, and Mechanical Properties of Basalt Fiber-Reinforced Polymer Composites. 2020. DOI: 10.3390/polym12081785.

[7] CHOWDHURY, I. R.; O’DOWD, N. P.; COMER, A. J. Experimental Study of Hygrothermal Ageing Effects on Failure Modes of Non-Crimp Basalt Fibre-Reinforced Epoxy Composite. 2021. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.114415.

[8] PORTELA, A.; O’DOWD, N. P.; COMER, A. J. Analysis of Failure Modes for a Non-Crimp Basalt Fiber Reinforced Epoxy Composite under Flexural and Interlaminar Shear Loading. 2020. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112317.

[9] SU, C. et al. Evaluation of the Long-Term Performance and Durability of Basalt Fiber Reinforced Polymer Bars in Concrete Structures. 2024. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138226.

[10] KOMITMENT ROAD MAP. Projekt 401101C721: Komplexný výskum inovatívnych kompozitných materiálov pre široké spektrum aplikovateľnosti v inteligentnom priemysle. Verzia 2026.

[11] CHOWDHURY, I. R.; PEMBERTON, R.; SUMMERSCALES, J. Developments and Industrial Applications of Basalt Fibre Reinforced Composite Materials. 2022. DOI: 10.3390/jcs6120367.
[12] SIM, J.; PARK, C.; MOON, D. Y. Characteristics of Basalt Fiber as a Strengthening Material for Concrete Structures. 2005. DOI: 10.1016/j.compositesb.2005.02.002.

Autor(i):

doc. Ing. Michal Hovanec, PhD.
Vedúci katedry Leteckého inžinierstva
Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta
Rampová 7, 04001 Košice
Tel: E-mail: michal.hovanec@tuke.sk

prof. Ing. Hana Pačaiová, PhD.
Profesor
Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta
Rampová 7, 04001 Košice
Tel: E-mail:hana.pacaiova@tuke.sk

Ing. Jaroslav Kessler, PhD.
Odborný asistent
Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta
Rampová 7, 04001 Košice
Tel: E-mail: jaroslav.kessler@tuke.sk

Ing. Štefan Kandráč,
Výskumný pracovník
Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta
Rampová 7, 04001 Košice
Tel: E-mail: stefan.kandrac@tuke.sk

Ing. Ivana Koláriková, PhD.
Odborný asistent
Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta
Rampová 7, 04001 Košice
Tel: E-mail: ivana.kolarikova@tuke.sk

Ing. Volodymyr Tymofiiv, PhD.
Výskumný pracovník
Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta
Rampová 7, 04001 Košice
Tel: E-mail: volodymyr.tymofiiv@tuke.sk

MVDr. Marek Kišš
Externý doktorand
Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta
Rampová 7, 04001 Košice
Tel: E-mail: marek.kiss@tuke.sk

FILTRÁCIA A OŠETROVANIE VYSOKOVISKÓZNYCH PREVODOVÝCH OLEJOV

Filtration and Condition Management of High-Viscosity Gear Oils

Igor Ubreži
ECOFIL® Slovakia

Anotácia

Príspevok analyzuje tribologické, diagnostické a prevádzkové súvislosti filtrácie a ošetrovania vysokoviskóznych priemyselných prevodových olejov v rozsahu približne ISO VG 100 až 1000. Pozornosť sa sústreďuje na vzťah medzi viskozitou, chemickou podstatou základového oleja, aditivačným systémom, kontamináciou pevnými časticami, kontamináciou vodou a mechanizmami oxidačnej degradácie. Navrhnutý prístup spája definovanie cieľovej triedy čistoty, filtráciu nového oleja, on-line, off-line a by-pass čistenie, preplach po opravách, priebežný monitoring a laboratórnu tribodiagnostiku. Priemyselné prípady dokumentujú zlepšenie čistoty olejov ISO VG 150 až 460 v prevodovkách výroby celulózy, mobilnej techniky, robotických systémov a ťažkých pohonov. Výsledky potvrdzujú, že čistota oleja má byť riadeným parametrom spoľahlivosti a súčasťou prediktívnej údržby.

Kľúčové slová: prevodový olej; vysoká viskozita; filtrácia; trieda čistoty; prediktívna údržba

Abstract

The paper analyses the tribological, diagnostic and operational aspects of filtration and condition management of high-viscosity industrial gear oils in the approximate ISO VG 100 to 1000 range. Emphasis is placed on the relationship between viscosity, base-oil chemistry, additive systems, particulate and water contamination, and oxidative degradation mechanisms. The proposed approach integrates target cleanliness definition, filtration of new oil, on-line, off-line and bypass filtration, post-repair flushing, continuous monitoring and laboratory tribodiagnostics. Industrial case studies demonstrate improved cleanliness of ISO VG 150 to 460 oils in pulp production gearboxes, mobile machinery, robotic systems and heavy-duty drives. The results confirm that oil cleanliness should be a monitored reliability parameter and a component of predictive maintenance.

Keywords: *gear oil; high viscosity; filtration; cleanliness class; predictive maintenance*

Úvod

Priemyselný prevodový olej je aktívnym konštrukčným prvkom tribologického systému. Jeho úlohou nie je iba znížiť súčiniteľ trenia, ale vytvárať únosný elastohydrodynamický alebo zmiešaný mazací film, odvádzať teplo, chrániť povrchy pred koróziou, transportovať produkty opotrebenia a dlhodobo zachovávať funkciu aditív. Pri ťažko zaťažených reduktoroch, lisoch, dopravníkoch, robotických osiach alebo veľkých priemyselných pohonoch sa používajú oleje približne od ISO VG 100 po ISO VG 1000. Špecifikácie pre mazivá uzavretých prevodových systémov sú dnes systematizované napríklad v ISO 12925-1:2024 [1]. Prevádzková

spoľahlivosť však závisí nielen od správnej voľby viskozitnej triedy a výkonovej kategórie, ale aj od čistoty a chemickej stability náplne počas celého životného cyklu.

Z prezentovaných prevádzkových skúseností vyplýva, že najväčší prínos neprináša jednorazová filtrácia, ale integrovaný systém starostlivosti: kontrola čistoty nového oleja, vhodne dimenzované on-line alebo off-line (bypass) filtračné okruhy, cielené preplachovanie po opravách, pravidelná laboratórna diagnostika a trendovanie vybraných parametrov. Cieľom príspevku je technicky interpretovať tento prístup pre vysokoviskózne prevodové oleje a vyhodnotiť jeho význam na konkrétnych priemyselných prípadoch zo zdrojovej prezentácie [11].

1. Tribologické špecifiká vysokoviskóznych prevodových olejov

1.1 Viskozita, základový olej a aditivačný systém

Viskozita určuje schopnosť oleja vytvoriť mazací film, ale súčasne ovplyvňuje miešacie straty, teplotu, čerpatelnosť a tlakové straty vo filtračnom okruhu. Kinematická viskozita sa štandardne stanovuje napríklad podľa ASTM D445 [7]. Pri minerálnych prevodových olejoch sa v zdrojových údajoch uvádza viskozitný index približne 90 až 110, pri PAO približne 130 až 160 a pri esterových olejoch 140 až 180 [11]. Ide o orientačné rozsahy závislé od konkrétnej formulácie; z tribologického pohľadu je rozhodujúce, či olej pri reálnej prevádzkovej teplote zabezpečuje požadovanú hrúbku filmu bez nadmerných hydrodynamických strát.

Chemická odolnosť náplne je výsledkom spolupôsobenia základového oleja a aditív. EP (Extreme Pressure additive – vysokotlakové) prísady zvyšujú odolnosť proti zadieraniu pri vysokom kontaktnom tlaku a sklze, AW (Anti-Wear) prísady obmedzujú opotrebenie, antioxidanty spomaľujú tvorbu kyslých oxidačných produktov, deemulgačné a antikorózne zložky podporujú separáciu vody a ochranu povrchov a antipenivé aditíva stabilizujú správanie oleja pri prevzdušnení. Relatívnu únosnosť proti scuffingu (závažná forma adhézneho opotrebenia trecích povrchov) možno hodnotiť skúškou FZG podľa ISO 14635-1:2023 [6]. Samotná vyhovujúca viskozita preto nie je dôkazom dobrého stavu oleja: náplň môže mať súčasne vyčerpanú antioxidačnú rezervu, zvýšené TAN, vodu alebo mäkké oxidačné produkty.

1.2 Kontaminácia ako aktívny degradačný mechanizmus

Pevné častice z opotrebenia, prach a oxidy nie sú iba pasívnym diagnostickým markerom. Tvrdé častice v rozmere porovnateľnom s hrúbkou mazacieho filmu môžu vstupovať do kontaktnej zóny ozubenia a ložísk, lokálne narušiť film a iniciovať sekundárne abrazívne alebo únavové opotrebenie. Vzniká spätná väzba: vyššia kontaminácia zvyšuje opotrebenie a opotrebenie následne generuje ďalšie častice. Kód ISO 4406:2021 vyjadruje koncentráciu častíc v troch veľkostných kanáloch a pri automatickom počítaní sa pracuje s kalibrovanými rozmermi 4, 6 a 14 µm(c) [2–4]. Každý pokles kódu o jednu triedu predstavuje približne polovičný interval koncentrácie častíc; preto je zmena o tri kódy kvalitatívne významný posun, nie kozmetické zlepšenie.

Tab. 1 Prevádzkové cieľové úrovne čistoty používané v prezentovaných aplikáciách

Aplikačná skupina	Cieľ ISO 4406:2021	Cieľ NAS1638
Jemné a robotické prevodovky	16/14/11 až 17/15/12	NAS 5 až NAS 6
Bežné priemyselné aplikácie	17/15/12 až 18/16/13	NAS 6 až NAS 7
Kritické systémy	≤ 16/14/11	≤ NAS 5

Poznámka: hodnoty v tabuľke sú prevádzkové ciele zo zdrojovej prezentácie, nie univerzálne limity normy ISO 4406. NAS 1638 je v článku ponechaná iba ako historická referencia; pre nové špecifikácie je vhodnejšie používať ISO 4406 alebo aktuálnu klasifikáciu SAE AS4059G [10].

2. Filtrácia a ošetrovanie vysokoviskóznych olejov

2.1 Filtračná účinnosť a vplyv viskozity

Pri vysokoviskóznych olejoch nestačí určiť iba nominálnu jemnosť filtra. Filtračný prvok musí byť posudzovaný podľa separačnej účinnosti, prietoku, tlakovej straty, plochy média, kapacity nečistôt a prevádzkovej viskozity. Pri prvkoch hodnotených viacpriechodovou skúškou podľa ISO 16889:2022 sa používa filtračný pomer βx(c), teda pomer počtu častíc určitej veľkosti pred a za prvkom [5]. Z neho možno priamo odvodiť separačnú účinnosť.

$$\beta x(c) = \frac{Nu}{Nd}, \quad \eta x = \left(1 - \frac{1}{\beta x}\right) \cdot 100\,\% \tag{2.1}$$

Napríklad β = 200 zodpovedá teoretickej jednopriechodovej účinnosti 99,5 %, β = 1000 približne 99,9 %. V reálnom off-line okruhu je však výsledná rýchlosť čistenia ovplyvnená premiešavaním nádrže a opakovaným prechodom oleja cez filtračnú vložku. Pri studenom štarte môže vysoká viskozita prudko zvýšiť diferenciálny tlak a aktivovať bypass alebo deformovať filtračné médium. Dimenzovanie preto musí rešpektovať najvyššiu očakávanú viskozitu; praktickými opatreniami sú väčšia filtračná plocha, nižší prietok pri studenom oleji, postupné zahriatie alebo samostatný nízkoprietokový off-line okruh.

2.2 Filtrácia novej náplne, preplach a on-line monitoring

Nový olej nemožno automaticky považovať za olej vhodnej čistoty pre citlivú prevodovku. Kontaminácia môže vzniknúť počas výroby, plnenia, dopravy aj skladovania. V prezentovanej praxi sa preto nová náplň pre robotické prevodovky filtruje ešte pred vstupom do stroja a cieľ sa stanovuje na ISO 17/15/12 a NAS 6 [11]. Po výrobe alebo oprave prevodovky má zásadný význam preplach, pretože odstraňuje montážne nečistoty a voľné častice, ktoré by po spustení okamžite vstúpili do mazacieho okruhu.



Obr. 1 Filtrácia nového oleja pred plnením prevodového systému (a) a on-line kontrola triedy čistoty počas filtračného procesu NEURON® (b). Zdroj: autor/ECOFIL.

Účinnosť filtrácie sa musí overovať meraním pred, počas a po čistení. On-line real-time monitoring umožňuje sledovať rýchlu zmenu triedy čistoty, obsah vody, teplotu, viskozitu a farbu. Takéto dáta však nenahrádzajú laboratórnu diagnostiku. Pre trendovanie chemického stavu sú dôležité najmä viskozita, číslo kyslosti (TAN) podľa ASTM D664 [8], voda napríklad coulometrickou Karl Fischer titráciou podľa ASTM D6304 [9], FTIR, RDE-AES prvková analýza, PQ index a podľa typu oleja aj hodnotenie mäkkých oxidačných produktov (MPC ΔE). Rozhodovanie má vychádzať z kombinácie kontaminácie, chemickej degradácie a trendu opotrebenia.

3. Vyhodnotenie priemyselných prípadov

3.1 Prevodovka ISO VG 320 vo výrobe celulózy

Najlepšie kvantifikovaný prípad predstavuje priemyselná prevodovka s objemom približne 470 l a olejom ISO VG 320. Východisková čistota bola ISO 23/21/18; po približne 60 dňoch off-line filtrácie sa dosiahla úroveň ISO 20/18/15. Zníženie o tri kódy vo všetkých troch kanáloch zodpovedá približne osemnásobnému posunu koncentračných hraníc jednotlivých tried. Ide o významné zlepšenie, ale ešte nie o konečný cieľ: požadovaná prevádzková úroveň bola ISO 19/17/14. Tento príklad preto dobre ilustruje rozdiel medzi „filtrácia funguje“ a „systém už dosiahol stanovený cieľ“.



Obr. 2 Off-line filtrácia prevodovky s olejom ISO VG 320 (a) a membránové zobrazenie pevnej kontaminácie pred filtráciou (b) a po dlhodobom filtračnom režime (c). Zdroj: autor/ECOFIL.

3.2 Ďalšie priemyselné aplikácie

Vo výrobe pneumatík bol pre prevodovku s olejom ISO VG 220 stanovený cieľ ISO 18/16/13. Pri servisnom zásahu na mobilnej technike, kde sa kombinoval hydraulický a prevodový okruh, sa stav ISO 23/21/18 zlepšil po približne 60 minútach filtrácie a preplachu na ISO 18/16/13. Pokles o päť kódov predstavuje približne 32-násobný posun triedových hraníc koncentrácie častíc; presný percentuálny pokles by však bolo možné určiť až z absolútnych počtov častíc. Ďalšie prípady zahŕňali ISO VG 460 v cementárni a in-line filtráciu prevodov ISO VG 220 a ISO VG 150 pri ťažbe bauxitovej rudy [11].

Tab. 2 Vybrané prevádzkové prípady a vyhodnotenie filtračného zásahu

Aplikácia	Olej / objem	Východiskový stav	Cieľ / výsledok	Technické zhodnotenie
Robotické prevodovky – nová náplň	neuvedené	nový olej	cieľ ISO 17/15/12	filtrácia ešte pred plnením
Výroba celulózy	ISO VG 320 / 470 l	ISO 23/21/18	po 60 dňoch ISO 20/18/15; cieľ 19/17/14	výrazné zlepšenie, cieľ ešte nedosiahnutý
Výroba pneumatík	ISO VG 220	neuvedené	cieľ ISO 18/16/13	riadená cieľová čistota prevodu
Mobilná technika – traktor	hydraulika + prevod	ISO 23/21/18	po 60 min ISO 18/16/13	účinný preplach a odstránenie servisnej kontaminácie
Ťažba bauxitu	ISO VG 220 / ISO VG 150	prevádzková náplň	in-line filtrácia	kontinuálne znižovanie časticovej záťaže

4. Diagnostický a prediktívny rámec starostlivosti o olej

4.1 Rozlíšenie kontaminácie a chemickej degradácie

Kľúčovou odbornou úlohou je rozlíšiť olej, ktorý je chemicky stále spôsobilý, ale kontaminovaný, od oleja, ktorého základová zložka alebo aditivačný systém už výrazne degraduje. Ak je dominantným problémom kontaminácia pevnými časticami, vodou, mäkkými kalmi a TAN, FTIR a ďalšie chemické parametre zostávajú stabilné, filtrácia, dehydratácia alebo preplach môžu obnoviť prevádzkovú čistotu bez okamžitej výmeny celej náplne. Ak však súčasne rastie TAN, mení sa viskozita, zvyšuje sa oxidačný signál FTIR mechanická filtrácia nie je náhradou za výmenu alebo hlbší regeneračný zásah.

Rovnako dôležitá je kompatibilita olejov pri dopĺňaní. Neplánované zmiešanie minerálneho, PAO, esterového alebo iného základového systému a rozdielnych aditivačných technológií môže zhoršiť deemulgačné, protipenivostné a filtračné vlastnosti. Skladovanie, označovanie a evidencia mazív preto patria do rovnakého systému riadenia spoľahlivosti ako laboratórna diagnostika a filtrácia.

4.2 Od periodickej výmeny oleja k údržbe podľa stavu

Periodický interval výmeny oleja je jednoduchý na plánovanie, ale nerozlišuje skutočný mechanizmus zhoršovania stavu oleja. Prediktívny model pracuje s východiskovým profilom a trendom: definuje cieľovú čistotu oleja pre konkrétnu prevodovku, sleduje obsah vody, viskozitu, TAN, teplotu a indikátory opotrebenia a po každom zásahu overuje, či sa stav stabilizoval. Ak sa po úspešnej filtrácii trieda čistoty rýchlo vracia na pôvodnú úroveň, filtrácia zároveň odhalila existenciu aktívneho zdroja častíc – napríklad opotrebenie, netesnosť, nevhodné odvzdušnenie alebo kontaminované dopĺňanie. Filtračný proces sa tak stáva súčasťou diagnostického experimentu, nie iba údržbovým úkonom.

Z prevádzkového aj environmentálneho hľadiska je dôležité, že predĺženie použiteľnosti chemicky spôsobilej olejov náplne znižuje spotrebu nového oleja, objem odpadového oleja, logistiku a prestoje. Zdrojová prezentácia uvádza aj výrazné prínosy v oblasti spoľahlivosti a uhlíkovej stopy [11]. Pri medzinárodnom technickom alebo ESG vykazovaní je však potrebné každý kvantitatívny údaj o úspore CO_2 viazať na definovanú metodiku životného cyklu, typ oleja, energiu spotrebovanú filtráciou a jasne stanovené hranice systému.

Záver

Filtrácia vysokoviskóznych prevodových olejov dosahuje najvyšší technický prínos vtedy, keď je súčasťou komplexného manažmentu stavu oleja. Rozhodujúcim cieľom nie je jednorazovo „prefiltrovať“ náplň, ale dlhodobo udržiavať definovanú triedu čistoty, kontrolovať vodu a teplotu, sledovať viskozitu a chemickú degradáciu a vyhodnocovať trend vo vzťahu ku kritickosti konkrétnej prevodovky. Pri vysokých viskozitách musí byť filtračný okruh dimenzovaný s ohľadom na tlakové straty, studený štart a reálnu separačnú účinnosť prvku.

Priemyselné prípady ukázali, že riadená filtrácia môže významne znížiť kontamináciu pevnými časticami, vodou a mäkkými kalmi aj pri olejoch ISO VG 150 až 460. V prípade ISO VG 320 bol dosiahnutý posun z ISO 23/21/18 na 20/18/15 a pri servisnom preplachu mobilnej techniky až na 18/16/13. Základnými implementačnými zásadami sú preto filtrácia novej náplne pred plnením, definovanie aplikačne primeraného cieľa čistoty, trendovanie kľúčových

fyzikálno-chemických a tribodiagnostických parametrov a prepojenie filtrácie s on-line monitoringom a laboratórnou diagnostikou. Takýto prístup posúva starostlivosť o prevodové oleje od plánovanej údržby k prediktívnemu riadeniu spoľahlivosti a zároveň podporuje materiálovú efektívnosť prevádzky.

Použitá literatúra:

[1] ISO 12925-1:2024. Lubricants, industrial oils and related products (class L) — Family C (gears) — Part 1: Specifications for lubricants for enclosed gear systems.
[2] ISO 4406:2021. Hydraulic fluid power — Fluids — Method for coding the level of contamination by solid particles.
[3] ISO 11171:2022. Hydraulic fluid power — Calibration of automatic particle counters for liquids.
[4] ISO 11500:2022 + Amd 1:2026. Hydraulic fluid power — Determination of the particulate contamination level of a liquid sample by automatic particle counting using the light-extinction principle.
[5] ISO 16889:2022. Hydraulic fluid power — Filters — Multi-pass method for evaluating filtration performance of a filter element.
[6] ISO 14635-1:2023. Gears — FZG test procedures — Part 1: FZG test method A/8,3/90 for relative scuffing load-carrying capacity of oils.
[7] ASTM D445-26. Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity).
[8] ASTM D664-24. Standard Test Method for Acid Number of Petroleum Products by Potentiometric Titration.
[9] ASTM D6304-25. Standard Test Method for Determination of Water in Petroleum Products, Lubricating Oils, and Additives by Coulometric Karl Fischer Titration.
[10] SAE AS4059G:2022. Contamination Classification for Hydraulic Fluids.
[11] UBREŽI, I. Filtrácia a ošetrovanie vysokoviskóznych prevodových olejov. Konferenčná prezentácia, ECOFIL, spol. s r.o., 2026.

Autor(i):

Ing. Igor Ubreži, CTD
CSO – Chief Sales Officer
ECOFIL, spol. s r.o.
Okružná 6001
Michalovce
Slovensko
Tel.: +421 905518887 E-mail: ubrezi@ecofil.sk

BEZKONTAKTNÁ OPTICKÁ DIAGNOSTIKA DEFORMAČNÉHO SPRÁVANIA AUXETICKÝCH ŠTRUKTÚR

Non-contact optical diagnostics of the deformation behaviour of auxetic structures

Barbara Schürger[1], Michal Hovanec[1], Ivana Kolláriková[1], Robert Szaniszló[2]

[1]Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta, Rampová 7, 040 01 Košice
[2]Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, Letná 1/9, 042 00 Košice

Anotácia

Príspevok sa zaoberá bezkontaktným optickým hodnotením deformačného správania re-entrant auxetickej štruktúry vyrobenej technológiou FDM z materiálu PLA. Na sledovanie lokálnych deformácií bol vytvorený vlastný algoritmus spracovania obrazu v prostredí MATLAB, ktorý vyhodnocuje pohyb referenčných bodov počas jednoosovej ťahovej skúšky. Analýza bola realizovaná pre päť sád markerov S1–S5 a výsledné hodnoty Poissonovho čísla boli porovnané s numerickým modelom v prostredí ANSYS. Vo všetkých oblastiach bolo potvrdené auxetické správanie, pričom priemerná relatívna odchýlka experimentálnych výsledkov od MKP dosiahla 3,30 %. Navrhnutý postup predstavuje prakticky využiteľnú bezkontaktnú metódu na hodnotenie lokálnej deformácie tenkostenných bunkových štruktúr.

