

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**TEZE
DISERTAČNÍ
PRÁCE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

Povrchy a povlaky s parametry pro automobilový průmysl

Ing. Zdeněk Hazdra

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Strojírenská technologie

Školitel: *doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.*

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha

Únor 2023

Název anglicky: Surfaces and coatings with parametres for automotive industry

Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia na Ústavu strojírenské technologie Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: Ing. Zdeněk Hazdra

Ústav strojírenské technologie, Fakulta strojní ČVUT v Praze, Technická 4, 166 07, Praha 6

Školitel: doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.

Ústav strojírenské technologie, Fakulta strojní ČVUT v Praze, Technická 4, 166 07, Praha 6

Školitel-specialista: Ing. Jan Kudláček, Ph.D.

Ústav strojírenské technologie, Fakulta strojní ČVUT v Praze, Technická 4, 166 07, Praha 6

Oponenti: prof. Dr.Ing. Antonín Kříž, IWE
 Doc. Ing. Václav Machek, CSc.
 prof. Ing. František Nový, Ph.D.

Teze byly rozeslány dne: 14.2.2023

Obhajoba disertace se koná dne čtvrtek **2.3. 2023** v **14:00** hod.

v zasedací místnosti č. 17 (přízemí) Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6 před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Strojírenská technologie. S disertační prací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

prof. Ing. Jan Suchánek, CSc.
předseda oborové rady oboru Strojírenská technologie
Fakulta strojní ČVUT v Praze

Obsah

1. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	- 6 -
1.1 <i>Tribologie a emise v automobilovém průmyslu</i>	<i>- 7 -</i>
1.2 <i>Omezení rizik šroubových spojů</i>	<i>- 24 -</i>
1.3 <i>Zvyšování výkonu třecích uzlů</i>	<i>- 24 -</i>
1.4 <i>Shrnutí teoretické a řešeršní části práce.</i>	<i>- 25 -</i>
2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	- 27 -
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	- 28 -
3.1 <i>SNÍŽENÍ EMISÍ CO₂ SPALOVACÍCH MOTORŮ CESTOU SNÍŽENÍ PASIVNÍCH ODPORŮ A SPOTŘEBY PALIVA</i>	<i>- 28 -</i>
3.2 <i>TRIBOLOGIE ŠROUBOVÝCH SPOJŮ</i>	<i>42</i>
3.3 <i>BRZDOVÉ UZLY</i>	<i>52</i>
4. SPLNĚNÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE	59
5. DISKUZE VÝSLEDKŮ PŘÍNOSY PRO VĚDU A PRAXI	60
6. ZÁVĚR	65
Publikace autora související s tématem disertace	68
Vyzvané přednášky související s tématem disertace	70
Seznam použité literatury v tezích	71
Anotace	76
Summary	76
Bez ohlasů a recenzí	76

1. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

Nebezpečí technologického zaostávání je největším rizikem pro udržitelný rozvoj, společností a firem, států ale i všech oborů lidské činnosti. Platí to i pro obory zabývající se materiály a jejich povrchy i otázkami, jak je vyrobit, upravit, vyčistit ale i chránit.

Nová poznání a informace nepřicházejí k lidstvu ani k jedinci lidské společnosti v konečné podobě. Hledá-li se odpověď na skutečně cosi nového, nelze to ani opsat ani porovnat, neboť není mnohdy s čím. Ve strojírenských technologiích jde navíc „jen o to“ stanovit optimální parametry, určit výrobní prostředky a vyrobit bezpečným způsobem na základě předchozích poznání a závěrů řady odborných prací i zkušeností, a to za zcela nových technických i ekonomických možností.

Vlivem poznání ve vědě a technice, i vzhledem k mnoha praktickým zkušenostem a dovednostem, dosáhly technické obory obecně v krátké době značných kvalitativních změn.

Každý obor lidské činnosti se zdá všem, co v něm pracují velmi důležitým až nejdůležitějším. Příliš to neupřednostňují ti, co pracují ve strojírenství a strojírenských technologiích, neboť si uvědomují, že jsou především důležitou službou všem, co tento obor a technologie potřebují k naplnění jejich potřeb a cílů, tak aby neomezovaly jejich potřeby a cíle.

To platí i o poznání a znalostech z tribologie a technologií zabývajících se úpravami povrchů. Na základě nejnovějších poznatků z fyziky a chemie, nových materiálů a technologií je rozvoj těchto oborů výrazný, přičemž z pohledu svého rozvoje zatím téměř na začátku. Na stavu i kvalitě materiálů a tribologických parametrech součástí z nich vyrobených, závisí optimální funkčnost, bezpečnost a životnost výrobků v průmyslu, energetice, a i v dopravě. To platí i v problematice automobilového průmyslu. Který je navíc limitován extrémními až nezodpovědnými legislativními opatřeními. O to víc je nezbytné hledat způsoby, jak zajistit udržitelnost výroby v tomto důležitém oboru. Především pomocí poznatků z tribologie je nutné hledat a nalézat potřebná řešení těch nejpotebnejších

vnějších problémů nejbližší budoucnosti, na kterou je zaměřena pozornost vědecko-výzkumných kapacit celého průmyslně vyspělého světa.