Kľúčové slová: auxetická štruktúra, optické meranie, obrazová analýza, Poissonovo číslo, technická diagnostika

Abstract

The paper presents a non-contact optical method for evaluating the deformation behaviour of an FDM-manufactured re-entrant auxetic structure made of PLA. A custom MATLAB image-processing algorithm was developed to track reference points and determine local strains during a uniaxial tensile test. Five marker sets (S1–S5) were evaluated, and the resulting Poisson's ratios were compared with reference values obtained from a finite element model in ANSYS. Auxetic behaviour was confirmed in all investigated regions, while the mean relative deviation of the experimental results from the FEM solution was 3.30%. The results also demonstrated the local character of the deformation within the cellular structure. The proposed approach provides a practical non-contact method for evaluating deformation in thin-walled cellular structures.

Keywords: *auxetic structure, optical measurement, image analysis, Poisson's ratio, technical diagnostics*

Úvod

Mechanické metamateriály predstavujú triedu cielene navrhnutých štruktúr, ktorých výsledná mechanická odozva je určovaná predovšetkým geometriou a priestorovým usporiadaním základných buniek, nielen vlastnosťami základného materiálu. Osobitnú skupinu tvoria auxetické štruktúry, charakteristické záporným Poissonovým číslom – ktoré sa prejavuje priečnym rozširovaním štruktúry pri ťahovom zaťažení. Takéto správanie sa využíva

pri návrhu ľahkých konštrukcií, prvkov s riadenou deformáciou, ochranných systémov a štruktúr so zvýšenou schopnosťou absorpcie energie [1–4].

Práve možnosť riadiť tuhosť, tvar a energetickú absorpciu prostredníctvom samotnej geometrie robí auxetické zaujímavými aj v leteckej technike. Publikované práce sa zaoberajú napríklad koncepčným návrhom morfujúceho krídla s poddajným profilom obsahujúcim auxetickú štruktúru [5], pružným poťahom s nulovým Poissonovým číslom určeným pre dvojrozmerné morfovanie krídla [6], deformačným a energeticko-absorpčným správaním aditívne vyrobených auxetických štruktúr pri tlakovom zaťažení [7], alebo zlepšením nárazovej odolnosti sendvičových krídlových konštrukcií pomocou jadier so záporným Poissonovým číslom [8]. Vo všetkých týchto prípadoch je dôležité spoľahlivo experimentálne overiť, ako sa auxetická štruktúra pri zaťažení skutočne deformuje. Pri tenkostenných bunkových štruktúrach je však takéto meranie náročné, a preto predstavuje zaujímavú úlohu aj z pohľadu technickej diagnostiky.

Re-entrant geometria patrí medzi základné a najčastejšie skúmané typy auxetických štruktúr [9]. Pri zaťažení sa šikmé ligamenty re-entrant bunky natáčajú a ohýbajú. Vďaka tomuto mechanizmu sa štruktúra pri pozdĺžnom ťahu zároveň rozširuje aj v priečnom smere. Re-entrant štruktúry dokážeme vyrobiť aditívnymi technológiami, ktoré umožňujú realizovať geometricky zložité bunkové štruktúry s vysokou presnosťou [10]. Experimentálne meranie deformácie takýchto štruktúr však nie je jednoduché. Deformácia nie je po celej vzorke rovnomerná a jednotlivé časti bunkovej siete sa môžu správať odlišne. Úzke ligamenty zároveň sťažujú použitie klasických kontaktných extenzometrov. Ich upevnenie môže navyše lokálne ovplyvniť mechanickú odozvu tenkostenného prvku a tým aj výsledok merania.

Problematická môže byť aj aplikácia plnohodnotnej plošnej digitálnej obrazovej korelácie (DIC), ktorá si na spoľahlivé vyhodnotenie posunového poľa vyžaduje kvalitný náhodný kontrastný vzor v dostatočne veľkej ploche jednotlivého sledovaného prvku. Na úzkych a zakrivených ligamentoch auxetickej vzorky nie je vždy možné takýto vzor vytvoriť a súčasne veľká lokálna rotácia ligamentu počas deformácie môže spôsobiť dekoreláciu sledovaného obrazového okna (subsetu). Tieto obmedzenia boli motiváciou pre vytvorenie alternatívneho prístupu založeného na sledovaní diskrétnych, geometricky jednoznačne definovaných referenčných bodov v uzloch bunkovej siete namiesto sledovania celkového plošného poľa posunutí.

Napriek rozsiahlemu záujmu o auxetické štruktúry z hľadiska návrhu a numerického modelovania zostáva otázka jednoduchého, prakticky dostupného a súčasne bezkontaktného spôsobu lokálneho hodnotenia ich deformácie pomerne málo preskúmaná. Cieľom tohto príspevku je preto navrhnúť a experimentálne overiť bezkontaktný diagnostický postup založený na obrazovej analýze a sledovaní referenčných bodov, ktorý umožní vyhodnotiť lokálnu deformáciu a Poissonovo číslo auxetickej vzorky pri jednoosovom ťahovom zaťažení a porovnať ich s referenčným numerickým riešením.

Metóda bola aplikovaná na FDM vzorke re-entrant auxetickej štruktúry počas jednoosovej ťahovej skúšky. Lokálne deformácie a Poissonovo číslo boli vyhodnotené v piatich reprezentatívnych oblastiach vzorky a porovnané s hodnotami získanými numerickou simuláciou v prostredí ANSYS. Takto zvolený rozsah umožňuje posúdiť nielen presnosť obrazového vyhodnotenia, ale aj priestorovú variabilitu a symetriu deformačnej odozvy v rámci jednej vzorky. Širšie porovnanie s ďalšími optickými a automatizovanými metódami, ako aj rozšírenie na ďalšie materiály a topológie, je predmetom nadväzujúceho výskumu.

1. Numerická analýza

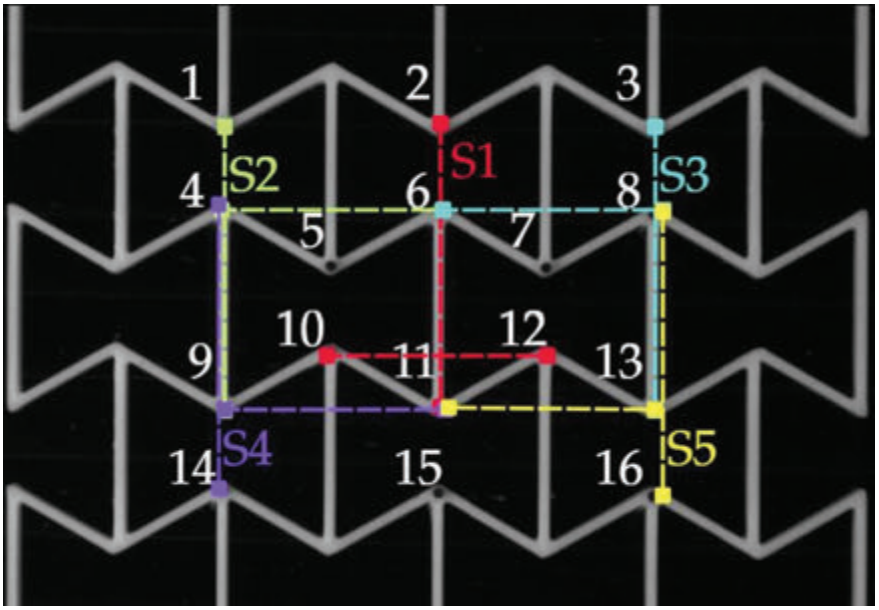
Na posúdenie správnosti experimentálneho vyhodnotenia bol vytvorený numerický model re-entrant štruktúry v prostredí ANSYS, riešený ako rovinná úloha za predpokladu malých deformácií. Materiál PLA bol v modeli uvažovaný ako izotropný, lineárne elastický, s Youngovým modulom pružnosti E = 2939 MPa a Poissonovým číslom materiálu v = 0,33. Sieť konečných prvkov bola vytvorená kvadratickými rovinnými prvkami; na základe konvergenčnej štúdie bola zvolená charakteristická veľkosť elementu 0,25 mm.

Numerická analýza v rozsahu zaťažujúcej sily 10 až 50 N ukázala, že pri sile 30 N zostáva maximálne ekvivalentné napätie v modeli približne 45,3 MPa, teda pod uvažovanou medzou klzu materiálu PLA 56,92 MPa. Hodnota 30 N bola preto zvolená ako referenčná úroveň zaťaženia, umožňujúca porovnávať numerickú a experimentálnu deformáciu v elastickej oblasti.

Na povrchu vzorky boli zvolené referenčné body (1-16) v charakteristických uzloch bunkovej siete, ktorých vzájomná poloha umožňovala samostatne sledovať zmenu vzdialenosti v smere zaťaženia aj v priečnom smere. Pre lokálne vyhodnotenie bolo použitých päť reprezentatívnych sád bodov S1 až S5, uvedených v Tab. 1, Obr. 1. Sada S1 predstavuje centrálnu referenčnú oblasť vzorky, sady S2 a S3 slúžia na kontrolu ľavej a pravej časti vzorky a sady S4 a S5 na kontrolu symetrie v ľavej, resp. pravej spodnej časti štruktúry. Takéto usporiadanie umožňuje overiť samotný auxetický efekt, posúdiť priestorovú variabilitu deformácie a súčasne skontrolovať, či sa geometricky porovnateľné časti vzorky deformujú symetricky.

Tab. 1 Definícia sád referenčných bodov S1–S5 použitých na lokálne vyhodnotenie pozdĺžnej a priečnej deformácie a ich umiestnenie vzhľadom na geometriu vzorky

Sada	Pozdĺžna dvojica	Priečna dvojica	Charakter oblasti
S1	2–11	10–12	centrálna referenčná oblasť
S2	1–9	4–6	kontrola ľavej časti vzorky
S3	3–13	6–8	kontrola pravej časti vzorky
S4	4–14	9–11	kontrola symetrie v ľavej spodnej časti
S5	8–16	11–13	kontrola symetrie v pravej spodnej časti



Obr. 1 Vizuálne zobrazenie markerov

Na posúdenie správnosti experimentálneho vyhodnotenia bol vytvorený numerický model re-entrant štruktúry v prostredí ANSYS, riešený ako rovinná úloha za predpokladu malých deformácií. Materiál PLA bol v modeli uvažovaný ako izotropný, lineárne elastický, s Youngovým modulom pružnosti E = 2939 MPa a Poissonovým číslom materiálu v = 0,33. Sieť konečných prvkov bola vytvorená kvadratickými rovinnými prvkami; na základe konvergenčnej štúdie bola zvolená charakteristická veľkosť elementu 0,25 mm.

Pozdĺžne a priečne pomerné deformácie boli určené zo zmeny vzdialenosti medzi príslušnými dvojicami bodov. Pre smer i platí

$$\varepsilon_{\mathrm{i}} = -\frac{(L_{\mathrm{i}} - L_{0,\mathrm{i}})}{L_{0,\mathrm{i}}}, \tag{2.1}$$

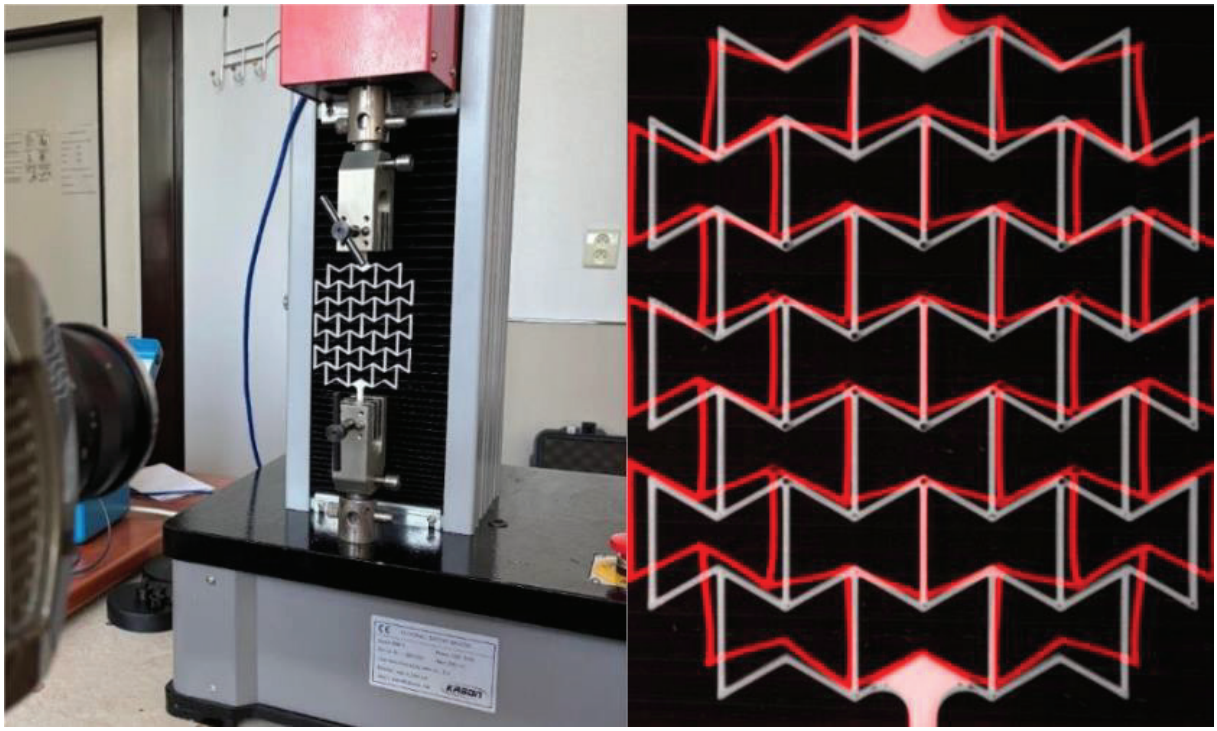
kde $L_{0,i}$ je počiatočná vzdialenosť dvojice referenčných bodov a L_i je vzdialenosť po deformácii. Poissonovo číslo bolo následne stanovené ako záporný pomer priečnej a pozdĺžnej deformácie

$$\mu = -\frac{\varepsilon x}{\varepsilon y}. \tag{2.2}$$

2. Experimentálna analýza

Pre experimentálnu analýzu bola použitá identická vzorka ako pri numerickej analýze, pričom vzorka bola vyrobená z materiálu PLA technológiou FDM (Fused Deposition Modeling). Vzorka bola upnutá do čeľustí univerzálneho skúšobného zariadenia tak, aby bolo zaťaženie aplikované priamo v osi a aby sa minimalizoval vznik nežiaducich excentricít (Obr. 2).

Jednoosová ťahová skúška prebiehala v kvázistatickom režime pri konštantnej rýchlosti posuvu priečnika 20 mm/min. Počas skúšky bol kontinuálne zaznamenávaný časový priebeh sily a posunutia priečnika skúšobného zariadenia.



Obr. 2 Experimentálna jednoosová ťahová skúška s bezkontaktným optickým sledovaním deformácie (vľavo) a prekrytie nedeformovaného a deformovaného stavu vzorky (vpravo)

Súčasne so záznamom sily a posunutia bol počas celej skúšky snímaný kontinuálny obrazový záznam deformácie vzorky. Kamera bola orientovaná kolmo na rovinu vzorky, čím sa obmedzil vplyv perspektívnej chyby na vyhodnocované vzdialenosti medzi referenčnými bodmi. Pred meraním bola vykonaná kalibrácia obrazového systému pomocou referenčného etalónu známej dĺžky umiestneného v rovine vzorky, ktorý umožnil prevod obrazových súradníc (v pixeloch) na reálne fyzikálne rozmery.

3. Spracovanie obrazových dát v prostredí MATLAB

Na spracovanie experimentálneho obrazového záznamu bol vytvorený vlastný algoritmus v prostredí MATLAB, ktorého úlohou je automatizovať prevod obrazových dát na trajektórie referenčných bodov a následne na mechanické veličiny použiteľné pri hodnotení auxetického správania (Obr. 3). Vstupné snímky boli načítané spolu s kalibračnými parametrami kamerového systému. Predspracovanie obrazu zahŕňalo normalizáciu obrazu, korekciu orientácie snímky a operácie zamerané na stabilizáciu detekcie referenčných bodov v celej obrazovej sekvencii.

Poloha markerov bola po počiatočnom výbere ďalej spresňovaná lokálnou analýzou intenzity obrazu. Použité boli kroky založené na Gaussovom filtrovaní potláčajúcom šum, adaptívnom prahovaní oddeľujúcom marker od pozadia a výpočte váženého centroidu binarizovanej oblasti, ktorý umožňuje subpixelové určenie jeho polohy. Takto získané obrazové súradnice boli pomocou kalibrácie transformované do reálneho súradnicového systému a výsledné trajektórie boli pre zníženie vplyvu vysokofrekvenčného šumu vyhladené filtrom typu moving average.

Výhodou navrhnutého postupu je možnosť výberu dvojice referenčných bodov v ľubovoľných oblastiach bunkovej siete a pre každú z nich samostatne vyhodnotiť pozdĺžnu deformáciu, priečnu deformáciu a Poissonovo číslo bez potreby kontaktného snímača. Rovnaký princíp spracovania obrazu je pritom nezávislý od konkrétnej voľby referenčných bodov, čo umožňuje jeho použitie aj pre iné dvojice alebo iné oblasti bunkovej siete bez zásahu do samotného algoritmu.



Obr. 3 Zjednodušený vývojový diagram algoritmu spracovania obrazových dát v prostredí MATLAB, od načítania snímok po výpočet lokálneho Poissonovho čísla

4. Výsledky

Vo všetkých piatich hodnotených oblastiach bola numericky, ako aj experimentálne, potvrdená záporná hodnota Poissonovho čísla. Navrhnutý obrazový postup teda spoľahlivo zachytáva typický auxetický deformačný mechanizmus, pri ktorom sa vzorka pri pozdĺžnom ťahu rozširuje aj v priečnom smere. Číselné výsledky pre všetky sledované sady sú zhrnuté v Tab. 2.

Na vyjadrenie rozdielu medzi numerickou a experimentálne získanou hodnotou bola použitá relatívna odchýlka:

$$\Delta = \frac{|\mu MKP - \mu MATLAB|}{|\mu MKP|} . 100\% \qquad (4.1)$$

Kde: $\mu MATLAB$ predstavuje hodnotu získanú pomocou MATLAB-u a μMKP referenčnú hodnotu získanú z numerickej simulácie.

Tab. 2 Porovnanie lokálneho Poissonovho čísla μ získaného numerickou analýzou (MKP) a bezkontaktnou obrazovou analýzou (MATLAB) pre sady S1–S5

Sada	μ_{MKP} [-]	μ_{MATLAB} [-]	Relatívna odchýlka [%]
S1	−0,493	−0,497	0,81
S2	−1,215	−1,233	1,48
S3	−1,199	−1,144	4,59
S4	−1,180	−1,116	5,42
S5	−1,215	−1,164	4,20
Priemer	−1,060	−1,031	3,30

Najmenšia relatívna odchýlka medzi experimentálnym a numerickým výsledkom bola zaznamenaná v centrálnej sade S1 (0,81 %), kde experimentálna hodnota μ = −0,497 prakticky zodpovedala numerickej hodnote μ = −0,493. V sade S2 dosiahla odchýlka 1,48 %, v sade S3 4,59 %, v sade S4 5,42 % a v sade S5 4,20 %. Priemerná relatívna odchýlka experimentálneho vyhodnotenia od MKP výsledku pre všetkých päť sád dosiahla 3,30 %. Priemerná hodnota lokálneho Poissonovho čísla zo všetkých sád predstavovala μ = −1,060 pre MKP a μ = −1,031 pre MATLAB.

Z hľadiska absolútnej hodnoty Poissonovho čísla sa centrálna sada S1 (μ ≈ −0,5) zreteľne odlišuje od kontrolných sád S2 až S5, ktoré sa v oboch metódach pohybovali v úzkom pásme približne od −1,12 do −1,23. V rámci tohto pásma boli hodnoty pre ľavú a pravú stranu vzorky (S2/S3, resp. S4/S5) navzájom blízke, čo naznačuje približne symetrické deformačné správanie vo vzájomne zodpovedajúcich oblastiach vzorky. Interpretácia tohto rozdielu a jeho možné príčiny sú rozobrané v nasledujúcej kapitole.

5. Diskusia

5.1 Interpretácia lokálnych rozdielov a symetrie odozvy

Skutočnosť, že nižšia hodnota Poissonovho čísla v sade S1 sa prejavuje nezávisle v numerickom aj v experimentálnom vyhodnotení, naznačuje, že nejde o artefakt obrazovej metódy, ale o reálny geometrický a mechanický jav súvisiaci s polohou tejto oblasti v rámci štruktúry. Sada S1 predstavuje centrálnu referenčnú oblasť, zatiaľ čo sady S2 až S5 sú situované bližšie k bočným, resp. dolným okrajom vzorky. Takéto usporiadanie pripúšťa, že rotačno-ohybový mechanizmus šikmých ligamentov sa v blízkosti okrajov vzorky prejavuje výraznejšie, napríklad v dôsledku menšieho priečneho obmedzenia zo strany susedných buniek, zatiaľ čo centrálna oblasť lepšie vystihuje správanie štruktúry bez výrazného vplyvu okrajov vzorky. Overenie tejto hypotézy by si vyžadovalo hodnotenie väčšieho počtu buniek v rôznej vzdialenosti od okraja vzorky, čo presahuje rozsah tohto príspevku.

Podobnosť výsledkov medzi sadami S2/S3 a S4/S5 dokumentuje stabilitu deformačného mechanizmu a potvrdzuje, že zvolené upnutie vzorky viedlo k symetrickému zaťaženiu bez výraznej excentricity. Z pohľadu technickej diagnostiky je podstatné, že navrhnutá metóda neposkytuje iba jednu globálnu hodnotu deformácie, ale umožňuje súčasne porovnávať odozvu vo viacerých lokálnych oblastiach. Pri hodnotení geometricky členitých bunkových konštrukcií môže práve takýto prístup odhaliť nerovnomernosť deformácie alebo lokálnu odchýlku od očakávanej symetrie – presne tak, ako to v tomto príspevku demonštruje

odlišná hodnota sady S1. Zároveň to znamená, že výsledok lokálneho Poissonovho čísla je citlivý na presnú polohu referenčných bodov, a preto ho nemožno zovšeobecňovať na správanie celej vzorky; interpretácia si vyžaduje súbežné vyhodnotenie viacerých reprezentatívnych sád, ako bolo urobené v tejto práci.

Kombinácia numerického modelu a bezkontaktného optického merania sa v tomto zmysle javí ako výhodná: numerický model poskytuje nezávislú referenčnú hodnotu na overenie správnosti obrazového vyhodnotenia, zatiaľ čo experimentálne meranie zároveň umožňuje posúdiť, do akej miery zjednodušený numerický model (lineárne elastický materiál, rovinná úloha) zodpovedá reálnemu správaniu vzorky.

5.2 Technickodiagnostický a aplikačný význam

Navrhnutý postup možno z hľadiska technickej diagnostiky chápať ako bezkontaktný nástroj na hodnotenie deformačného správania, verifikáciu očakávanej štrukturálnej odozvy a identifikáciu lokálnych odchýlok od predpokladaného (napr. symetrického) správania konštrukcie, a to porovnaním experimentálnej odozvy s numerickým referenčným riešením. Tento príspevok demonštruje práve takéto využitie: rozdiel medzi sadou S1 a sadami S2 až S5 predstavuje konkrétny príklad lokálnej odchýlky, ktorú by globálne (jednobodové alebo priemerované) meranie neodhalilo. V súčasnom štádiu ide o metodiku overenú v laboratórnych podmienkach na jednej vzorke; jej nasadenie napríklad do reálneho priemyselného prostredia s požiadavkou na kontinuálne alebo prediktívne diagnostické vyhodnocovanie si vyžaduje ďalší výskum.

Z hľadiska širšieho uplatnenia je metodika relevantná najmä pre experimentálne overovanie a diagnostiku geometricky zložitých auxetických konštrukcií, ale aj pre tvarovo jednoduchšie konštrukcie. Treba zdôrazniť, že skúmaná PLA vzorka v tomto príspevku nepredstavuje funkčný komponent, ale referenčnú modelovú geometriu; prezentovaný postup merania a vyhodnotenia deformácie však môže byť v budúcnosti aplikovaný aj pri experimentálnej validácii a diagnostike zložitejších a štruktúr, ktoré sú v priemysle reálne využívané [7].

5.3 Obmedzenia štúdie

Predložené výsledky majú niekoľko obmedzení, ktoré je potrebné zohľadniť pri ich interpretácii. Experiment bol vykonaný na jednej geometrickej konfigurácii re-entrant štruktúry a jednom materiáli (PLA spracovanom technológiou FDM), preto výsledky priamo nemožno zovšeobecňovať na iné auxetické topológie (napr. chirálne alebo hexagonálne) ani na iné materiály či výrobné technológie. Presnosť lokalizácie referenčných bodov závisí od kontrastu a kvality markerov v obrazovom zázname, takže zmena osvetlenia alebo kvality povrchu vzorky môže ovplyvniť dosiahnutú presnosť. Výsledky zároveň potvrdzujú lokálny, priestorovo nehomogénny charakter deformácie re-entrant štruktúry, čo znamená, že jediné lokálne meranie nemusí byť reprezentatívne pre správanie celej vzorky. Opakovateľnosť merania a jeho neistota neboli v tejto práci systematicky vyhodnocované; táto otázka je súčasťou nadväzujúceho výskumu.

Záver

Príspevok predstavil a experimentálne overil bezkontaktný postup na hodnotenie deformácie FDM re-entrant auxetickej štruktúry, založený na vlastnom algoritme spracovania

obrazových dát v prostredí MATLAB a sledovaní referenčných bodov v piatich reprezentatívnych oblastiach vzorky (S1–S5). Vo všetkých piatich oblastiach bola potvrdená záporná hodnota Poissonovho čísla a dobrá zhoda s referenčným MKP riešením, s priemernou relatívnou odchýlkou 3,30 %. Výsledky súčasne preukázali výrazný lokálny charakter deformačnej odozvy – citeľne nižšiu hodnotu v centrálnej oblasti S1 v porovnaní s okrajovými oblasťami S2 až S5 – pri zachovaní ich vzájomnej symetrie, čo potvrdzuje, že jednobodové globálne meranie by túto priestorovú variabilitu neodhalilo. Praktickým prínosom príspevku je overenie použiteľnosti navrhnutého postupu ako bezkontaktného diagnostického nástroja na hodnotenie a verifikáciu deformačného správania tenkostenných bunkových štruktúr, pri ktorých je nasadenie kontaktných extenzometrov alebo plnohodnotnej digitálnej obrazovej korelácie problematické. Ďalší výskum, ktorý bol súčasťou dizertačnej práce, sa zameria na automatizovanejšiu detekciu referenčných bodov, porovnanie s ďalšími optickými systémami a rozšírenie na ďalšie materiály a geometrické konfigurácie.

Poďakovanie

Tento príspevkov vznikol s podporou projektu: „Komplexný výskum inovatívnych kompozitných materiálov pre široké spektrum aplikovateľnosti v inteligentnom priemysle“ (akronym: KOMITMENT), kód ITMS2021+: 401101C721, spolufinancovaného Európskou úniou v rámci Programu Slovensko.

Použitá literatúra:

[1] HUFERT, J. et al. Deformation Behavior of 3D Printed Auxetic Structures of Thermoplastic Polymers: PLA, PBAT, and Blends. Polymers. 2023, 15(2), 389. DOI: 10.3390/polym15020389.

[2] PLEWA, J. et al. Experimental Study of Auxetic Structures Made of Re-Entrant (“Bow-Tie”) Cells. Materials. 2024, 17(13), 3061. DOI: 10.3390/ma17133061.

[3] WANG, S. et al. Design and Modeling of a Novel Three-Dimensional Auxetic Reentrant Honeycomb Structure for Energy Absorption. Composite Structures. 2022, 280, 114882. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.114882.

[4] FAN, J. et al. A review of additive manufacturing of metamaterials and developing trends. Materials Today. 2021, 50, 303–328.

[5] CHEN, Z. et al. Concepts for Morphing Airfoil Using Novel Auxetic Lattices. 2020, 10.1007/978-981-15-1773-0_20.

[6] CHEN, J. et al. Zero Poisson's ratio flexible skin for potential two-dimensional wing morphing. Aerospace Science and Technology. 2015, 45, 228–241.

[7] ALOMARAH, A. et al. Out-of-plane and in-plane compression of additively manufactured auxetic structures. Aerospace Science and Technology. 2020, 106, 106107.

[8] TAN, Y., ZHOU, Y. Improved crashworthiness of sandwich wing structures by using negative Poisson's ratio honeycomb cores. Thin-Walled Structures. 2025, 213, 113223.

[9] YANG, L. et al. Mechanical properties of 3D re-entrant honeycomb auxetic structures realized via additive manufacturing. International Journal of Solids and Structures. 2015, 69, 475–490.

[10] JOSEPH, A. et al. On the application of additive manufacturing methods for auxetic structures: a review. Advances in Manufacturing. 2021, 9, 223–228.

Autor(i):

Ing. Barbara Schürger
odborná asistentka
Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta
Rampová 7, 040 01 Košice
Tel.: +421 910 116 236 E-mail: barbara.schurger@tuke.sk

doc. Ing. Michal Hovanec, PhD. Ing.Paed.IGIP
vedúci katedry leteckho inžinierstva
Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta
Rampová 7, 041 00 Košice
Tel.: +421 911 422 732 E-mail: michal.hovanec@tuke.sk

Ing. Ivana Kolláriková, PhD.
odborná asistentka
Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta
Rampová 7, 041 00 Košice
Tel.: +421 950 805 181 E-mail: ivana.kolarikova@tuke.sk

Ing. Robert Szaniszló
Interný doktorand
Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta
Letná 1/9, 042 00 Košice
Tel.: +421 918 592 474 E-mail: robert.szaniszlo@tuke.sk

VPLYV ULTRAJEMNÝCH ČASTÍC NA UDRŽATEĽNÚ MOBILITU

The Impact of Ultrafine Particles on Sustainable Mobility

Lýdia Sobotová, Anna Badidová, Miroslav Badida
Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta

Anotácia

Nevýfukové emisie tuhých častíc z cestnej dopravy predstavujú významný zdroj znečistenia ovzdušia, najmä v husto osídlených mestských oblastiach. S rastúcim podielom vozidiel s nízkymi výfukovými emisiami nadobúda problematika opotrebovania bŕzd, pneumatík a vozovky čoraz väčší význam. Cieľom skúmania je lepšie identifikovať mechanizmy vzniku týchto ultrajemných častíc (UFP) a určiť faktory, ktoré ovplyvňujú ich množstvo, veľkosť a chemické zloženie. Výsledky laboratórnych experimentov naznačujú, že intenzita emisií z opotrebovania brzdových doštičiek je výrazne ovplyvnená brzdnou silou, frekvenciou brzdenia a teplotou brzdového systému. Pri prekročení určitej teplotnej hranice môže dochádzať k výraznému nárastu tvorby ultrajemných častíc, zatiaľ čo pri nižších teplotách prevládajú častice väčších rozmerových kategórií. Významným zdrojom nevýfukových emisií je takisto kontakt pneumatík s povrchom vozovky. Merania poukazujú na rast koncentrácie častíc so zvyšujúcou sa rýchlosťou vozidla, pričom výraznejšia tvorba nastáva najmä pri akcelerácii, brzdení a ďalších dynamických zmenách jazdy. Charakteristické častice sa objavujú predovšetkým v ultrajemnej a agregovanej frakcii, pričom ich veľkostné rozdelenie poskytuje informácie o mechanizmoch vzniku a ďalšieho šírenia v ovzduší. Monitorovanie v podmienkach mestskej dopravy potvrdzuje, že nevýfukové zdroje môžu tvoriť významnú časť koncentrácie UFP.

Kľúčové slová: doprava, ultrajemné častice, udržateľná mobilita

Abstract

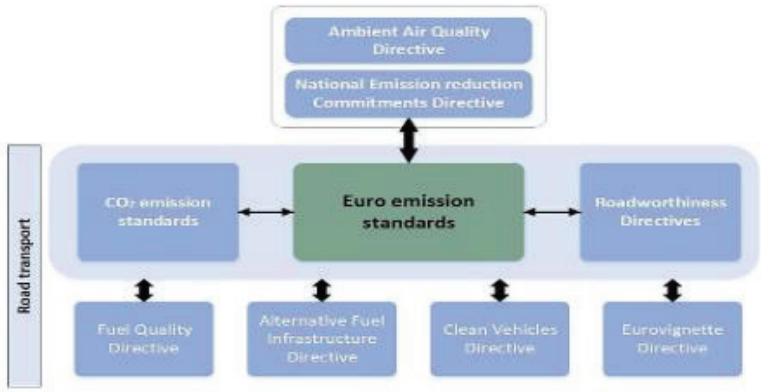
Non-exhaust particulate matter emissions from road transport represent a significant source of air pollution, especially in densely populated urban areas. With the increasing share of vehicles with low exhaust emissions, the issue of brake, tire and road wear is becoming increasingly important. The aim of the study is to better identify the mechanisms of formation of these UFP ultra fine particle and to determine the factors that influence their quantity, size and chemical composition. The results of laboratory experiments indicate that the intensity of emissions from brake pad wear is significantly influenced by the braking force, braking frequency and brake system temperature. When a certain temperature limit is exceeded, the formation of ultrafine particles can increase significantly, while at lower temperatures particles of larger size categories prevail. A significant source of non-exhaust emissions is also the contact of tires with the road surface. Measurements show an increase in particle concentration with increasing vehicle speed, with more significant formation occurring especially during acceleration, braking and other dynamic driving changes. Characteristic particles appear mainly in the ultrafine and aggregated fraction, while their size distribution provides information about the mechanisms of formation and further propagation in the air. Monitoring in urban traffic conditions confirms that non-exhaust sources can constitute a significant part of the UFP concentration.

Keywords: *transport, ultra- fine particles, sustainable mobility*

Úvod

V rámci Akčného plánu pre nulové znečistenie (Zero Pollution Action Plan) ako súčasti Zeleného dohovoru (Green Deal) si Európska komisia stanovila cieľ: znížiť počet predčasných úmrtí spôsobených jemnými časticami ($PM_{2.5}$) do roku 2030 o minimálne 55 % v porovnaní s úrovňou z roku 2005. Na dosiahnutie tohto cieľa chce EK zosúladiť normy kvality ovzdušia s odporúčaniami Svetovej zdravotníckej organizácie (WHO), ktoré sú prísnejšie než aktuálne európske limity, obr.1. Napriek zníženiu emisií z rôznych zdrojov bolo v roku 2021 až 97 % obyvateľov miest v EÚ vystavených hladinám $PM_{2.5}$ prekračujúcim ročný limit WHO (5 µg/m³).

V prípade PM_{10} bolo 71 % obyvateľov vystavených hodnotám nad ročným limitom WHO (15 µg/m³) [1].



Obr. 1 Oblasti zahrňujúce normy kvality ovzdušia

Dekarbonizácia dopravy je nevyhnutná, ale klimatická neutralita a čisté ovzdušie nie sú totožné ciele. Elektrické vozidlo počas jazdy nevypúšťa výfukové častice, stále však vytvára oder pneumatík a vozovky a môže prispievať k resuspenzii cestného prachu. Hodnotenie mobility iba podľa CO2 alebo PM2,5 preto môže prehliadnuť početne dominantné nanočastice a presun záťaže medzi ovzduším, dažďovým odtokom, pôdou a sedimentmi. [1 - 4]

1. Čo sú ultrajemné častice (UFP)?

Vlastnosti a charakteristika ultrajemných častíc (Ultrafine Particles, UFP):

- veľkosť < 100 nm,
- veľká špecifická povrchová plocha,
- vysoká reaktivita,
- odlišné transportné vlastnosti od PM2.5 a PM10,
- vyžadujú špecializované prístrojové metódy.

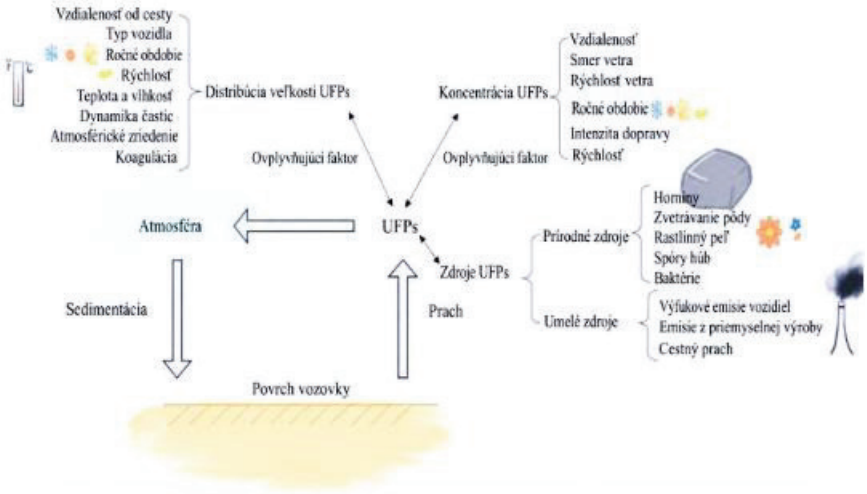
2. Hrozba šírenia UFP vzduchom z cestnej dopravy a pneumatík

Doprava a s tým spojené opotrebovanie a odieranie pneumatík sú nevyhnutným výsledkom trenia medzi pneumatikami vozidiel a vozovkou. Rýchlosť opotrebovania dezénu pneumatiky závisí od niekoľkých parametrov [1 - 4]:

- charakteristiky pneumatiky (napr. rozmer, hĺbka dezénu, konštrukcia, zloženie, vek,

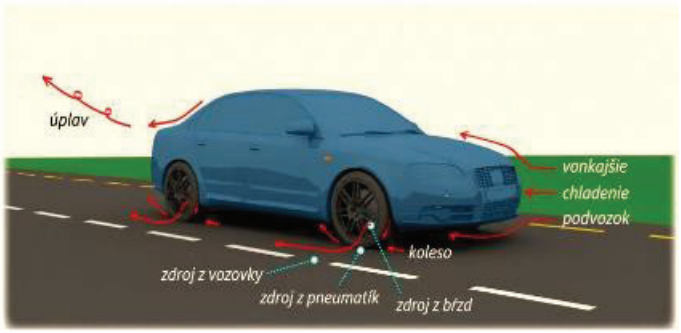
- počet najazdených kilometrov a tlak v pneumatikách),
- charakteristiky povrchu vozovky (napr. materiál, makro a mikro textúra, spojivo,
- pomer mokro/sucho, pórovitosť, teplota),
- topografia a dizajn vozovky (napr. strmosť, zakrivenie),
- prevádzka vozidla (napr. rýchlosť, lineárne a radiálne zrýchlenie),
- charakteristiky vozidla (napr. typ vozidla, hmotnosť vozidla, zavesenie kolies,
- geometria riadenia).

Po počiatočnej emisii a usadení častíc, ktoré nie sú vyčistené z vozovky, zostanú na mieste alebo budú transportované v prírodných alebo umelo vytvorených environmentálnych systémoch. Prepojené environmentálne a umelo vytvorené priestory, do ktorých a cez ktoré častice prúdia, sú: povrch vozovky, atmosféra, priľahlé povrchy, dažďová voda alebo kombinovaná kanalizácia, povrchová a podzemná voda a sedimenty. Obr. 2 znázorňuje rozloženie častíc opotrebovaných pneumatík v environmentálnych médiách. [5 - 7]



Obr. 2 Schematický diagram ultrajemných častíc a procesu prenosu [2]

Schematický diagram ultrajemných častíc a procesu prenosu je znázornený na obr.3



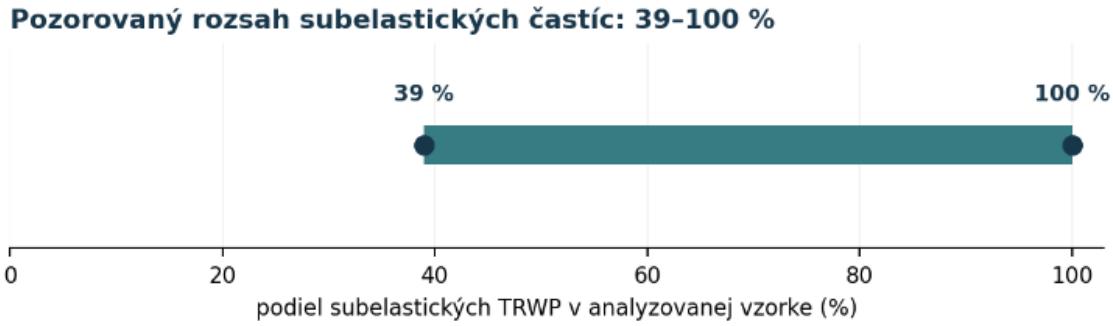
Obr. 3 Prenos znečistenia zo zdrojov bŕzd, pneumatík a ciest do širšieho prostredia [3]

Elektrifikácia odstraňuje lokálne výfukové emisie a rekuperačné brzdenie môže obmedziť mechanické opotrebovanie bŕzd. Neodstraňuje však pneumatiky ani vozovku. Ak je elektrické vozidlo ťažšie a využíva vysoký krútiaci moment agresívnym spôsobom, prínos

môže čiastočne znižovať vyšší oder. Rozhodujúca preto nie je iba technológia pohonu, ale celková hmotnosť, výkon, obsadenosť a počet prejdených kilometrov.

2.1 Pneumatiky, vozovka a vznik jemnejších frakcií

Wilkinson et al. [16] porovnali realistické častice z opotrebovania pneumatík a vozoviek (TRWP- Tire and Road Wear Particles) v cestnom simulátore. Testovali sezónne typy a značky pneumatík na asfalte a vybrané kombinácie na cementobetóne. Mikroskopia, SEM-EDX, FTIR a pyrolýzna GC/MS preukázali výraznú variabilitu počtu, hmotnosti, tvaru a chemického zloženia. Podiel mäkkých, krehkých alebo drobivých subelastických častíc dosahoval 39–100 %. Produkcia korelovala s obsahom butadiénového kaučuku ($r = 0,82$; $p = 0,004$), bez dôkazu priamej kauzality. Štúdia sa sústreďovala na hrubú frakciu nad 30 µm, teda nie na UFP. Jej význam pre UFP spočíva v mechanizme: krehké a chemicky heterogénne TRWP sa môžu ďalej mechanicky alebo fotochemicky fragmentovať a uvoľňovať výluhy. Autori zároveň pripomínajú, že pri kontakte pneumatiky s vozovkou môžu vznikať nanopartikulárne kondenzáty. Na určenie ich množstva a zdravotného významu sú však potrebné merania veľkostného spektra v nanooblasti, obr. 4. [5, 6, 7, 16, 17]



Obr. 4 Rozsah podielu subelastických TRWP v analyzovaných vzorkách [17]

Pre udržateľnú mobilitu je podstatné, že emisie ovplyvňuje výrobok aj infraštruktúra. Nízko abrazívna formulácia pneumatiky, primeraná hmotnosť vozidla, správny tlak, geometria kolies, plynulé zrýchľovanie a vhodná mikrotextúra povrchu môžu znížiť oder. Optimalizácia musí súčasne zachovať priľnavosť, brzdnú dráhu a životnosť.

2.2 UFP z pneumatík a opotrebovania bŕzd

2.2.1 Pneumatiky, vozovka a vznik jemnejších frakcií

Pri pneumatike je potrebné rozlišovať:

- mechanické,
- termické uvoľňovanie.

Mechanický oder vzniká opakovanou deformáciou behúňa, adhéziou k vozovke, mikrorezaním nerovnosťami kameniva a šmykom v kontaktnej ploche. Produkuje zmes gumy a cestného minerálneho materiálu. Wilkinson et al.[16] ukázali, že tieto TRWP majú nepravidelné siluety, rozdielnu predĺženosť a veľkosť a často nie sú pevne elastické. Mäkké, rozmazateľné, krehké alebo drobivé častice tvorili 39 – 100 % hodnotených vzoriek. Asfalt a betón menili počet aj tvar, čo poukazuje na význam mikrotextúry, kameniva a trenia.