Jelikož tato práce pojednává obsáhle o vlivu tření nan a funkční dvojice používané v automobilovém průmyslu, tak není možné všechny tyto aspekty zahrnout v tezích k dané disertační práci, tedy pro lepší a přesnější pochopení jednotlivých detailů je doporučeno seznámit se samotnou disertační prací v jejím plném rozsahu. Teze pouze shrnují hlavní poznatky současného stavu problematiky, které byly základem pro stanovení cílů disertační práce.

1.1 Tribologie a emise v automobilovém průmyslu

Na základě požadavků vydaných legislativou Evropské unie týkajících se emisních norem pro nová vozidla, která jsou uváděna na trh po roce 2020, je nutné konstatovat, že dodržování uvedených parametrů už není možné pomocí dosavadních technologií, ani klasickými spalovacími motory. Nutnost snížení emisních parametrů na hodnotu 95 g CO₂ na 1 kilometr dle budoucí normy Euro 7, bude vyžadovat nové vývojové kroky u vozidel, použití nových technologií, či alternativních pohonů. Podle prognóz a analýz odborné literatury čekají automobilový průmysl doposud největší změny, které zaznamenal od okamžiku hromadné výroby automobilů.

Lze doufat, že budoucí snižování emisních parametrů přepočtených na 1 ujetý kilometr, podpoří rozvoj alternativních pohonů vozidel. [3, 4]

Tlak na nižší hodnoty emisních produktů, vytváří razantním způsobem tlak na výrobce automobilů k vývoji složitějších a nákladnějších zařízení a technologií, které jsou hlavně u osobních vozidel s nižšími pořizovacími náklady stěží dosažitelné. [4]

„Průměrných 95 g CO₂ na 1 ujetý kilometr odpovídá spotřebě 3,54 litrů nafty či 4,06 litrů benzínu na 100 km. Tento až nemožně technicky realizovatelný striktní limit nutí automobilové výrobce vyvíjet technologie vedoucí k výrazně nižší spotřebě motorů, které však budou mnohem komplikovanější, nákladnější a snadno se mohou stát pro řadu uživatelů nedostupné z důvodu nárůstu koncové ceny automobilu a nárůstu servisních nákladů.“ [5]

Technické možnosti doposud používaných spalovacích motorů jsou pro většinu běžných automobilů mimo interval požadavků budoucí normy Euro 7.

Tyto požadavky lze splnit pouze u kategorie mini a malých vozů a každá automobilka tak bude muset mít ve svém portfoliu nějaký nízko emisní či bezemisní model. Silní výrobci automobilů, či koncerny jsou nuceni pro splnění budoucích kritérií disponovat automobily s jinou technologií pohonu, ať už plug-in hybridními, nebo plně elektrickými či vozy používající vodík jako palivo.

Plug-in hybrid znamená, že automobil s tímto typem pohonu je poháněn hlavně elektricky, baterii lze dobít i z externího zdroje elektrické energie (elektrické zásuvky). Spalovací motor je u hybridních vozů pouze jako záložní zdroj energie.

V opačném případě budou muset výrobci platit pokuty za každé překročení stanoveného limitu. Tak údajně dojde k většímu rozšíření alternativních pohonů. V současné době se nedá s jistotou odhadnout, jak se projeví tato fakta do cen a do skladby nabídky vozidel. Všichni výrobci pro Evropu hledají nejvhodnější řešení, jehož vývoj stojí však miliardové částky. [4], [5]

Emise a Evropská legislativa

Legislativní standardy a omezení pro emise se v zemích evropského kontinentu začaly objevovat v podobě, připomínající tu současnou již od roku 1970, kdy byla vydána legislativou evropské unie směrnice 70/220/EEC [6], o opatřeních proti znečišťování ovzduší emisemi z motorových vozidel. Tato směrnice byla základem umožňujícím vznik všeobecně známých emisních standardů zvaných Euro, kdy první norma nesoucí název Euro 1 nabyla účinnosti v lednu roku 1993, pro všechny modely vozidel, které byly homologovány před začátkem její platnosti s cílem snížení škodlivých částic vycházejících z výfukových plynů vozidel (CO, HC, NOx). Od doby vzniku této normy došlo k několika změnám, v současné době platí norma Euro 6, jinak řečeno, že každý nově vyrobený automobil musí tuto emisní normu pro prodej na Evropském trhu splnit. Parametry uvedené v přehledu přímých emisních norem, jsou uvedeny v následující tabulce. [6], [7], [8]