UFP z gumy môžu vznikať aj termicky. Park et al. [17] simulovali zahrievanie behúňa v reakčnej komore. Po prekročení približne 160 °C prudko vzrástla početná koncentrácia nanočastíc. Častice mali unimodálne rozdelenie; ich počet rástol s rýchlosťou ohrevu a

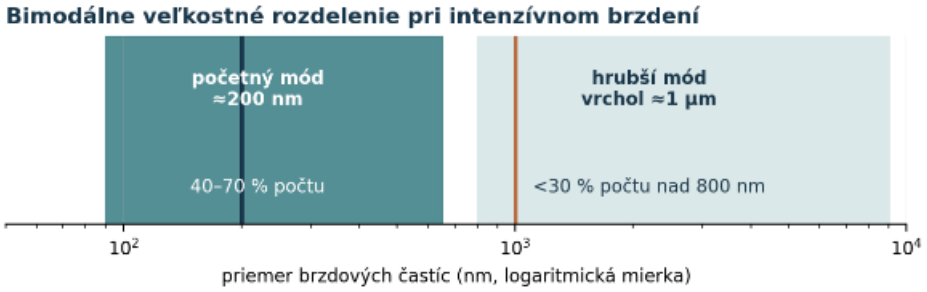
výsledný geometrický priemer ovplyvňovala rýchlosť ochladzovania. Morfologicky boli nepravidelné a obsahovali najmä C, O, S a Si. Autori mechanizmus pripísali volatilizácii organických zložiek behúňa a následnej kondenzácii. Ide teda o iný proces než odtrhnutie viditeľného kúsku gumy.

Veľkosť a tvar sa počas transportu ďalej menia. Krehká častica sa môže rozpadnúť, mäkký materiál sa môže deformovať alebo spájať s minerálnym prachom a nanočastice môžu koagulovať do aglomerátov. Preto priemer z elektrickej mobility, optický priemer a rozmery zo snímky SEM nemusia byť totožné. Pri interpretácii treba uvádzať merací princíp aj to, či sa hodnotí primárna častica alebo aglomerát.

2.3 Brzdové častice: veľkosť a tvar

Pri brzdení sa do kontaktu dostáva doštička a kotúč. Adhézia, abrazívne ryhovanie, delaminácia trecej vrstvy a tepelné poškodenie vytvárajú široké spektrum častíc. [10, 11,12, 17, 19, 21] Apicella et al. [18] použili utesnenú komoru s brzdovým dynamometrom, EEPS v rozsahu 5,6 – 560 nm a optický spektrometer v rozsahu 0,3 – 10 µm. Pri opakovanom intenzívnom brzdení sa kotúč zohrieval približne z 25 na 300 °C a počet častíc rástol s intenzitou spomalenia.

Namerané rozdelenie bolo bimodálne. Prvý početný režim zahŕňal približne 90 – 650 nm s maximom okolo 200 nm; táto frakcia tvorila 40 – 70 % celkového počtu. Druhý režim mal vrchol približne pri 1 µm a chvost smerom k väčším priemerom; častice nad 800 nm predstavovali menej ako 30 % počtu, ale významne prispievali k hmotnosti. [18] Menšie častice súviseli najmä s vysokou teplotou a volatilizáciou, väčšie s mechanickou abráziou, obr. 5.



Obr. 5 Schematické zobrazenie veľkostných režimov brzdových častíc

SEM-EDS ukázala aglomeráty nepravidelných častíc s heterogénnou veľkosťou a povrchom. Jemné častice boli premiešané s hrubšími úlomkami; časť mala vrstevnatý alebo vločkovitý tvar, hladké aj lomové plochy. Takáto morfológia zodpovedá kombinácii tepelnej degradácie, adhézie a abrázie. Materiál obsahoval približne 85 % anorganickej a 15 % organickej zložky; dominovali kyslík, železo a uhlík, s menšími podielmi Cu, Ti a Ba. Železo bolo prítomné aj vo forme magnetitu a hematit.

2.4 Výskyt a bilancia nevýfukových častíc

Správa Study on Non-Exhaust Emissions in Road Transport [19] rozlišuje opotrebovanie bŕzd, pneumatík a vozovky a resuspenziu uloženého cestného prachu. Brzdový oder je v mestskom prostredí významným zdrojom: viac než 40 % vzniknutého materiálu môže prejsť do ovzdušia. Pri pneumatikách je vzdušný podiel približne 1 – 5 %, no zvyšok nezaniká;

ostáva na vozovke, v pôde a vo vode alebo sa neskôr opätovne rozvíri. Nízka vzdušná frakcia preto nie je synonymom nízkej celkovej emisie.

Najvyššie krátkodobé koncentrácie sa očakávajú tam, kde sa spája vysoká intenzita premávky so zrýchľovaním, brzdením a slabým rozptylom: pri križovatkách a zastávkach, na frekventovaných mestských cestách, v tuneloch, podzemných garážach a kaňonoch ulíc. Pri pneumatikách rastie tvorba pri prudkej akcelerácii, prejazde zákrutami, nesprávnom tlaku, vyššom zaťažení a teplote. Ťažké vozidlá produkujú podľa správy približne troj- až päťnásobok častíc na kilometer v porovnaní s osobnými automobilmi.

Elektrifikácia má rozdielne účinky na jednotlivé zdroje. Regeneratívne brzdenie môže znížiť mechanické brzdové emisie o viac než 80 %. Vyššia hmotnosť elektrických vozidiel však môže zvýšiť oder pneumatík a vozovky; správa pracuje s priemerným rozdielom hmotnosti okolo 20 % oproti porovnateľným spaľovacím vozidlám. Celková bilancia elektrifikácie zostáva priaznivá, ale ešte väčší účinok má zníženie automobilového výkonu a presun na verejnú dopravu.

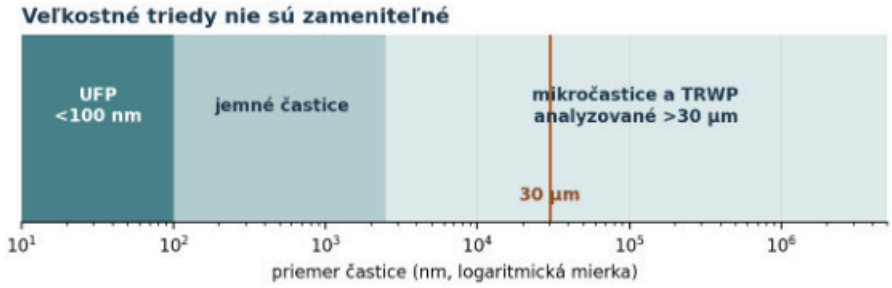
Kde je výskyt najvyšší: dopravné uzly s častým brzdením, frekventované cesty a uzavreté priestory so slabým vetraním. Pre správne porovnanie treba oddeliť koncentráciu pri zdroji, osobnú expozíciu a celkovú hmotnosť materiálu uloženého mimo ovzdušia.

2.5 Meranie úspechu dopravných opatrení

Početnú koncentráciu UFP meria kondenzačný počítač častíc (CPC): veľmi malé častice zväčší kondenzáciou pracovnej kvapaliny a následne ich opticky spočíta. Skenovací spektrometer mobility (SMPS) alebo rýchly spektrometer EEPS rozdelí častice podľa elektrickej mobility a poskytne veľkostné rozdelenie v nanometrovej oblasti. Aerodynamický spektrometer alebo ELPI dopĺňa väčšie frakcie. Výsledok závisí od dolnej medze prístroja, času odozvy, riedenia a strát nanočastíc v odberovej hadici.

Samotný počet neurčuje zdroj. Tvar a primárnu veľkosť možno hodnotiť skenovacou alebo transmisnou elektrónovou mikroskopiou (SEM/TEM); prvkové zloženie dopĺňa EDS/EDX. Organickú gumovú zložku a prísady možno identifikovať FTIR, Ramanovou spektroskopiou alebo pyrolýzou GC/MS, kým kovové markery brzd poskytuje prvková analýza. Reálne monitorovanie má kombinovať prístroje pri ceste, pozaďové miesto, dopravné údaje, meteorológiu a osobné meranie expozície.

Chen et al. [23] vyvinuli časovú štatistickú korekciu meteorologického skreslenia pre údaje zo 73 monitorovacích staníc regiónu Peking–Tchien-ťin–Che-pej. Po normalizácii zistili medzi rokmi 2013 a 2016 pokles $PM_{2,5}$ o 27 % a SO_2 o 51 %, spojený s vyraďovaním znečisťujúcich zariadení a 20,7 % poklesom spotreby uhlia. NO_2 klesol iba o 4,5 %, zatiaľ čo prízemný O_3 vzrástol o 11,3 %. Zlepšenie jedného indikátora teda neznamenalo univerzálne zlepšenie ovzdušia, obr. 6.



Obr. 6 Veľkostné rozlíšenie UFP, jemných častíc a hrubej frakcie TRWP; hranica >30 µm

Pre mobilitu z toho vyplývajú dve požiadavky:

- Po prvé, trendy UFP sa musia normalizovať podľa meteorológie, dennej doby a intenzity dopravy, aby sa účinok politiky nezamieňal s priaznivým počasím.
- Po druhé, hodnotiaci súbor musí zahŕňať početnú koncentráciu častíc, veľkostné rozdelenie, black carbon, $PM_{2,5}$, NO_2 a O_3. Politika, ktorá znižuje hmotnosť častíc, môže meniť počet UFP alebo prekurzory sekundárneho aerosólu.

Dopravné experimenty by mali porovnávať rovnaké trasy, rýchlosti a meteorologické podmienky pred a po zavedení nízkoemisnej zóny, elektrifikácie flotily či zmeny organizácie dopravy. Bez kontrolných lokalít a zdrojovej aporcionácie nemožno oddeliť výfukové, nevýfukové a regionálne pozadie [23].

2.6 Vplyv UFP na človeka

UFP sa ukladajú v dýchacom trakte mechanizmami difúzie; veľká aktívna plocha umožňuje niesť organické zlúčeniny a kovy. Experimentálne a epidemiologické poznatky spájajú expozíciu s oxidačným stresom, zápalovou odpoveďou, zmenami funkcie ciev a zhoršením respiračných a kardiovaskulárnych ukazovateľov. Časť najmenších častíc môže po depozícii prenikať cez alveolárnu bariéru alebo ovplyvňovať vzdialené orgány prostredníctvom zápalových mediátorov. Pri nevýfukových časticiach je dôležitá aj chemická reaktivita kovov z bŕzd a organických zložiek pneumatiky.

Riziko nie je určené iba priemernou hmotnosťou $PM_{2,5}$. UFP majú malú hmotnosť, ale vysoký počet a povrch, preto môže hmotnostný monitoring ich zmeny prehliadnuť. Najviac ohrození sú ľudia žijúci alebo pracujúci pri frekventovaných cestách, profesionálni vodiči, pracovníci v tuneloch a garážach, deti, starší ľudia a osoby s astmou alebo kardiovaskulárnym ochorením. Zdravotné tvrdenia však nemožno automaticky preniesť na každú zmes: toxicita závisí od veľkosti, dávky, tvaru, rozpustnosti a chemického zloženia [8, 9, 10, 25, 26, 27].

3. UFP ako kritérium udržateľnej mobility

Udržateľná mobilita má znižovať klimatickú, zdravotnú aj ekosystémovú záťaž pri zachovaní dostupnosti. UFP dopĺňajú tradičné ukazovatele o rozmer, ktorý hmotnostné normy zachytávajú nedostatočne. Ich začlenenie mení poradie priorít: najväčší prínos často neprináša iba výmena pohonu, ale zníženie počtu a dĺžky jázd, hmotnosti vozidiel a expozície ľudí v dopravných koridoroch.

Tab. 1 Porovnanie dôkazov z vybraných DOI a ich použiteľnosti pre tému UFP

Zdroj	Veľkostný rámec	Tvar/transformácia	Význam pre UFP
Wilkinson et al. (2023)	TRWP >30 µm; simulátor	mäkké, krehké, drobivé aj elastické	priamy dôkaz tvaru hrubej frakcie
Park et al. (2017)	nanočastice z behúňa	nepravidelné; C, O, S, Si	kondenzácia nad 160 °C
Apicella et al. (2026)	brzdy: 90 nm –10 µm	aglomeráty, vločky, lomy	mód ≈200 nm; vrchol ≈1 µm
EIT Urban Mobility (2025)	brzdy, pneumatiky, vozovka	>40 % brzdového; 1–5 % pneu oderu vo vzduchu	bilancia nevýfukových emisií

Opatrenia na zníženie UFP v doprave možno zhrnúť do bodov:

- **Predísť jazde —** Kompaktné územné plánovanie, dostupné služby a práca na diaľku znižujú dopravný výkon aj všetky druhy emisií.
- **Presunúť dopravu —** Chôdza, bicykel a kvalitná verejná doprava znižujú počet vozidiel, spotrebu energie, oder aj priestorové nároky.
- **Zlepšiť vozidlá —** Elektrifikácia, nízka hmotnosť, primeraný výkon, nízkoabrazívne pneumatiky a účinné zachytávanie častíc obmedzujú zvyškové emisie.
- **Zlepšiť infraštruktúru —** Plynulá premávka, nižšie rýchlosti, vhodné povrchy, čistenie ciest a manažment dažďového odtoku znižujú tvorbu, resuspenziu a transport.
- **Chrániť ľudí —** Odstup škôl a chodníkov od intenzívnej premávky, vegetačné a stavebné riešenia a dobré vetranie obmedzujú expozíciu.

3.1 Indikátory a monitoring

Minimálny monitorovací balík má kombinovať početnú koncentráciu UFP, veľkostné rozdelenie, PM2,5, black carbon, NO2, O3, meteorológiu a dopravné údaje. Pri nevýfukových emisiách treba pridať chemické a morfologické markery pneumatík, brzd a vozovky. Merania pri ceste majú byť doplnené pozaďovou stanicou a opakované v rôznych ročných obdobiach. Samotné priemery nestačia: dôležité sú špičky pri akcelerácii, brzdení, zápchach a resuspenzii.

Pre vodné a pôdne prostredie treba sledovať dažďový odtok, retenčné systémy, sedimenty a kal. To zabraňuje tomu, aby sa úspech v ovzduší dosiahol iba presunom kontaminácie do iného média. Biologické ukazovatele majú pokrývať viac taxonomických a funkčných skupín.

3.2 Regulačné dôsledky

Normy založené výlučne na hmotnosti PM nezohľadňujú početnú koncentráciu UFP. Mestá preto môžu dopĺňať zákonné ukazovatele lokálnymi cieľmi pre počet častíc a expozíciu na miestach, kde sa pohybujú deti, chodci a cyklisti. Výrobkové pravidlá majú zahŕňať oder pneumatík a životnosť, nie iba energetickú účinnosť. Pri verejnom obstarávaní vozidiel možno zvýhodniť nižšiu hmotnosť, primerané rozmery pneumatík a transparentné výsledky emisných skúšok.

3.3 Diskusia

Dostupné podklady ukazujú, že udržateľnosť mobility treba hodnotiť systémovo. Wilkinson et al. preukázali veľké rozdiely medzi pneumatikami a vozovkami, ale ich hrubá frakcia neposkytuje kvantitatívny odhad UFP. Správa EIT Urban Mobility dopĺňa bilanciu brzd, pneumatík, vozovky a resuspenzie a upozorňuje na rozdiel medzi vzdušným podielom a celkovým materiálovým tokom. Chen et al. ukázali, ako meteorológia mení interpretáciu trendov $PM_{2,5}$, SO_2, NO_2 a O_3, nie však priamo počet UFP. Zdravotná literatúra podporuje obozretnosť, no kauzálnu silu jednotlivých účinkov obmedzuje rozdielna definícia expozície a zloženie aerosólu. Syntéza je preto rámcom pre výskum a riadenie, nie metaanalýzou účinkov UFP.

Najväčšou medzerou je chýbajúce simultánne meranie veľkostného spektra od nanometrov po mikrometre spolu s chemickou identifikáciou a údajmi o vozidle. Budúce štúdie by mali porovnávať spaľovacie, hybridné a elektrické vozidlá pri rovnakej hmotnosti, pneumatike, rýchlosti a povrchu. Potrebné sú aj reálne jazdné cykly, starnutie častíc, toxikologické testy realistických aerosólov a sledovanie odtoku do vody. Bez tejto kontroly nemožno oddeliť účinok pohonu od hmotnosti a štýlu jazdy.

Koncept UFP zároveň koriguje predstavu, že elektrifikácia sama osebe zabezpečí čistú a udržateľnú mobilitu. Elektrické vozidlá sú dôležitou súčasťou dekarbonizácie, najmä pri nízkouhlíkovej elektrine, ale najrobustnejšiu redukciu častíc prináša kombinácia menšieho dopravného výkonu, modálneho presunu, ľahších vozidiel a čistejších komponentov. Takéto poradie zároveň znižuje hluk, spotrebu energie, dopravné nehody a záber verejného priestoru.

Záver

Ultrajemné častice rozširujú hodnotenie udržateľnej mobility za hranice CO_2 a hmotnostných koncentrácií $PM_{2,5}$. Ich počet, veľkosť, povrch a chemické zloženie vyžadujú osobitné meranie. Pôvodné štúdie ukazujú, že zdrojové materiály a povrch vozovky menia charakter oderu, brzdový a pneumatický oder majú rozdielny vzdušný podiel a meteorológia môže skresliť trend. Z týchto poznatkov vyplýva integrovaná stratégia: predchádzať zbytočným jazdám, presúvať dopravu k aktívnym a verejným módom, elektrifikovať a odľahčovať zvyšné vozidlá, znižovať oder a monitorovať celé veľkostné spektrum aj presun častíc medzi médiami. Udržateľná mobilita nie je iba mobilita bez výfuku, ale mobilita s minimálnou celkovou expozíciou a materiálovou stopou.

Poďakovanie

Táto práca bola podporená grantovým projektom KEGA č. 032TUKE-4/2025: Implementácia výsledkov vedecko-výskumnej činnosti do spracovania modernej vysokoškolskej učebnice “Pevné aerosóly – jemné a ultrajemné častice v prostredí” s podporou projektu „Riadenie POPs rizík v kontexte prechodu na udržateľnú bioekonomiku“ (akronym: POP_RISKMAN base), č. I09I04-03-V02-00050, financovaného z Plánu obnovy a odolnosti SR, komponent 9 – Efektívnejšie riadenie a podpora financovania, vývoja a inovácií.

Použitá literatúra:

[1] OEDC: Non- exhausted Particulate Emissions from Road Transport. An Ignored Environmental policy challenge. 2020, Pp. 1- 149,

[2] Study on Non-Exhaust Emissions in Road Transport, May 2025, pp 1-100,

[3] Jagoda, W. et al: Pollution from Transport: Detection of Tyre Particles in Environmental Samples, Energies 2022, 15, 2816

[4] Fussell, J. C. et al: A Review of Road Traffic-Derived Non-Exhaust Particles: Emissions, Physicochemical Characteristics, Health Risks, and Mitigation Measures, Environ. Sci. Technol. 2022, 56, 6813−6835

[5] Giechaskiel,B., Grigoratos,T., Mathissen, M. et al: Contribution of Road Vehicle Tyre Wear to Microplastics and Ambient Air Pollution, Sustainability, 2024, 16, pp. 522.

[6] Starzomska,A.; Strużewska,J.: A six-year measurement-based analysis of traffic-related particulate matter pollution in urban areas: the case of Warsaw, Poland (2016-2021), Archives of Environmental Protection, Vol. 50 no. 2 pp. 75–84, PL ISSN 2083-4772, doi.10.24425/aep.2024.150554

[7] Fussell,J.C.; Franklin,M. ; Green,D.C. ; Gustafsson,M. et al: A Review of Road Traffic-Derived Non-Exhaust Particles: Emissions, Physicochemical Characteristics, Health Risks, and Mitigation Measures, Environ. Sci. Technol. 2022, 56, 6813−6835

[8] Su Song: Transport Emissions & Social Cost Assessment: Methodology Guide, WRI.org.,China, p. 110, ISBN 978-1-56973-908-2 ,www.wri.org.cn

[9] Jan Kole, P.; Löhr, A.J.; van Belleghem, F.G.A.J.; Ragas, A.M.J.Wear and Tear of Tyres: A Stealthy Source of Microplastics in the Environment. Int. J. Environ. Res. Public Health 2017, 14, 1265.

[10] Grigoratos, T.; Martini, G. Brake Wear Particle Emissions: A Review. Environ. Sci. Pollut. Res. 2015, 22, 2491–2504.

[11] Eriksson, M.; Bergman, F.; Jacobson, S. On the Nature of Tribological Contact in Automotive Brakes; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2002; Volume 252.

[12] Methner M. et al., 2010, “Nanoparticle Emission Assessment Technique (NEAT) for the Identification and Measurement of Potential Inhalation Exposure to Engineered Nanomaterials — Part A,” Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 7: 127-132.

[13] Methner M. et al., 2010, “Nanoparticle Emission Assessment Technique (NEAT) for the Identification and Measurement of Potential Inhalation Exposure to Engineered Nanomaterials —Part B: Results from 12 Field Studies,” Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 7: 163–176.

[14] White paper on ambient ultrafine particle evidence for policy makers. Queensland University of Technology's International Laboratory for Air Quality and Health (ILAQH), 2019, https://research.qut.edu.au/ilaqh/2019/11/08/white-paper-on-ambient-ultrafine-particle-evidence-for-policy-makers-published-on-the-efca-website/

[15] Mengzhu Zhang a, Hang Yin b,c, Jianwei Tan a, Xin Wang a, Zhengjun Yang d, Lijun Hao a, Tianqiang Du e, Zhihui Niu e, Yunshan Ge.: A comprehensive review of tyre wear particles: Formation, measurements, properties, and influencing factors Atmospheric Environment 297 (2023)

[16] Wilkinson, T. et al. (2023). Shades of grey—tire characteristics and road surface influence tire and road wear particle (TRWP) abundance and physicochemical properties. Frontiers in Environmental Science, 11, 1258922. https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1258922

[17] Park, I., Lee, J., & Lee, S. (2017). Laboratory study of the generation of nanoparticles from tire tread. Aerosol Science and Technology, 51(2), 188–197. https://doi.org/10.1080/02786826.2016.1248757

[18] Apicella, B., Catapano, F., Di Iorio, S., Magno, A., & Russo, C. (2026). Non-exhaust emissions: Physical and chemical characterization of brake wear particles. Atmospheric Research, 336, 108909. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2026.108909

[19] EIT Urban Mobility (2025). Study on Non-Exhaust Emissions in Road Transport. https://www.eiturbanmobility.eu/wp-content/uploads/2025/05/41-EIT-Emissions-Report-5a-Digital-1.pdf

[20] Ohlwein, S. et al. (2019). Health effects of ultrafine particles: a systematic literature review update of epidemiological evidence. International Journal of Public Health, 64, 547–559. https://doi.org/10.1007/s00038-019-01202-7

[21] Petit, J.-E. et al. (2021). Simultaneous roadside and urban background measurements of submicron aerosol number concentration and size distribution (20–800 nm), along with chemical composition in Strasbourg, France. Atmosphere, 12, 71. https://doi.org/10.3390/atmos12010071

[22] Wu, K. et al. (2020). Taxonomic dependency of beta diversity components in benthic communities of bacteria, diatoms and chironomids along a water-depth gradient. Science of the Total Environment, 741, 140462. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140462

[23] Chen, L. et al. (2018). Assessing air-quality in Beijing-Tianjin-Hebei region: The method and mixed tales of PM2.5 and O3. Atmospheric Environment, 193, 290–301. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.03.049

[24] Nováková, A. et al.(2021):Meranie kvality ovzdušia monitorovacím vozidlom znečistenia ovzdušia a klímy / 2021. In: Manažérstvo životného prostredia = Management of Environment : Recenzovaný zborník z XXI. medzinárodnej vedeckej konferencie, 15.06.2021, Bratislava. - Bratislava (Slovensko) : Slovak Society of Environment s. 24-34 . - ISBN 978-80-973844-1-8

[25] Lýdia Sobotová, Badidová, M., Badida, M.: (2024)Diagnostika ultrajemných častíc generovaných z dopravy / 2024. In: Spravodaj ATD SR. - Košice (Slovensko) : Technická univerzita v Košiciach Roč. 21, č. 2 (2024), s. 33-38 [print]. - ISSN 1337-8252

[26] Sobotová, L., Badidová, M.: (2025)Vplyv nevýfukových aerosólov na prostredie v okolí cestných komunikácií / - 2025. In: Aktuálne otázky bezpečnosti práce a prevencia závažných havárií : zborník príspevkov : 38. medzinárodná konferencia. - Košice (Slovensko) : Technická univerzita v Košiciach s. 32-35 . - ISBN 978-80-553-2482-1

[27] Sobotová, L., Badidová, M.: Detekovanie jemných a ultrajemných častíc v cestnej doprave / - 2024. In: Fyzikálne faktory prostredia = FFP : časopis o problematike fyzikálnych faktorov prostredia. - Košice (Slovensko) : IbSolve Roč. 14, č. 2 (2024), s. 86-89 [print]. - ISSN 1338-3922

Autor(i):

doc. Ing. Lýdia Sobotová, PhD.
doccentka
Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, Katedra kvality, bezpečnosti a environmentu
Letná 9, 042 00 Košice
Tel: +421 55 602 2793 E-mail: lydia.sobotova@tuke.sk

Ing. Anna Badidová, PhD.
výskumný pracovník
Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, Katedra kvality, bezpečnosti a environmentu
Letná 9, 042 00 Košice
Tel: +421 55 602 2721 E-mail: anna.badidova@tuke.sk

Dr. h.c. mult. Prof. Ing. Miroslava Badida, PhD.
profesor
Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, Katedra kvality, bezpečnosti a environmentu
Letná 9, 042 00 Košice
Tel: +421 55 602 2716 E-mail: miroslav.badida@tuke.sk

SLEDOVANIE PARAMETROV DEGRADÁCIE HYDRAULICKÉHO OLEJA

Hydraulic oil´s degradation parameters monitoring

Daniel Skladaný[1], Milan Rášo[2], Radoslav Majdan[1], Tomáš Danek[2]

Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre[1], Slovnaft a.s.[2]

Anotácia

Hydraulický olej MOL Biohyd 46 bol podrobený životonosnému testu na Paralelnom testovacom zariadení SPU. Test z predošlej publikácie, ktorý odhalil, že biologicky odbúrateľný olej plnil svoju funkciu 162,5 hodín bol opätovne analyzovaný z hľadiska dvoch najdôležitejších parametrov posudzovania životnosti, celkového čísla kyslosti TAN a viskozity. Tieto parametre boli pozorované pri zmenách teplotných intervalov v čase. Podarilo sa odhaliť, že v čase prekročenia limitnej hodnoty celkového čísla kyslosti strmosť vývoja degradácie prestala rapídne narastať a zvýšenie teploty na 95°C neprinieslo rovnaký skokový efekt ako zo 65°C na 80°C. Tento jav bol pripísaný zmene degradačného procesu z oxidácie na tvorbu polymérov, čo potvrdil aj vývoj viskozity v čase.

Kľúčové slová: Celkové číslo kyslosti, kinematická viskozita, degradácia hydraulického oleja

Abstract

Hydraulic oil MOL Biohyd 46 underwent lifespan test on Parallel Testing Device of Slovak University of Agriculture. Test from previous publication, which revealed that biologically acceptable oil performed it´s task for 162,5 hours was analysed again, following two of the most important parameters considered when assessing lifespan: total acid number TAN and viscosity. These parameters were observed during changes in temperature intervals in time. Test revealed that in time of reaching limit value of total acid number, slope of the degradation evolution discontinued rapid growth and following increase in temperature to 95°C did not caused the same excessive effect as from 65°C to 80°C. This phenomenon was contributed to change in degradation process from oxidation to creation of polymers, what was proven by evolution of viscosity in time.

Keywords: *Total acid number, kinematic viscosity, hydraulic oil degradation*

Úvod

Nároky na ochranu životného prostredia sa neustále zvyšujú a tento trend nemíňa ani technické odvetvia. Náš Ústav poľnohospodárskej techniky, dopravy a bioenergetiky v spolupráci so spoločnosťou Slovnaft a.s. prispieva v tejto oblasti testovaním nových ekologických hydraulických kvapalín a mazív. Tieto produkty mali v minulosti kontroverznú povesť, keďže panoval predpoklad, že rýchlo degradujú a v konečnom dôsledku môžu poškodiť drahé hydraulické zariadenia. Technika však napreduje a dnes máme k dispozícii ekologické alternatívy, ktoré vo viacerých parametroch dokážu poraziť konvenčné minerálne oleje. Medzi nich určite patria oleje typu HEES – vyrobené zo syntetických esterov, ktorých vysoký viskozitný index a teda citlivosť zmeny viskozity s teplotou v súčinnosti s biologickou odbúrateľnosťou sú veľkými výhodami. Zaujímavou skupinou sú aj oleje typu HETG, zložené

z triglyceridov, ktoré sú dobre rozložiteľné, disponujú vysokým viskozitným indexom a rovnako, ako minerálne oleje sa skladajú zo základového oleja a balíčka aditív. Tak je možné namiešať olej pre potreby zákazníka. Výroba alternatív je náročnejšia a cenovo vo vyššej hladine, no prevencia ekologických havárií musí byť v dnešnej dobe na prvom mieste. Rovnako tak je dôležité, aby hydraulický olej vydržal čo najviac hodín plniť svoju úlohu. Nebolo by vhodné, aby sa hoc aj dobre rozložiteľný olej musel meniť v krátkych intervaloch, čo by viedlo k nadmernej výrobe zanechávajúcej uhlíkovú stopu a tiež k odporu voči týmto alternatívam. Z toho dôvodu testujeme životnosť olejov a posudzujeme relevanciu pre poľnohospodársku aplikáciu.

1. Súčasný stav riešenej problematiky

Hydraulické oleje je veľmi náročné otestovať v prevádzke, pretože sa tým vystavuje riziku poškodenia poľnohospodárska technika a zároveň nie je možné zaručiť dokonalú opakovateľnosť experimentu. Preto sú pre vedecké účely vhodné testy v laboratórnom simulačnom zariadení.

Zatiaľ, čo laboratórne testy chemických vlastností poskytujú prvotné informácie o stabilite kvapalín, oveľa spoľahlivejšie sú údaje získané počas aktuálnych alebo simulovaných pracovných podmienok pomocou tzv. hydraulických skúšobných zariadení [1].

V predchádzajúcej publikácii [2] sme predstavili test končiaci zlyhaním hydrogenerátora, respektíve poklesom jeho prietokovej účinnosti. Je však dôležité si uvedomiť, že hydraulický olej nemusí mať iba fatálne zlyhanie, ale môže najskôr degradovať, čím urýchli koróziu a iné chemické namáhanie celého systému.

Podľa Wu et al. (2013) [3] a Jain et al. (2005) [4] oxidácia hydrokarbónových mazív prebieha v dvoch krokoch, najskôr vzniknú organické radikály, ktoré reagujú s kyslíkom za vzniku nových radikálov, ako peroxy radikály a peroxidy. V druhom kroku sa formujú oligoméry, ktoré tvoria kal a depozit v oleji.

Wu et al. b) (2013) [5] pripomína, že peroxidy spôsobujú nárast TAN. A práve celkové číslo kyslosti TAN je považované za základný parameter monitorujúci starnutie oleja. Norma ISO 15380:2002 [6] uvádza, že TAN nesmie narásť o viac, ako 2 mgKOH·g-1. (V našej publikácii bude prísnejší limit stanovený výrobcom a testovacím laboratóriom)

Nárast v TAN spôsobený hydrolýzou rastlinných olejov a aditív je považovaný za príčinu nadmernej korózie a zlyhania materiálu [7, 8]. Antioxidanty sú vhodnou ochranou proti vzniku zlúčenín, ktoré môžu za zvýšenie celkového čísla kyslosti [9].

Murru et al. (2021) [10] uvádza, že produkty termálnej degradácie môžu za vznik polymérov v hydraulickom oleji, čo sa prejaví vznikom usadenín a kalu. Tieto látky následne zvyšujú viskozitu hydraulického oleja, čím môžu znížiť mazaciu schopnosť.

Pokiaľ teda antioxidanty a iné aditíva nezabránia vzniku peroxidov, môže dôjsť k polymerizácii a vplyvom nej v zmene viskozity.

Zmeny vo viskozite kvapaliny môžu ovplyvniť výkonové parametre. S poklesom viskozity kvapalina nemusí plniť dostatočne mazaciu úlohu, navyše zaostáva za rotujúcimi elementmi čerpadla, no zároveň môže ľahšie tiecť v potrubí vplyvom zníženého odporu. Naopak s nárastom môže byť vyššia tesnosť zvodových odporov, no prietok v potrubí bude brzdený jej vyšším odporom proti tečeniu. Viskozita bežne v prevádzke mení svoju hodnotu a aj táto zmena je prejavom určitej formy degradácie oleja.

Viskozita je parameter monitorovaný hornou aj dolnou hranicou, pričom rozhodujúca je tá, ktorá je počas prevádzky prekročená [1].

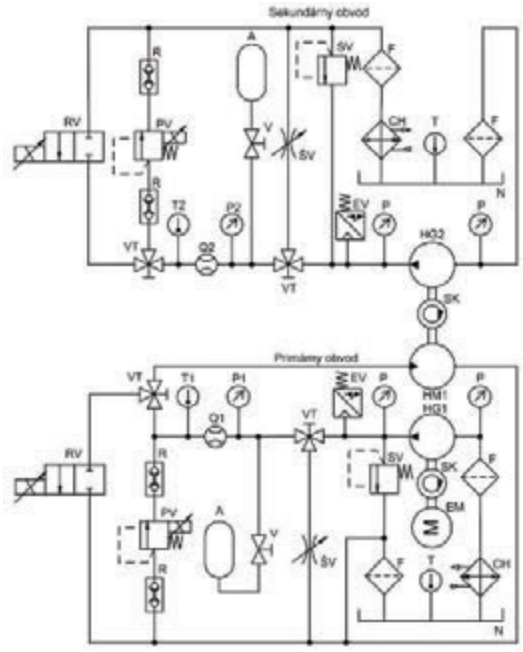
Norma ISO 15380:2011 [11] uvádza ku triglyceridovým kvapalinám maximálnu zmenu viskozity na úrovni ±10% oproti pôvodnej hodnote.
(V našej publikácii budú použité prísnejšie limitné hodnoty od akreditovaného laboratória.)

2. Materiál a metodika

2.1. Testovacie zariadenie

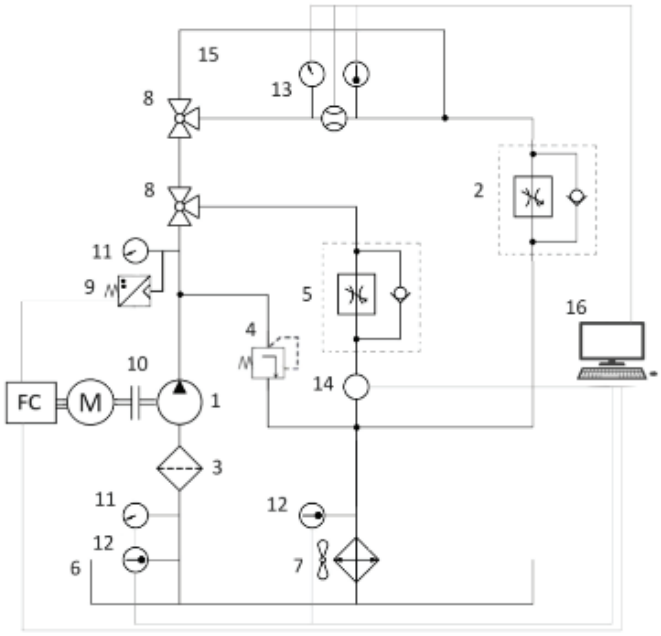
Pri testoch bolo ako aj v minulých experimentoch [2] využité *Zariadenie na výskum vlastností nových typov hydraulických kvapalín*, umiestnené na Slovenskej poľnohospodárskej univerzite v Nitre. Toto zariadenie pozostáva z dvoch hydraulických okruhov vzájomne prepojených mechanickým prenosom energie (Obr. 1). Každý z okruhov má svoju nádrž, chladič, hydrogenerátor a pomocné, meracie a ovládacie prvky, pričom primárny okruh disponuje aj hydromotorom, ktorý poháňa cez mechanickú spojku hydrogenerátor druhého okruhu. Sekundárny okruh disponuje navyše elektrohydraulickým proporcionálnym tlakovým ventilom, ktorým je možné cez počítač zvyšovať tlak v hydraulických obvodoch. Vďaka tejto koncepcii je možné paralelne testovať dva typy hydraulických kvapalín. Bližšie bolo toto zariadenie popísané v článku [12].

Pre účely nášho experimentu bolo zariadenie zapojené v zjednodušenej konfigurácii, keďže bolo cieľom testovať iba jeden typ hydraulickej kvapaliny (Obr. 2). V obvode boli prepojené iba základné prvky – hydrogenerátor QHD 17 R s geometrickým objemom 17 cm^3, škrtiaci ventil určený na zaťažovanie, poistný tlakový ventil nastavený na 21 MPa, meracie zariadenia HYDAC, trojcestné ventily pre riadenie prietoku, filter s 10µm vložkou a vzduchový plno prietokový chladič.



Obr. 1 Schéma zariadenia na výskum vlastností nových typov hydraulických kvapalín kde: A – hydraulický akumulátor, EM – elektromotor, EV – poistný elektrický tlakový vypínač, F – filter, HG 1

hydrogenerátor primárneho obvodu, HG2 – hydrogenerátor sekundárneho obvodu, HM1 – hydromotor primárneho obvodu, CH – chladič, N – nádrž, P1, T1, Q1 – snímač tlaku, teploty a prietoku primárneho obvodu, P2, T2, Q2 – snímač tlaku, teploty a prietoku sekundárneho obvodu, P – tlakomer, PV – proporcionálny tlakový ventil, R – rýchlospojka, RV – hydraulický rozvádzač, SK – snímač krútiaceho momentu, SV – poistný tlakový ventil, ŠV – škrtiaci ventil, T – teplomer, V – uzatvárací ventil, VT – trojcestný ventil.



Obr. 2 Schéma zjednodušeného zapojenia zariadenia využitého pti experimente, kde: 1. Zubový hydrogenerátor, 2. Škrtiaci ventil pre zaťažovanie, 3. 10µm filter, 4. Mechanický tlakový poistný ventil, 5. Škrtiaci ventil pre zahrievanie obvodu, 6. Nádrž, 7. Chladič, 8. Trojcestný ventil, 9. Electronický poistný ventil, 10. Spojka, 11. Tlakomer, 12. Teplometer, 13. HYDAC meracie zariadenie, 14. HLB senzor, 15. Bajpas pre ochranu senzorov počas zaťažovania, 16. Počítač, M – elektromotor, FC – Frekvenčný menič.

2.2. Meracie zariadenia

Pre zaistenie dostatočnej presnosti meraní budú analógové meracie zariadenia použité iba pre kontrolu a zjednodušenie nastavenia požadovaných veličín, záznam bude vyhotovovaný z elektronických meracích zariadení od spoločnosti HYDAC.

Pri experimente budú využité nasledovné snímače podľa nasledujúcej tabuľky.

Tab. 1 Tabuľka snímačov HYDAC a ich použitie [13]

Snímač	Veličina	Rozsah	Presnosť
HDA 4748-H	Tlak	-0,1 – 40 MPa	± 0,25% rozsahu
EVS 3108-H	Prietok	6 – 60 $dm^3 \cdot min^{-1}$	± 2% reálnej hodnoty
ETS 4148-H	Teplota	-25 – 100 °C	± 0,4% rozsahu

2.3. Testovaný hydraulický olej

Testovaný hydraulický olej má označenie MOL Biohyd 46 a jedná sa o biologicky odbúrateľný hydraulický olej na rastlinnej báze, z prirodzených triglyceridov, HETG. Pozn. autora, nejedná sa o syntetickú verziu MOL Biohyd 46S. Jeho parametre sú uvedené v Tab. 2.

Tab. 2 Tabuľka vlastností hydraulického oleja Mol Biohyd 46 [14]

Merná hmotnosť pri 15°C [g·cm^3]	0,920
Kinematická viskozita pri 40°C [mm^2·s^{-1}]	45,1
Kinematická viskozita pri 100°C [mm^2·s^{-1}]	9,7
Viskozitný index	208
Bod tuhnutia [°C]	-27
Bod vzplanutia v otvorenom tégliku [°C]	290

2.4. Metodika experimentu

Test prebiehal v trvaní 200 hodín, pričom z oleja bola vždy po 12,5 hodiny odobratá vzorka. Vzorka bola odoberaná z odberného miesta v hydraulickom obvode pomocou odberovej hadičky a čistej nádobky. Vzorka bola odoberaná pri pracovnej teplote, ale pri obvode pracujúcom bez tlaku kvôli bezpečnosti pracovníka.

Následne boli vzorky odoslané do akreditovaného laboratória Wear Check na detailnú laboratórnu analýzu a posúdenie, či je olej stále schopný pracovať v hydraulickom zariadení. Po posúdení pracovník laboratória Wear Check povolil ďalší interval v prípade, že bol olej ešte schopný prevádzky.

Zaťažovanie hydraulického oleja prebiehalo podľa modifikovanej normy ASTM D 2882 [15], pri tlaku 20 MPa a otáčkach 1800min^{-1}. Podľa výrobcu je odporúčaná teplota pre používanie hydraulického oleja MOL Biohyd 46 na úrovni 45°C, no keďže prevádzka v traktoroch neumožňuje takto nízku teplotu pracovnej kvapaliny, výrobca povolil, aby bol olej testovaný pri vysokých teplotách. Harmonogram sme rozdelili na tri fázy, 65°C, 80°C a 95°C, podľa Tab. 3.

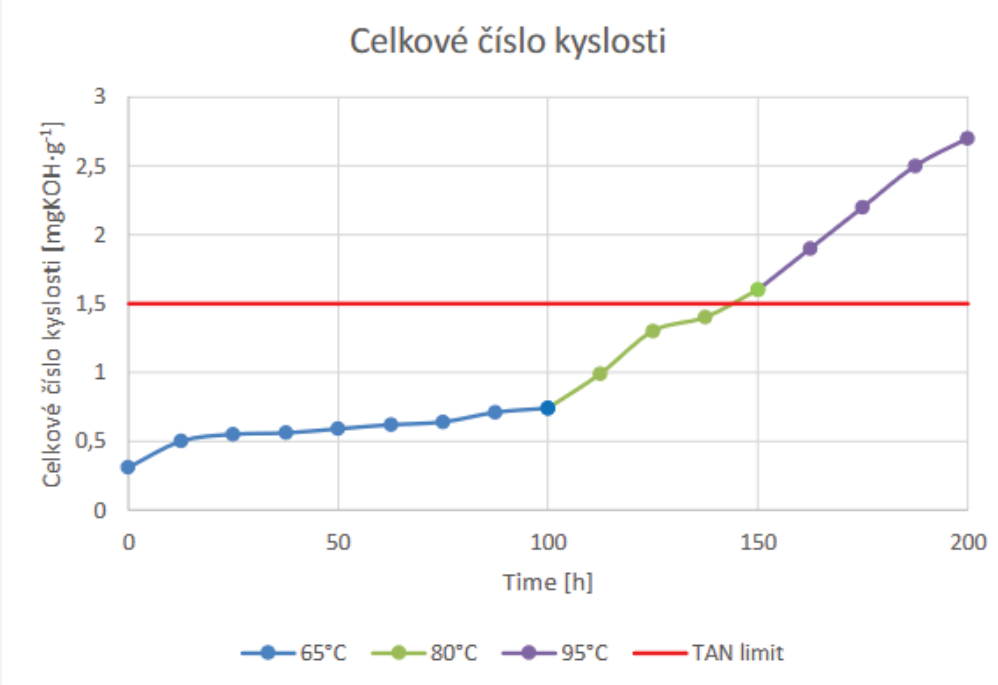
Tab. 3 Časový a teplotný harmonogram skúšky ekologického hydraulického oleja

Interval	0 – 100h	100 – 150h	150 – 200h
Teplota	65°C	80°C	95°C

3. Výsledky a diskusia

Hydraulický olej MOL Biohyd 46 bol podrobený 200 hodinovej skúške. Celkové číslo kyslosti, ako základný parameter oxidácie prekonal laboratóriom určenú limitnú hodnotu 1,5 mgKOH·g^{-1} v čase 150h, teda na konci intervalu s 80°C. Toto je možné vidieť na *obrázku 3*. Degradácia následne pokračovala, no strmosť posledného intervalu bola napriek očakávaniu po prvotnom skoku medzi teplotnými režimami iba 1,4x vyššia ako pri 80°C, zjavné aj z Tab.

4. Ako možné vysvetlenie prichádza do úvahy, že oxidačná fáza sa zmenila na polymerizačnú fázu [3, 4]. Hydraulický olej minul antioxidačné prísady a ďalšia degradácia sa prejaví zmenou jeho fyzikálnych vlastností. Toto tvrdenie sa dá podložiť výsledkami vývoja viskozity, ktorá v danom okamihu začína prudko akcelerovať, Obr. 3.

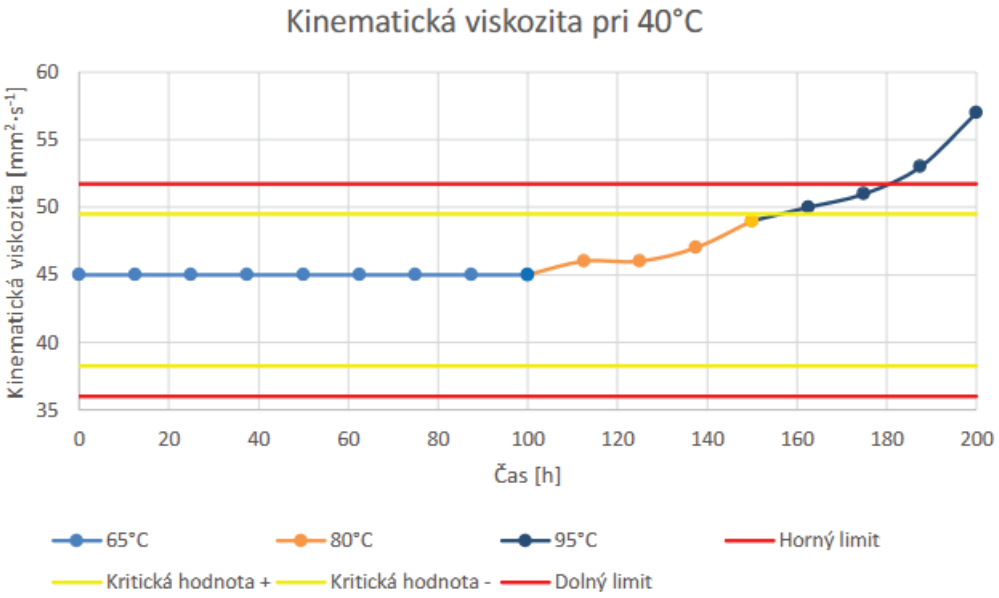


Obr. 3 Graf závislosti TAN v čase

Tab. 4 Strmosti priebehov TAN jednotlivých teplotných intervalov

Interval	Smernica k (strmosť)	Nárast strmosti oproti predošlému intervalu
65°C	0,0035	-
80°C	0,0154	4,4
95°C	0,0216	1,4

Vývoj viskozity na Obr. 4 potvrdzuje predchádzajúce tvrdenia, v prvej fáze, kým nebolo teplotné zaťaženie vysoké sa viskozita nemenila, akákoľvek degradácia sa prejavila chemickou zmenou na úrovni aditív. Vo vysokoteplotných intervaloch došlo k zmenám rýchlostí degradácie, zjavné z Tab. 5, a v 95°C intervale už dochádzalo k dominantným zmenám na úrovni fyzikálnych vlastností spôsobených napríklad polymerizáciou. Murru et al. (2021) [10] potvrdzuje, že väčšina testov odhaľuje nárast viskozity počas auto-oxidácie a tepelno-oxidačných procesov, na základe zvýšenia karboxylových kyselín, ktoré fungujú ako katalyzátory pre aldehydy a ketóny a pretvárajú karbonylové častice na oligoméry a polyméry. Polyméry môžu za vyššiu viskozitu.



Obr. 4. Graf závislosti viskozity v čase

Tab. 5 Zmeny rýchlostí degradácie

Interval	Smernica *k* (strmosť)	Nárast strmosti oproti predošlému intervalu
65°C	0,000	-
80°C	0,080	∞
95°C	0,184	2,3

Teleașă et al. (2025) [16] učinili podobný experiment využívajúci FTIR spektroskopiu a v ich podmienkach teplotnej záťaže do 220°C počas 15 minút a 8 opakovaní uvádzajú, že nepozorujú takmer žiadne zmeny oproti novému HETG oleju (s výnimkou mierneho nárastu viskozity formáciou zlúčenín). Naše výsledky sú teda zaiste spôsobné kombináciou viacerých faktorov a nie iba teplota, ale aj prevádzka pod tlakom v hydraulickom zariadení, a obzvlášť dlhý čas záťaže sa podieľajú na zmenách v oleji.

Záver

Experiment odhalil, že po 150 hodinách a zvýšení teploty na 95°C sa zmenila charakteristika degradácie. Hydraulický olej ďalej degradoval z hľadiska fyzikálnych parametrov a prekročil kritickú hodnotu viskozity stanovenú výrobcom. Bod kedy začala táto degradácia bol zároveň aj bodom, kedy olej prekročil limitnú hodnotu pre celkové číslo kyslosti, teda vyčerpal svoju schopnosť neutralizovať kyseliny pomocou aditív. Domnievame sa, že táto zmena charakteru degradácie sa dá vysvetliť postupným minutím aditív, tvorbou peroxidov a peroxy radikálov, ktoré v neskoršej fáze prispievajú k tvorbe polymérov a oligomérov, zvyšujúcich viskozitu.

Rezervy súčasného experimentálneho modelu sú v akumulačnom zaťažení teplotami, v budúcnosti bude vhodné zaťažovať tri vzorky oleja pri konkrétnej teplote od začiatku experimentu, aby nedochádzalo k posúvaniu začiatočného stavu nasledovného intervalu predchádzajúcou degradáciou. Tento prístup by umožnil počítať Arrheniovu aktivačnú energiu, ktorú bolo možné v súčasnom nastavení vypočítať len pre konkrétne intervaly a nie celkovo pre hydraulický olej.

Použitá literatúra:

[1] TKÁČ Zdenko, et al., Hodnotenie vlastností hydraulických kvapalín na základe skúšok s použitím hydrogenerátora, 2010, ISBN 978-80-552-0338-6

[2] SKLADANÝ, Daniel; RÁŠO, Milan; MAJDAN, Radoslav a DANEK, Tomáš. Životonosná skúška ekologickej hydraulickej kvapaliny. In: *Zborník anotácií XXVIII. ročníka medzinárodnej vedeckej konferencie DIS 2025: Teória a aplikácia metód technickej diagnostiky 2025*. Prešov: Technická univerzita v Košiciach, 2025, s. 27. ISBN 978-80-553-4892-6.

[3] WU, Yanxia, et al. Oxidative degradation of synthetic ester and its influence on tribological behavior. *Tribology International*, 2013, 64: 16-23.

[4] JAIN, Mukul R., et al. Evaluation of thermo-oxidative characteristics of gear oils by different techniques: Effect of antioxidant chemistry. *Thermochimica acta*, 2005, 435.2: 172-175.

[5] WU, Yanxia, et al. Improvement of oxidative stability of trimethylolpropane trioleate lubricant. *Thermochimica acta*, 2013, 569: 112-118.

[6] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 15380:2002, Lubricants, industrial oils and related products (class L) — Family H (hydraulic systems) — Specifications for categories HETG, HEPG, HEES and HEPR.* Geneva: ISO, 2002.

[7] LIU, Xinyu, et al. Development history, current situation and prospect of international vegetable oil-based hydraulic oil. In: *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences, 2023. p. 04019. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338504019

[8] GLANCEY, James L.; KNOWLTON, Susan; BENSON, E. R. Development of a high oleic soybean oil-based hydraulic fluid. *SAE transactions*, 1998, 266-269.

[9] SOLEIMANI, Majid, et al. Antioxidants classification and applications in lubricants. In: *Lubrication-tribology, lubricants and additives*. IntechOpen, 2018.

[10] MURRU, Clarissa; BADÍA-LAÍÑO, Rosana; DÍAZ-GARCÍA, Marta E. Oxidative stability of vegetal oil-based lubricants. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021, 9.4: 1459.

[11] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 15380:2011, Lubricants, industrial oils and related products (class L) — Family H (hydraulic systems) — Specifications for categories HETG, HEPG, HEES and HEPR*. Geneva: ISO, 2011.

[12] MAJDAN Radoslav, et al, Zariadenie na výskum vlastností nových typov hydraulických kvapalín. Teória a aplikácia metód technickej diagnostiky. 2024.

[13] HYDAC International, Accessories for measuring instruments, display and service units, Haupstrase 27 D-66128 Saarbr¨ucken, Germany. Dostupné z: https://www.hydac.com/download/accessories-for-measuring-instruments-display-and-service-units-1000451478-en.pdf

[14] SLOVNAFT, a.s. *MOL Biohyd 46: biologicky odbúrateľný hydraulický olej* [online]. Bratislava: SLOVNAFT, a.s., 2025 [cit. 2026-09-16]. Dostupné na: https://slovnaft.sk/images/content/LUB_repo/TDS_MOL%20Biohyd%2046_SK.pdf

[15] ASTM INTERNATIONAL. *ASTM D2882-00, Standard Test Method for Indicating the Wear Characteristics of Petroleum and Non-Petroleum Hydraulic Fluids in Constant Volume Vane Pump.* West Conshohocken (PA): ASTM International, 2000.

[16] TELEAȘĂ, Andreea Mirela, et al. Rheological Study and FTIR Analysis of Thermally Degraded Mineral and Biodegradable Hydraulic Fluids. *Lubricants*, 2025, 13.10: 462.

Autor(i):

Ing. Daniel Skladaný
doktorand
Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre
Nábrežie mládeže 575/4, Chrenová, 949 01 Nitra
Tel.: +421 948 041 352 E-mail: xskladany@uniag.sk

Bc. Milan Rášo
technický poradca
Slovanft a. s.
Vlčie Hrdlo 1, 824 12 Bratislava
Tel.: +421 907 703 373 E-mail: milan.raso@slovnaft.sk

doc. Ing. Radoslav Majdan, PhD.
docent
Slovenská poľnohospodárska univerzita v Nitre
Nábrežie mládeže 575/4, Chrenová, 949 01 Nitra
Tel.: +421 904 198 433 E-mail: radoslav.majdan@uniag.sk

Ing. Tomáš Danek
technický poradca
Slovanft a. s.
Vlčie Hrdlo 1, 824 12 Bratislava
Tel.: +421 908 640 185 E-mail: tomas.danek@slovnaft.sk

MANAŽÉRSKY REPORT PRE SYSTÉM DETEKCIE FEROMAGNETICKÝCH OBJEKTOV NA PÁSOVÝCH DOPRAVNÍKOCH

Management Report for Ferromagnetic Object Detection System of Belt Conveyors

Katarína Draganová[1], Karol Semrád[2], Miroslav Šmelko[3], Martin Fiľko[3]

1 Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta
2 Vysoká škola bezpečnostného manažérstva v Košiciach
3 EDIS, vvd.

Anotácia

Pri súčasnom technologickom pokroku je možné merať a zaznamenávať veľké množstvo údajov v relatívne krátkom čase. Avšak bez vhodných systémov spracovania, vyhodnotenia a prezentácie nameraných údajov môže byť výpovedná hodnota týchto údajov pre konečných užívateľov veľmi nízka. Cieľom tohto príspevku je prezentovať metódy štatistického spracovania a vyhodnotenia údajov zaznamenaných systémami detekcie feromagnetických objektov na pásových dopravníkoch, ktoré sú vyvíjané na Leteckej fakulte Technickej univerzity v Košiciach. Transfer týchto technológií do praxe je zabezpečený v spolupráci s firmou EDIS vvd. Vďaka týmto systémom je možné detegovať nebezpečné feromagnetické predmety nachádzajúce sa v prepravovanom materiáli a predchádzať tak poškodeniu pásu alebo ďalších zariadení, čím sa eliminujú prevádzkové odstávky a značne znižujú náklady na údržbu a opravy.

Kľúčové slová: pásový dopravník, detekčný systém, štatistické spracovanie údajov, Weibullovo rozdelenie

Abstract

With current technological advancements, it is possible to measure and record big data sets in a relatively short time. However, without suitable systems for processing, evaluating, and presenting the measured data, its value to end-users may be very limited. This paper presents methods for the statistical processing and evaluation of data recorded by ferromagnetic object detection systems for belt conveyor belt, which have been developed at the Faculty of Aeronautics of the Technical University of Košice. The practical implementation of these technologies is facilitated through cooperation with the EDIS vvd. Company. These systems enable the detection of hazardous ferromagnetic objects within the transported material, thereby preventing damage to the belt and other devices. This eliminates operational downtimes and significantly reduces maintenance and repair costs.

Keywords: *belt conveyor, detection system, statistical data processing, Weibull distribution*

Úvod

Pásové dopravníky patria medzi najrozšírenejšie zariadenia určené na kontinuálnu prepravu materiálov a produktov v rôznych priemyselných odvetviach. Jedným z najčastejších problémov ovplyvňujúcich spoľahlivosť pásových dopravníkov je postupné opotrebovanie alebo náhle poškodenie dopravníkového pásu. Preto sa dlhodobo venuje značná pozornosť

vývoju monitorovacích a diagnostických systémov zameraných na identifikáciu defektov, trhlín a ďalších porúch pásov [1]. V banských a priemyselných prevádzkach býva významnou príčinou poškodenia pásov výskyt cudzích predmetov v transportovanom materiáli. Na ich detekciu sa v súčasnosti využíva široké spektrum metód založených najmä na optických princípoch [2–5], no v niektorých aplikáciách sa dokonca pri detekcii využívajú aj mobilné robotické platformy [6]. V podmienkach s obmedzeným osvetlením alebo nepriaznivými poveternostnými vplyvmi, ktoré sú typické pre ťažký priemysel, však účinnosť optických metód výrazne klesá [7]. Ďalším obmedzením inteligentných detekčných systémov je množstvo potrebných reprezentatívnych dát potrebných na trénovanie modelov [8].

Z uvedených dôvodov sa do popredia dostávajú aj alternatívne detekčné princípy, medzi ktoré patria aj nami vyvíjané systémy detekcie feromagnetických objektov založené na magnetických snímačoch. Tieto snímače umožňujú spoľahlivú identifikáciu feromagnetických predmetov, ktoré môžu spôsobiť závažné poškodenie dopravníkových pásov alebo nadväzujúcich technologických zariadení [9, 10]. Predložený článok sa zameriava na tvorbu manažérskych reportov ako výstupov prevádzky tohto detekčného systému prostredníctvom analýzy prevádzkových údajov získaných počas jeho činnosti. Získané informácie možno využiť nielen na optimalizáciu nastavení systému a zvýšenie jeho spoľahlivosti, ale aj ako nástroj na manažérske rozhodovania, monitorovanie prevádzky dopravníka, hodnotenie činnosti obsluhy a analýzu kvality prepravovaného materiálu. Významným prínosom je tiež možnosť identifikácie prevádzkových anomálií a potenciálnych porúch technologického procesu.

1. Systém detekcie feromagnetických objektov na pásových dopravníkoch

Hlavným cieľom vyvíjaných detekčných systémov je chrániť pásové dopravníky, následne používané vozidlá na prepravu materiálu, ako aj zariadenia na spracovanie materiálu a technologické systémy pred poškodením spôsobeným kusmi železa alebo inými feromagnetickými predmetmi nachádzajúcimi sa v prepravovanom materiáli. Tento systém bol vyvinutý v spolupráci s partnermi z ťažkého priemyslu, pričom na samotnú detekciu sa využívajú nami vyvíjané magnetometre radu VEMA, ktoré využívajú patentovaný relaxačný princíp.

Detekčné systémy môžu pracovať vo veľmi náročných podmienkach, vrátane nepriaznivých klimatických vplyvov, vibrácií, prašnosti a magnetických polí. Princíp systému spočíva v tom, že feromagnetický predmet výrazne ovplyvňuje rozloženie magnetického poľa vo svojom okolí, a to prostredníctvom vlastného magnetického momentu (spôsobeného remanentným magnetizmom) a tiež zmenou priebehu magnetických siločiar lokálneho magnetického poľa v dôsledku vysokej magnetickej vodivosti. Systém je založený na dvojici rámových snímačov a budičov umiestnených v blízkosti dopravného pásu a zahŕňa priemyselný počítač vybavený príslušným softvérom. Ak systém zaznamená prítomnosť feromagnetického objektu, ktorý vyvolá signál presahujúci nastavenú prahovú hodnotu magnetickej indukcie, aktivuje sa červená LED dióda na ovládacom paneli. Dopravníkový pás a aj samotná detekcia sa automaticky pozastaví, kým obsluha nestlačí tlačidlo odblokovania (či bol predmet nájdený alebo nie). Systém automaticky zaznamenáva údaje o celkovom čase

prevádzky a celkovom počte detegovaných objektov, ako aj o vykonaných úkonoch a nastavených prahových hodnotách. Systém tiež ukladá údaje o prevádzkových režimoch – čase zapnutia, presnom mieste detekcie feromagnetického predmetu, čase reakcie obsluhy a prípadnom čase a mieste výskytu poruchy v systéme. Príklad uložených údajov je znázornený na Obr. 1.

Stop:	Ut 16.06.2026	22:10:52
Prevádzka:	Ut 16.06.2026	20:08:14
Nájdený:	Ut 16.06.2026	20:08:14
Prah:	500 nT	
Veľkosť:	1153 nT	
Objekt:	Ut 16.06.2026	20:04:50
Prevádzka:	Ut 16.06.2026	10:31:44
Nenájdený:	Ut 16.06.2026	10:31:44
Prah:	750 nT	
Veľkosť:	1513 nT	
Objekt:	Ut 16.06.2026	10:28:21
Spustenie:	Ut 16.06.2026	06:15:28
Chyba napájania:	Ut 16.06.2026	06:05:22
Prevádzka:	Po 15.06.2026	23:54:51
Nájdený:	Po 15.06.2026	23:54:51
Prah:	500 nT	
Veľkosť:	1264 nT	
Objekt:	Po 15.06.2026	23:52:15
Prevádzka:	Po 15.06.2026	22:37:04
Nájdený:	Po 15.06.2026	22:37:04
Prah:	500 nT	
Veľkosť:	891 nT	
Objekt:	Po 15.06.2026	22:34:25
Prevádzka:	Ne 14.06.2026	13:18:20
Spustenie:	Ne 14.06.2026	13:17:55

Obr. 1 Príklad záznamu údajov zo systému detekcie feromagnetických objektov

2. Analýza a vyhodnotenie údajov pre manažérske reporty

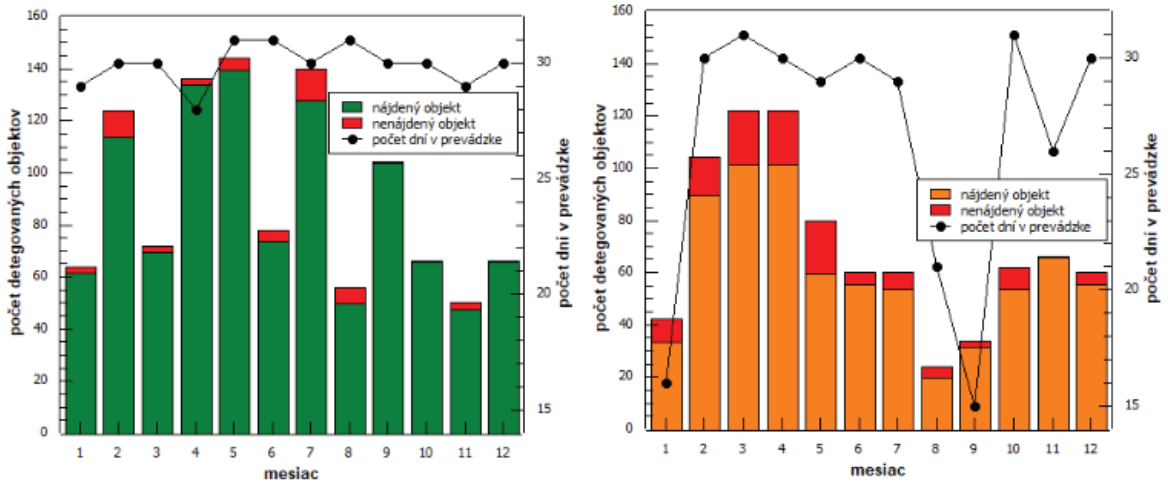
V tejto časti je zhrnutý proces spracovania a vyhodnotenia údajov. Získané údaje boli zaznamenávané počas jedného roka prevádzky dvoch pásových dopravníkov vybavených rovnakou verziou detekčného systému. Hlavný prínos tejto práce však nespočíva len v štatistickom vyhodnotení získaných údajov s použitím Weibullovho rozdelenia ako veľmi výkonného štatistického nástroja, ale aj v prezentácii a vysvetlení získaných údajov pre obslužný a riadiaci personál, keďže v článku sú prezentované rôzne možnosti interpretácie zaznamenaných a vyhodnotených údajov. Keďže pásové dopravníky a ich aplikácie sú veľmi odlišné, štatistické údaje je možné prispôsobiť podľa požiadaviek a potrieb zákazníka. Štatistické údaje sú vo všeobecnosti k dispozícii vo forme tabuliek alebo rôznych typov grafov.

Počet detegovaných objektov predstavuje počet detegovaných objektov za zvolený časový interval. Celkový počet detegovaných objektov je súčtom nájdených a nenájdených objektov, ako je vidieť na Obr. 2. V tomto prípade je možné vidieť štatistiky za jeden rok s vyhodnotením za jednotlivé mesiace, pričom do grafov boli zahrnuté aj informácie o počte dní, počas ktorých bol pásový dopravník v prevádzke. Tieto informácie môžu byť použité na monitorovanie využitia a efektívne plánovanie vyťaženia pásových dopravníkov.

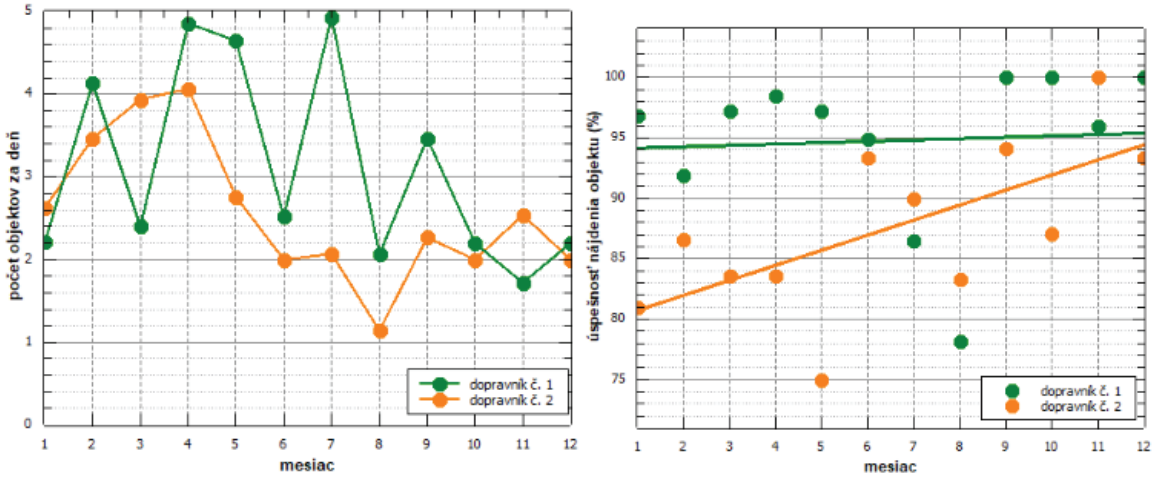
Dlhodobé štatistiky môžu sumarizovať tiež priemerný počet detegovaných objektov za jeden deň prevádzky vypočítaný ako súčet detegovaných objektov za jeden mesiac vztiahnutých k prevádzkovému času dopravníka. Ako je vidieť na Obr. 3 vľavo, toto štatistické

znázornenie umožňuje aj porovnanie viacerých pásových dopravníkov. Štatistiky je možné vizualizovať samostatne sumárne pre detegované objekty alebo separátne pre nájdené alebo nenájdené objekty.

Zaujímavý môže byť aj ukazovateľ miery úspešnosti nájdenia objektu vypočítaný ako percento detegovaných feromagnetických objektov, ktoré boli potvrdené ako nájdené. Ako je vidieť na Obr. 3 vpravo, aj toto štatistické znázornenie umožňuje porovnanie viacerých pásových dopravníkov v rámci jedného grafu. Okrem toho bola do grafu pridaná trendová čiara vo forme lineárnej aproximácie, ktorá znázorňuje trend miery úspešnosti.



Obr. 2 Počet detegovaných objektov: dopravník č. 1 (vľavo) a dopravník č. 2 (vpravo)

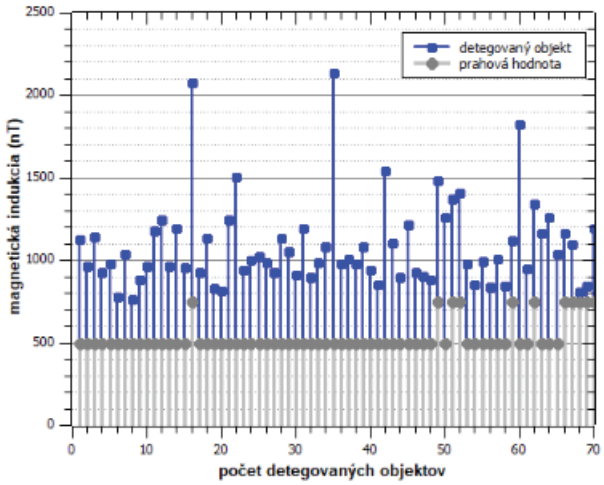


Obr. 3 Počet detegovaných objektov za deň (vľavo) a úspešnosť nájdenia objektu (vpravo)

Jednou z krátkodobejších štatistík môže byť napríklad počet objektov detegovaných počas jedného mesiaca prevádzky pásového dopravníka. Na Obr. 4 je možné vidieť štatistiky získané z jedného mesiaca prevádzky. Z takejto štatistiky je možné vidieť nielen hodnotu magnetickej indukcie detegovaného objektu, ale aj nastavenú prahovú hodnotu detekcie. Nastavenie prahovej hodnoty je obzvlášť dôležité vo fáze počiatočného uvádzania detekčného systému do prevádzky. Ak je totiž táto hodnota príliš vysoká, existuje riziko, že nebezpečné

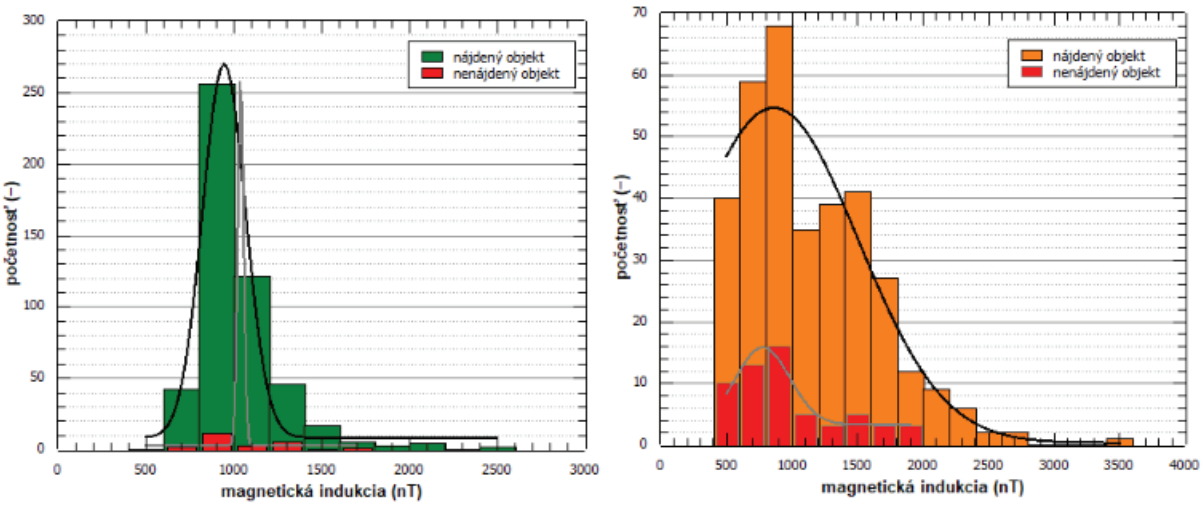
predmety, ktoré by mohli spôsobiť poškodenie dopravníkového pásu, nebudú detegované. Naopak, príliš nízka prahová hodnota môže viesť k častým detekciám, pretože aj menšie predmety, ktoré nepredstavujú pre dopravníkový pás riziko, budú signalizované ako detegované objekty.

Aj v tomto prípade je možné vizualizovať podobné štatistiky samostatne pre nájdené alebo nenájdené objekty, alebo v prípade potreby je možné prispôsobiť aj časový interval použitý pre spracovanie a vyhodnotenie údajov.



Obr. 4 Hodnoty magnetickej indukcie objektov detegovaných v priebehu jedného mesiaca

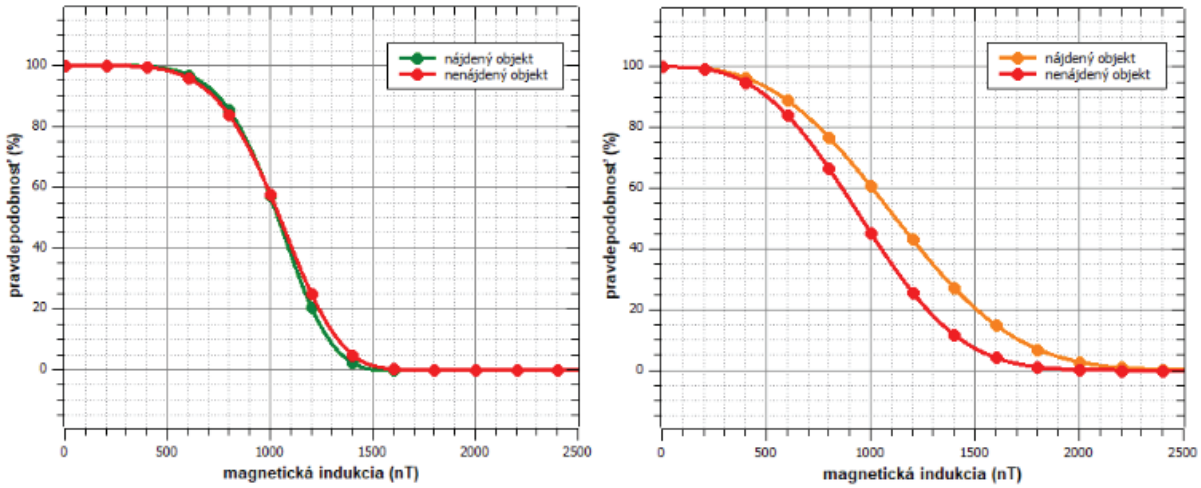
Ďalšia metodika využíva histogramy, ktoré znázorňujú rozdelenie údajov pomocou stĺpcov; každý z nich predstavuje určitý rozsah veľkosti magnetickej indukcie detegovaného objektu. Výška stĺpca zodpovedá počtu údajových bodov v danej skupine. Pre porovnanie je na Obr. 5 doplnené aj Gaussovo rozdelenie pravdepodobnosti výskytu telies vyznačujúce sa určitou veľkosťou magnetickej indukcie. Pri tvorbe týchto histogramov bola veľkosť kroku (hodnota magnetickej indukcie) nastavená na 200 nT a analyzované údaje sú z ročnej prevádzky dopravníkov.



Obr. 5 Histogramy detegovaných objektov: dopravník č. 1 (vľavo) a dopravník č. 2 (vpravo)

Predikčné modely založené na Weibullovom rozdelení boli vytvorené s využitím inverznej kumulatívnej distribučnej funkcie. Na ich zostavenie boli použité prevádzkové údaje získané počas ročnej prevádzky pásových dopravníkov. Zaznamenaná údaje boli vyhodnotené pomocou Weibullovej analýzy, na základe ktorej bola stanovená pravdepodobnosť detekcie feromagnetických objektov charakterizovaných určitou veľkosťou magnetickej indukcie. Výsledné predikčné modely pre pásové dopravníky sú znázornené na Obr. 6.

Z vizualizovaných Weibullových predikčných modelov je možné určiť pravdepodobnosť výskytu nájdených alebo nenájdených feromagnetických objektov. Ako dokumentuje Obr. 6, predikčné krivky reprezentujúce nájdené a nenájdené objekty na pásovom dopravníku č. 1 vykazujú vysokú mieru podobnosti, pričom rozdiely medzi nimi sú iba minimálne. Táto skutočnosť naznačuje, že rozdelenie hodnôt magnetickej indukcie je v oboch skupinách porovnateľné, čo môže poukazovať na stabilné prevádzkové podmienky a konzistentnú činnosť detekčného systému. Ide o očakávanú situáciu, keďže to znamená nižšiu pravdepodobnosť, že objekty vyznačujúce sa vysokými hodnotami magnetickej indukcie nebudú detegované. Parametre Weibullovho rozdelenia pre dopravník č. 2 však dokazujú, že predikčné krivky sa výrazne líšia. Objekty, ktoré neboli detegované, sa vyznačujú nižšími hodnotami magnetickej indukcie. V tomto prípade sa odporúča prehodnotiť nastavenie prahovej hodnoty, pretože zo sklonu a tvaru získanej predikčnej krivky je zrejmé, že existuje vyššia pravdepodobnosť výskytu tak nájdených, ako aj nenájdených objektov. Tieto krivky navyše poukazujú na výrazne vyššiu pravdepodobnosť detekcie väčších objektov, čo naznačuje nižšiu kvalitu materiálu alebo nedostatky v procesoch ťažby alebo údržby. Vypočítané parametre Weibullovho rozdelenia sú zhrnuté v Tab. 1.



Obr. 6 Predikčné modely pre dopravník č. 1 (vľavo) a dopravník č. 2 (vpravo)

Tab. 1 Parametre Weibullovho rozdelenia

Dopravník č.	α (nT)	β (-)
1	1107,37	5,69
2	1276,20	2,84

Parameter α sa často označuje ako parameter mierky. Vyjadruje mieru rozsahu alebo rozptylu údajov. Vyššia hodnota tohto parametra znamená, že rozdelenie pokrýva väčší rozsah hodnôt. Naopak, nižšia hodnota tohto parametra znamená, že rozdelenie pokrýva menší interval hodnôt. V našom prípade, pri zohľadnení inverznej distribučnej funkcie to pre dopravník č. 1 znamená, že existuje 63,2 % pravdepodobnosť, že detegované objekty sa budú vyznačovať nižšími hodnotami magnetickej indukcie.

Parameter β sa často označuje ako parameter tvaru, keďže určuje tvar krivky. V prípade, že $\beta = 1$, rozdelenie sa správa ako exponenciálne. S klesajúcou hodnotou tohto parametra sa zvyšuje sklon krivky. V našom prípade by to mohlo naznačovať vážne problémy s kvalitou materiálu. Ďalšou možnosťou môže byť nesprávna inštalácia, nastavenie alebo používanie systému. Pre $\beta > 1$ sú typické krivky v tvare písmena S. V našom prípade sa tento tvar očakáva aj vzhľadom na nastavenie prahovej hodnoty. Pre hodnotu $\beta = 3$ možno očakávať tvar zodpovedajúci normálnemu rozdeleniu. Vyššie hodnoty zvyčajne naznačujú malú variabilitu prepravovaného materiálu.

Znalosť vývoja parametrov Weibullovho rozdelenia pre rôzne prahové hodnoty je veľmi užitočné najmä v situáciách, keď prahové hodnoty detekcie nie sú nastavené vhodne. V praxi to znamená, že sa deteguje množstvo objektov s relatívne nízkymi hodnotami magnetickej indukcie, pričom tieto objekty nepredstavujú významné riziko pre prevádzku dopravníkového pásu. V niektorých prípadoch tieto objekty obsluha na páse ani nedokáže nájsť. Keďže každá detekcia objektu vedie k zastaveniu pásového dopravníka, predikčné modely možno využiť na stanovenie optimálnej prahovej hodnoty, ktorá minimalizuje zbytočné odstávky a zároveň zachováva primeranú úroveň ochrany. Keďže však táto hodnota do značnej miery závisí od prevádzkových podmienok dopravníka, prepravovaného materiálu a ďalších faktorov, môže ju nastaviť samotná obsluha. Napriek tomu sa odporúča konzultácia s dodávateľom detekčného systému, najmä pri zmene prepravovaného materiálu. V prípade potreby vykoná dodávateľ overovacie skúšky nastavenia systému. Výhodou oproti histogramom je aj spôsob vizualizácie získaných údajov. Predikčné krivky majú vyššiu informačnú hodnotu, pretože histogramy a ich vizualizácia môžu byť výrazne ovplyvnené zvoleným krokom, celkovým množstvom údajov a podobne, zatiaľ čo výsledky Weibullovej analýzy priamo vyjadrujú pravdepodobnosť výskytu objektu charakterizovaného určitou magnetickou indukciou.

Zaznamenané údaje môžu predstavovať cenný zdroj informácií nielen pre pracovníkov obsluhy, ale vďaka manažérskym reportom aj pre riadiacich pracovníkov, keďže vyhodnotené údaje možno po dôkladnej analýze využiť okrem optimalizácie nastavenia detekčného systému aj na monitorovanie vyťaženosti pásového dopravníka a efektívne plánovanie jeho využívania. Manažérske reporty môžu byť prispôsobené na základe potrieb a preferencií zákazníka, pričom z reportov je možné napríklad porovnávať pracovníkov na základe pomeru nájdených a nenájdených objektov. V prípade potreby by bolo možné vyhodnotiť aj aktivitu pracovníkov, keďže zaznamenané údaje obsahujú aj informácie o čase potrebnom na potvrdenie nájdenia, resp. nenájdenia objektu. Tu je ale potrebné podotknúť, že príliš rýchla reakcia môže naznačovať, že zo strany pracovníkov nebola vyvinutá žiadna snaha o nájdenie detegovaného objektu. Vďaka systému je možné monitorovať aj činnosť ďalších pracovníkov, keďže detegovanými objektmi môže byť odpadový materiál z opráv, či údržby. Ďalšou veľkou výhodou systému je možnosť hodnotenia kvality dodávaného materiálu, čo je vidieť na základe celkového počtu nájdených objektov. Vďaka štatistickému vyhodnoteniu údajov je možné tiež monitorovať stav detekčného systému, nakoľko príliš vysoký podiel nenájdených objektov

môže signalizovať jeho poruchu. Vďaka detekčným systémom založeným na magnetických senzoroch je ale možné monitorovať aj stav pásových dopravníkov, keďže poruchy dopravníkov sa môžu prejaviť v nameraných hodnotách magnetickej indukcie a spôsobovať falošné poplachy.

Je však potrebné zdôrazniť, že závery z analýzy údajov je potrebné vyvodzovať s ohľadom na rôzne prevádzkové podmienky a špecifiká využívania pásového dopravníka a v mnohých prípadoch je potrebná dôkladná analýza, či preskúmanie situácie. Obzvlášť dôležitá je konzultácia s pracovníkmi obsluhy napríklad pri zavádzaní systémov do prevádzky.

Záver

Pásové dopravníky predstavujú neoddeliteľnú súčasť mnohých priemyselných odvetví, najmä baníctva a ťažkého priemyslu, kde sú prevádzkované v náročných klimatických a environmentálnych podmienkach, častokrát s vysokou prašnosťou. Poškodenie alebo pretrhnutie dopravníkového pásu môže v takýchto prevádzkach viesť k závažným technickým, prevádzkovým a ekonomickým dôsledkom. Náš výskum je zameraný na detekciu feromagnetických objektov pomocou rámových snímačov využívajúcich magnetické senzory. Tento princíp sa vyznačuje vysokou spoľahlivosťou a účinnosťou aj v mimoriadne náročných prevádzkových podmienkach.

V článku je zdôraznený význam analýzy zaznamenaných prevádzkových údajov súvisiacich s činnosťou detekčného systému. Získané údaje umožňujú nielen optimalizáciu nastavenia systému a minimalizáciu výskytu falošných poplachov či rizika nedetegovania nebezpečných predmetov, ale aj cenné informácie o miere využitia dopravníkov, činnosti obsluhy a ďalších pracovníkov, ako aj o kvalite prepravovaného materiálu. Súčasne môžu slúžiť na včasnú identifikáciu porúch detekčného systému alebo samotného dopravníka. Štatistické spracovanie a vyhodnocovanie týchto údajov tak prináša významné prínosy nielen pre pracovníkov prevádzky a obsluhy, ale aj pre manažment podniku, nakoľko manažérsky report prispôsobený potrebám danej prevádzky umožňuje efektívnejšiu ochranu dopravníkového pásu, optimalizáciu prevádzky dopravníkových systémov a komplexné monitorovanie a hodnotenie súvisiacich procesov a činností.

Poďakovanie

Výskum bol financovaný s podporou projektov APVV-18-0248 a VEGA 1/0350/24.

Použitá literatúra:

[1] Liu, W.; Tao, Q.; Wang, N.; Xiao, W.; Pan, C. YOLO-STOD: An industrial conveyor belt tear detection model based on Yolov5 algorithm. *Sci. Rep.* 2025, *15*, 1659. https://doi.org/10.1038/s41598-024-83619-6.

[2] Peng, F.; Hao, K.; Lu, X. Camera-Adaptive Foreign Object Detection for Coal Conveyor Belts. *Appl. Sci.* 2025, *15*, 4769. https://doi.org/10.3390/app15094769.

[3] Miao, D.; Wang, Y.; Yang, L.; Wei, S. Foreign Object Detection Method of Conveyor Belt Based on Improved Nanodet. *IEEE Access* 2023, *11*, 23046–23052. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3253624.

[4] Ling, J.; Fu, Z.; Yuan, X. Lightweight coal mine conveyor belt foreign object detection based on improved Yolov8n. *Sci. Rep.* 2025, *15*, 10361. https://doi.org/10.1038/s41598-025-87848-1.
[5] Yang, D.; Miao, C.; Liu, Y.; Wang, Y.; Zheng, Y. Improved foreign object tracking algorithm in coal for belt conveyor gangue selection robot with YOLOv7 and DeepSORT. *Measurement* 2024, *228*, 114180. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114180.
[6] Yang, D.; Miao, C.; Liu, Y.; Wang, Y.; Zheng, Y. Improved foreign object tracking algorithm in coal for belt conveyor gangue selection robot with YOLOv7 and DeepSORT. *Measurement* 2024, *228*, 114180. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114180.
[7] Hong, Y.; Wang, L.; Su, J.; Li, Y.; Zhu, B.; Wang, H. Enhanced foreign body detection on coal mine conveyor belts using improved DLEA and lightweight SARC-DETR model. *Signal Image Video Process.* 2025, *19*, 349. https://doi.org/10.1007/s11760-025-03922-1.
[8] Wang, Y.; Jiang, Z.; Wang, Y.; Yang, C.; Zou, L. Intelligent detection of foreign objects over coal flow based on improved GANomaly. *J. Intell. Fuzzy Syst*. 2024, *46*, 5841–5851. https://doi.org/10.3233/JIFS-230647.
[9] Praslička, D.; Blažek, J.; Hudák, J.; Mikita, I.; Moucha, V. Indsutrial Applications of Magnetometry. *J. Electr. Eng.* 2015, *6*, 190–192.
[10] Šmelko, M.; Kašper, P.; Blažek, J.; Hudák, J.; Mikita, I.; Lipovský, P.; Draganová, K.; Kán, V.; Kliment, T. From Košice to the Orbit. A Successful Story of Applied Magnetism. *IEEE Trans. Magn.* 2025, *61*, 4001306. https://doi.org/10.1109/TMAG.2024.3510915.

Autor(i):

doc. Ing. Katarína Draganová, PhD., Ing.Paed.IGIP
docent
Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta
Rampová 7, 040 01 Košice
Tel.: +421 55 602 6153 E-mail: katarina.draganova@tuke.sk

doc. Ing. Karol Semrád, PhD., MSc.
docent
Vysoká škola bezpečnostného manažérstva v Košiciach
Košťova 1, 040 01 Košice
Tel.: +421 55 720 1071 E-mail: karol.semrad@vsbm.sk

doc. Ing. Miroslav Šmelko, PhD.
predseda predstavenstva
EDIS (Výskumné a vývojové družstvo pre Elektronické Digitálne Systémy)
Rampová 5, 040 01 Košice
Tel.: +421 908 604 540 E-mail: smelko@edis.solutions

Ing. Martin Fiľko, PhD.
výskumný pracovník
EDIS (Výskumné a vývojové družstvo pre Elektronické Digitálne Systémy)
Rampová 5, 040 01 Košice
Tel.: +421 907 374 305 E-mail: filko@edis.solutions

DIAGNOSTIKA DEGRADÁCIE ERGONOMICKÝCH PODMIENOK NA MONTÁŽNYCH PRACOVISKÁCH POČAS NÁBEHU VÝROBY V PROSTREDÍ GREENFIELD

Diagnostics of Ergonomic Condition Degradation at Manual Assembly Workstations During Production Ramp-Up in Greenfield Environments

Štefan Kandráč, Michal Hovanec, Samuel Dubovský

Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta

Anotácia

Montážne pracoviská v nových výrobných závodoch typu greenfield sú navrhované podľa ergonomických štandardov platných v čase ich prvotného návrhu. Počas nábehu výroby však dochádza k častým zmenám výrobných parametrov — úpravám kusovníkov, preradeniu operácií, zmenám materiálového toku — ktoré môžu postupne zhoršovať pôvodne nastavené ergonomické podmienky. V čase plánovania väčšiny súčasných greenfield závodov neboli metódy umelej inteligencie dostatočne vyspelé na riešenie tohto typu problému. Tento príspevok sa zaoberá možnosťami diagnostiky ergonomickej degradácie na manuálnych montážnych pracoviskách s využitím pravidlového systému založeného na kvantitatívnych ergonomických limitoch. Navrhovaný rámec predpokladá priebežné vyhodnocovanie zmien výrobných parametrov voči stanoveným prahovým hodnotám, pričom digitálne modelovanie človeka slúži ako periodický auditný nástroj na overenie celkového ergonomického stavu pracoviska.

Kľúčové slová: ergonómia, technická diagnostika, greenfield, digitálne modelovanie človeka, nábeh výroby

Abstract

Manual assembly workstations in greenfield manufacturing facilities are designed according to ergonomic standards applicable at the time of their initial design. During production ramp-up, however, frequent changes to production parameters — bill of materials modifications, operation resequencing, material flow changes — can progressively degrade the originally established ergonomic conditions. At the time most current greenfield facilities were planned, artificial intelligence methods were not yet sufficiently mature to address this class of problem. This paper examines the possibilities of diagnosing ergonomic degradation at manual assembly workstations using a rule-based system founded on quantitative ergonomic limits. The proposed framework assumes continuous evaluation of production parameter changes against established threshold values, with digital human modeling serving as a periodic audit tool for verifying the overall ergonomic state of the workstation.

Keywords: *ergonomics, technical diagnostics, greenfield, digital human modeling, production ramp-up*

Úvod

Návrh montážnych pracovísk v moderných výrobných podnikoch sa opiera o súbor ergonomických štandardov a interných smerníc, ktorých cieľom je zabezpečiť bezpečné a efektívne pracovné podmienky pre operátorov. Tieto štandardy definujú kvantitatívne limity pre

parametre ako výška pracovnej plochy, dosahová vzdialenosť, hmotnosť manipulovaných komponentov, frekvencia pohybov a pracovná poloha operátora. V ideálnom prípade je pracovisko navrhnuté tak, aby všetky tieto parametre spadali do optimálnej zóny ešte pred začiatkom sériovej výroby.

V prostredí výrobných závodov typu greenfield je však situácia zásadne odlišná od prostredia zabehnutej výroby. Nábeh výroby v novom závode je charakteristický vysokou mierou neistoty a neustálymi zmenami. Kusovníky sa menia v reakcii na konštrukčné úpravy produktu, operácie sa preraďujú medzi stanoviskami na základe aktualizovaných taktovacích časov, materiálový tok sa prispôsobuje reálnym logistickým obmedzeniam, a pracovné nástroje a prípravky sa dodávajú a upravujú priebežne. Každá z týchto zmien môže mať vplyv na ergonomické podmienky na dotknutom pracovisku.

Problém spočíva v tom, že jednotlivé zmeny sú často malé a izolované — presun jedného komponentu na inú policu, pridanie operácie s nízkou záťažou, úprava poradia montáže. Každá zmena samostatne nemusí predstavovať ergonomické riziko. Kumulatívny efekt viacerých takýchto zmien v priebehu týždňov a mesiacov však môže posunúť pracovisko z optimálnej ergonomickej zóny do oblasti zvýšeného rizika, bez toho, aby bol tento posun systematicky zaznamenaný alebo vyhodnotený.

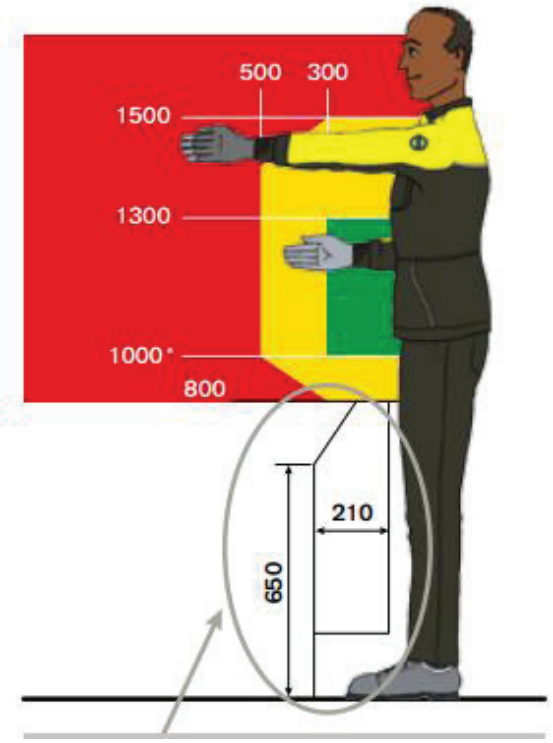
V čase, kedy bola väčšina súčasných greenfield závodov plánovaná a uvádzaná do prevádzky, neboli nástroje založené na umelej inteligencii bežne dostupné ani implementované v priemyselnej praxi pre účely priebežného ergonomického monitorovania. Ergonomické hodnotenie sa preto realizovalo prevažne manuálne, formou periodických auditov alebo na základe hlásení operátorov, čo znamená, že medzi vznikom problému a jeho identifikáciou môže uplynúť značný časový interval.

Cieľom tohto príspevku je navrhnúť teoretický rámec pre diagnostiku ergonomickej degradácie na manuálnych montážnych pracoviskách počas nábehu výroby, s využitím pravidlového systému založeného na existujúcich kvantitatívnych ergonomických štandardoch a s podporou digitálneho modelovania človeka ako periodického auditného nástroja. Hlavným prínosom navrhovaného rámca je umožnenie priebežného sledovania kumulatívnej ergonomickej degradácie v období medzi periodickými auditmi, čím sa skracuje časový interval medzi vznikom problému a jeho identifikáciou.

1. Ergonomické štandardy ako diagnostický základ

Ergonomické hodnotenie priemyselných pracovísk sa opiera o súbor štandardizovaných metód a interných smerníc výrobných podnikov. Medzi najpoužívanejšie metódy patria RULA (Rapid Upper Limb Assessment), REBA (Rapid Entire Body Assessment), OWAS (Ovako Working Posture Analysis System) a EAWS (Ergonomic Assessment Worksheet). Tieto metódy poskytujú kvantitatívne skóre na základe vyhodnotenia pracovnej polohy, záťaže a frekvencie pohybov operátora.
Okrem univerzálnych metód väčšina veľkých výrobných podnikov disponuje vlastnými internými ergonomickými smernicami, ktoré definujú konkrétne limity prispôsobené charakteru ich výroby. Tieto smernice typicky rozdeľujú pracovný priestor do zón podľa miery ergonomickej záťaže. Optimálna zóna pre manipuláciu s komponentmi je spravidla definovaná

vo výškovom rozsahu približne 800 až 1200 mm od podlahy, pričom dosahová vzdialenosť by nemala presiahnuť 300 mm od tela operátora. Pre komponenty s vyššou hmotnosťou sú tieto limity prísnejšie.



Obr. 1 Príklad klasifikácie pracovného priestoru do ergonomických zón podľa výšky a dosahu operátora

Na obrázku (Obr. 1) je znázornený príklad klasifikácie pracovného priestoru, kde zelená zóna predstavuje optimálny rozsah pre manipuláciu, žltá prípustnú oblasť a červená oblasť so zvýšenou ergonomickou záťažou.

Pre účely diagnostiky ergonomickej degradácie sú tieto štandardy podstatné v tom, že poskytujú jasne definované kvantitatívne prahové hodnoty. Každý parameter pracoviska — výška odoberania komponentu, hmotnosť dielu, frekvencia zdvihov, uhol natočenia trupu — je možné vyjadriť číselnou hodnotou a porovnať ju s prípustným rozsahom. Toto porovnanie je základom navrhovaného diagnostického prístupu.

2. Degradácia ergonomických podmienok počas nábehu výroby

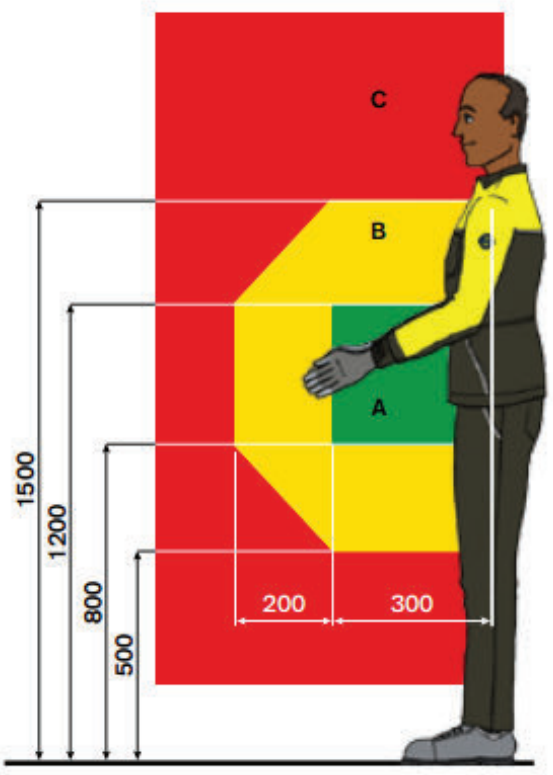
Nábeh výroby v prostredí greenfield sa od ustálenej sériovej výroby líši predovšetkým frekvenciou a rozsahom zmien. Kým v zabehanom výrobnom procese sú zmeny na pracoviskách relatívne zriedkavé a riadené, v prostredí greenfield dochádza k zmenám na dennej alebo týždennej báze, a to často v reakcii na faktory, ktoré neboli známe v čase pôvodného návrhu pracoviska.

Typické zmeny, ku ktorým dochádza počas nábehu výroby, je možné kategorizovať nasledovne:

- Zmeny kusovníkov a dielov — pridanie, odobratie alebo náhrada komponentov v dôsledku konštrukčných úprav produktu. Tieto zmeny ovplyvňujú hmotnosť manipulovaných dielov, ich rozmery a spôsob odoberania z regálov.

- Preradenie operácií medzi stanoviskami — v záujme vyváženia taktovacích časov dochádza k presunu operácií z jedného pracoviska na druhé, čo mení počet a charakter pohybov operátora na dotknutých stanoviskách.
- Zmeny materiálového toku a zásobovania — úpravy v spôsobe zásobovania pracovísk, zmena pozícií regálov, zmena typu balení alebo spôsobu prezentácie komponentov operátorovi. Tieto zmeny priamo ovplyvňujú výšku odoberania, dosahové vzdialenosti a frekvenciu manipulačných operácií.
- Zmeny nástrojov a prípravkov — dodanie, úprava alebo výmena pracovného nástroja, čo môže zmeniť požadovanú pracovnú polohu operátora alebo silu potrebnú na vykonanie operácie.

Každá z týchto zmien samostatne nemusí prekročiť stanovené ergonomické limity. Problém nastáva vtedy, keď sa na jednom pracovisku v priebehu krátkeho časového obdobia akumuluje viacero zmien, pričom žiadna z nich nebola individuálne vyhodnotená z ergonomického hľadiska. Výsledkom môže byť pracovisko, ktoré je z hľadiska dokumentácie v súlade so štandardmi, no v skutočnosti sa od pôvodného ergonomického návrhu výrazne odchýlilo.



Obr. 2 Diagram manipulácie — závislosť maximálnej prípustnej hmotnosti od výšky a frekvencie manipulácie

Na ilustráciu kumulatívneho efektu je možné uviesť modelový prípad pracoviska, ktoré bolo pri nábehu výroby navrhnuté s optimálnym ergonomickým rozložením — všetky komponenty boli umiestnené v zóne A, v zodpovedajúcich baleniach a pri taktovom čase 45 cyklov za hodinu. V priebehu prvého týždňa dochádza k zmene kusovníka, ktorá si vyžaduje

pridanie komponentu v balení väčšom, než bolo pôvodne plánované. Jediná dostupná pozícia v regáli sa nachádza mimo optimálnej zóny — pod 800 mm alebo nad 1200 mm — nakoľko pôvodne navrhnuté pozície sú už obsadené. V druhom týždni je v dôsledku ďalšej konštrukčnej úpravy pôvodný komponent nahradený ťažším variantom s hmotnosťou zvýšenou z 5 kg na 8 kg. V treťom týždni je na pracovisko preradená ďalšia operácia z dôvodu vyváženia taktovacích časov, čím sa zvyšuje celkový počet manipulácií za cyklus. Každá zmena samostatne neprekračuje kritické limity, no ich kombinácia posúva pracovisko z pôvodne optimálneho stavu do oblasti zvýšeného ergonomického rizika, ktoré by bez systematického sledovania zostalo neidentifikované.

3. Návrh diagnostického rámca

Navrhovaný diagnostický rámec je založený na princípe priebežného monitorovania zmien výrobných parametrov a ich porovnávania s kvantitatívnymi ergonomickými limitmi. Rámec pozostáva z troch úrovní (Obr. 3):

Prvá úroveň — evidencia a klasifikácia zmien

Každá zmena na pracovisku, ktorá sa týka manipulácie s materiálom, usporiadania komponentov alebo pracovného postupu, je zaznamenaná a klasifikovaná podľa typu parametra, ktorý ovplyvňuje. Príkladom je pridanie nového komponentu na regál — táto zmena sa klasifikuje podľa toho, či ovplyvňuje výšku odoberania, hmotnosť manipulovaného dielu, dosahovú vzdialenosť alebo frekvenciu manipulácie.

Druhá úroveň — vyhodnotenie voči prahovým hodnotám

Pre každý ovplyvnený parameter sa aktuálna hodnota porovná s limitmi stanovenými ergonomickými smernicami. Systém vyhodnotí, či sa parameter nachádza v optimálnej, prípustnej alebo kritickej zóne. Ak parameter zostáva v optimálnej zóne, zmena je zaznamenaná bez ďalšieho zásahu. Ak parameter presiahne prípustnú hranicu alebo sa kumuláciou zmien posunie z optimálnej do prípustnej zóny, systém vygeneruje upozornenie. Kľúčovým aspektom tohto prístupu je sledovanie kumulatívneho efektu. Systém nehodnotí len jednotlivé zmeny izolovane, ale udržiava celkový ergonomický profil pracoviska a vyhodnocuje posun tohto profilu v čase. Tým je možné identifikovať situácie, kedy päť izolovaných zmien, z ktorých žiadna samostatne nepredstavuje problém, v súčte posunú pracovisko do oblasti zvýšeného rizika.

Tretia úroveň — verifikácia digitálnym modelovaním človeka

V pravidelných intervaloch, alebo v prípade, že kumulatívne zmeny na pracovisku dosiahnu stanovenú úroveň, sa vykoná verifikácia prostredníctvom digitálneho modelovania človeka v softvéri ako je napríklad Tecnomatix Jack. Táto verifikácia slúži na overenie, či výstupy pravidlového systému zodpovedajú skutočnému ergonomickému stavu pracoviska pri zohľadnení komplexných interakcií medzi jednotlivými parametrami, ktoré pravidlový systém samostatne nemusí zachytiť.

Digitálne modelovanie človeka v tomto rámci neslúži ako nástroj na hodnotenie každej jednotlivej zmeny, čo by bolo nepraktické a neúmerné, ale ako periodický auditný nástroj, ktorý kalibruje a overuje diagnostický systém. Je možné ho prirovnať ku kontrolnému meraniu, ktoré sa vykonáva v pravidelných intervaloch na overenie správnosti priebežných meraní.



Obr. 3 Schéma diagnostického rámca pre sledovanie ergonomickej degradácie pracoviska

Diskusia

Navrhovaný rámec je v aktuálnej podobe teoretický a jeho praktická implementácia si vyžaduje riešenie niekoľkých otvorených otázok. Prvou z nich je otázka integrácie so systémami riadenia výroby — aby systém mohol automaticky registrovať zmeny na

pracoviskách, musí byť prepojený so systémami, v ktorých sa tieto zmeny evidujú, čo predpokladá určitú úroveň digitalizácie výrobného procesu.
Minimálne dátové vstupy potrebné pre fungovanie systému zahŕňajú aktuálny kusovník pracoviska, popis pracovných operácií, polohu a výšku uloženia komponentov v regáloch, hmotnosť manipulovaných dielov, frekvenciu manipulačných operácií a záznamy o zmenách usporiadania pracoviska.

Druhou otázkou je definícia vhodných intervalov pre verifikáciu digitálnym modelovaním človeka. Príliš časté verifikácie by boli neefektívne a nákladné, príliš zriedkavé by znížili diagnostickú hodnotu rámca. Optimálny interval bude pravdepodobne závisieť od frekvencie zmien na konkrétnom pracovisku a od fázy nábehu výroby.

Treťou otázkou je miera, do akej je možné aplikovať metódy umelej inteligencie na automatizáciu hodnotenia. V základnej podobe je navrhovaný rámec pravidlovým systémom, ktorý porovnáva hodnoty s limitmi. Pokročilejšie metódy, napríklad strojové učenie, by mohli byť využité na identifikáciu vzorcov zmien, ktoré vedú k ergonomickej degradácii, a na predikciu budúceho vývoja ergonomického stavu pracoviska na základe aktuálnych trendov.

Je potrebné zdôrazniť, že navrhovaný prístup nie je kritikou existujúcich metód návrhu pracovísk. Tieto metódy boli navrhnuté a implementované v čase, kedy nástroje na priebežné automatizované monitorovanie ergonomických podmienok neboli k dispozícii. Navrhovaný rámec predstavuje doplnenie existujúcich metód o diagnostickú vrstvu, ktorá reflektuje aktuálne technologické možnosti.

Záver

Príspevok predstavil teoretický rámec pre diagnostiku degradácie ergonomických podmienok na manuálnych montážnych pracoviskách v prostredí greenfield počas nábehu výroby. Navrhovaný rámec kombinuje pravidlový systém založený na kvantitatívnych ergonomických limitoch s periodickou verifikáciou prostredníctvom digitálneho modelovania človeka. Tento prístup umožňuje identifikáciu kumulatívneho zhoršovania ergonomických podmienok, ku ktorému dochádza v dôsledku častých zmien výrobných parametrov typických pre fázu nábehu výroby.

Ďalší výskum bude zameraný na praktickú implementáciu navrhovaného rámca v reálnom výrobnom prostredí a na overenie jeho diagnostickej účinnosti v porovnaní s konvenčnými metódami ergonomického hodnotenia.

Poďakovanie

Tento príspevkov vznikol s podporou projektu: „Komplexný výskum inovatívnych kompozitných materiálov pre široké spektrum aplikovateľnosti v inteligentnom priemysle“ (akronym: KOMITMENT), kód ITMS2021+: 401101C721, spolufinancovaného Európskou úniou v rámci Programu Slovensko.

Použitá literatúra:

[1] MATT, D., PEDRINI, G., BONFANT, A. a ORZES, G. Industrial digitalization. A systematic literature review and research agenda. European Management Journal. 2022.

[2] TAO, F., ZHANG, H., LIU, A. a NEE, A. Digital Twin in Industry: State-of-the-Art. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2019, roč. 15.

[3] ZARE, A., BLACK, N., SAGOT, J.-C., HUNAULT, G. a ROQUELAURE, Y. Ergonomic interventions to reduce musculoskeletal risk factors in a truck manufacturing plant. In Proceedings of the AHFE International Conference. 2021.

[4] HOVANEC, M., KORBA, P., VENCEL, M. a AL-RABEEI, S. Simulating a Digital Factory and Improving Production Efficiency by Using Virtual Reality Technology. Applied Sciences. 2023, roč. 13.

[5] DUBOVSKÝ, S., TYMOFIIV, V., AL-RABEEI, S., PAČAIOVÁ, H. a HOVANEC, M. Design of a Material Transport Cart for a Factory in the Aviation Industry. In Proceedings of the 2025 New Trends in Aviation Development (NTAD). 2025. DOI: 10.1109/NTAD67887.2025.11302505.

[6] McATAMNEY, L. a CORLETT, E. N. RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. Applied Ergonomics. 1993, roč. 24, č. 2, s. 91–99.

[7] HIGNETT, S. a McATAMNEY, L. Rapid Entire Body Assessment (REBA). Applied Ergonomics. 2000, roč. 31, č. 2, s. 201–205.

[8] SCHAUB, K., CARAGNANO, G., BRITZKE, B. a BRUDER, R. The European Assembly Worksheet. Theoretical Issues in Ergonomics Science. 2013, roč. 14, č. 6, s. 616–639.

[9] CHAFFIN, D. B. Digital Human Modeling for Vehicle and Workplace Design. SAE International. 2001. ISBN 978-0-7680-0687-0.

[10] ROMERO, D., STAHRE, J., WUEST, T. et al. Towards an Operator 4.0 Typology: A Human-Centric Perspective on the Fourth Industrial Revolution Technologies. In Proceedings of the International Conference on Computers and Industrial Engineering (CIE46). 2016.

Autor(i):

Ing. Štefan Kandráč,
výskumný pracovník
Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta
Rampová 7, 04001 Košice
Tel: E-mail: stefan.kandrac@tuke.sk

doc. Ing. Michal Hovanec, PhD. Ing.Paed.IGIP
vedúci katedry leteckho inžinierstva
Technická univerzita v Košiciach, Letecká fakulta
Rampová 7, 041 00 Košice
Tel.: +421 911 422 732 E-mail: michal.hovanec@tuke.sk

Bc. Samuel Dubovský
študent
Letecká fakulta, Technická Univerzita v Košiciach
Rampová 1731/7, 040 01 Košice
Tel.: E-mail: samuel.dubovsky@student.tuke.sk


ATD SR
Asociácia technických diagnostikov Slovenskej republiky
AKREDITOVANÉ KURZY
CERTIFIKAČNÝ ORGÁN PRE CERTIFIKÁCIU PERSONÁLU V TECHNICKEJ DIAGNOSTIKE
ROZSAH AKREDITÁCIE PODĽA ROZHODNUTIA Č. 139/11258/2024/I ZO DŇA 16.07.2024
VZDELÁVANIE A CERTIFIKÁCIA ODBORNÍKOV PRE TECHNICKÚ DIAGNOSTIKU
AKREDITOVANÁ OSOBA: ASOCIÁCIA TECHNICKÝCH DIAGNOSTIKOV SLOVENSKEJ REPUBLIKY
TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH, LETNÁ 1/9, 042 00 KOŠICE
Identifikačné číslo akreditovanej osoby 139/O-007
Miesto výkonu činnosti
Technická univerzita, Strojnícka fakulta, Letná 1/9, 042 00 Košice
Akreditácia
Rozsah akreditácie k osvedčeniu
VIBRODIAGNOSTIK
STUPEŇ I, II, III, IV
CERTIFIKAČNÁ SCHÉMA COP - 01 - 07
ISO 18436-2: 2023
INFRAČERVENÝ DIAGNOSTIK
STUPEŇ I, II, III
CERTIFIKAČNÁ SCHÉMA COP - 02 - 07
ISO 18436 - 7: 2014
TRIBOTECHNIK TRIBODIAGNOSTIK
STUPEŇ I, II, III
CERTIFIKAČNÁ SCHÉMA COP - 03 - 10
ISO 18436-4: 2014
ISO 18436-5: 2012
PRE KOHO SÚ KURZY VHODNÉ
• PRACOVNÍCI ÚDRŽBY, DIAGNOSTIKY A SPOĽAHLIVOSTI TECHNICKÝCH SYSTÉMOV
• VIBRODIAGNOSTICI A ŠPECIALISTI INFRAČERVENEJ DIAGNOSTIKY
• ODBORNÍCI, KTORÍ POTREBUJÚ PREUKÁZAŤ KVALIFIKÁCIU PODĽA PRÍSLUŠNÝCH CERTIFIKAČNÝCH SCHÉM

Konferencia DIS – „Teória a aplikácia metód technickej diagnostiky“ sa uskutočňuje za priamej podpory ZSVTS.

PARTNERI KONFERENCIE



https://dis.lf.tuke.sk/

TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH

VÝZVA PRE TVOJU BUDÚCNOSŤ

Letná 1/9
042 00 Košice - Sever
tel.: +421 55 602 25 01

www.tuke.sk

ISSN 1337-8252