Tab. 1: Přehled emisních norem EURO pro kategorii osobních vozidel [9]

Emisní normy Euro pro osobní vozidla (Kategorie M ₁)						
Emisní norma	Datum zavedení normy	CO	HC	HC+NO _x	NO _x	PM
		[g/km]				
Zážehové motory (benzín)						
Euro 1	1.7.1992	2,72 (3,16)	-	0,97 (1,13)	-	-
Euro 2	1.1.1996	2,20	-	0,5	-	-
Euro 3	1.1.2000	2,30	0,20	-	0,15	-
Euro 4	1.1.2005	1,00	0,10	-	0,08	-
Euro 5	1.9.2009	1,00	0,10	-	0,06	0,005
Euro 6	1.9.2014	1,00	0,10	-	0,06	0,005
Vznětové motory (nafta)						
Euro 1	1.7.1992	2,72 (3,16)	-	0,97 (1,13)	-	0,14 (0,18)
Euro 2	1.1.1996	1,00	-	0,70	-	0,08
Euro 2	1.1.1996	1,00	-	0,90	-	0,10
Euro 3	1.1.2000	0,64	-	0,56	0,50	0,05
Euro 4	1.1.2005	0,50	-	0,30	0,25	0,025
Euro 5a	1.9.2009	0,50	-	0,23	0,18	0,005
Euro 5b	1.9.2011	0,50	-	0,23	0,18	0,005
Euro 6	1.9.2014	0,50	-	0,17	0,08	0,005

Dohody na snížení skleníkových plynů

První dohody na snížení oxidu uhličitého (CO₂), jednoho ze zástupců skleníkových plynů, začaly pro osobní vozidla vznikat již v letech 1998/1999.[10] Tyto dohody vznikly na základě dobrovolné dohody mezi automobilovými asociacemi, reprezentující jednotlivé výrobce automobilů, konkrétně se jednalo o asociace ACEA (Evropská asociace výrobců automobilů sdružující automobilky BMW, Daimler, Fiat, Ford, GM, Porsche, PSA Peugeot Citroën, Renault a skupinu VW), JAMA (Japonská asociace výrobců automobilů sdružující automobilky Daihatsu, Honda, Isuzu, Mazda, Mitsubishi, Nissan, Subaru, Suzuki a Toyota) a KAMA (Korejská asociace

výrobců automobilů sdružující výrobce Daewoo, Hyundai, Kia a Ssangyong). Tyto asociace pokrývají celkově 90 % celkového objemu prodaných nových osobních automobilů na území Evropské Unie. [10]

Na základě dohody IP/98/734 [10], která byla těmito asociacemi v březnu roku 1998 podepsána, byl stanoven úkol splnit snížení níže uvedených hodnot vyprodukovaného oxidu uhličitého na jeden ujetý kilometr. Graf. 1. Popisuje charakteristiku poklesu požadovaných hodnot CO₂ v závislosti na roku výroby vozidla.

- snížení emisí CO₂ z hodnoty 186 g CO₂/km na hodnotu 140 g CO₂/km, s cílem splnění do roku 2008, kdy by tato změna znamenala snížení hodnoty o 25 %.[9]
- nezbytné snížení emisí CO₂ na maximální hodnotu 170 g CO₂/km do roku 2003;
- rozšíření dohody o cíl snížení emisí CO₂ na hodnotu 130 g CO₂/km s cílem splnění do roku 2015 – tato hodnota je povinná pro všechny výrobce vozidel; v současné době je hodnota 130 g CO₂/km platná. [9], [10]
- hodnota emisí 95 g CO₂/km je stanovena jako cíl pro rok 2020, kdy v tomto roce mělo být vyrobeno 95 % vozidel splňujících tuto hodnotu, v roce 2021 ji mělo splňovat každé nově vyrobené auto. [9], [10]

Cíle snížení emisí CO₂ [g/km], nejsou jediné, co stanovuje standardizace EURO. Z důvodu motivace a také nátlaku na automobilky a koncerny jsou stanoveny finanční sankce pro výrobce, které zadané cíle nesplní. Finanční zátěž těchto trestů byla rozdělena na dvě období, a to na dobu od roku 2012 do roku 2018 a na dobu od roku 2019.

Pokud výrobce za dané období překročí průměrnou hodnotu specifické emise CO₂, bude mu evropskou komisí uložen poplatek za překročení emisí. Poplatek za překročení emisí se vypočítá pomocí níže uvedených vzorců, uvedených v evropské směrnici 443/2009[20]:22. [9], [10], [11]

a) Období od roku 2012 do roku 2018:

- Pokud průměrné specifické emise CO₂ výrobce překračují cíl pro specifické emise o více než 3 g CO₂/km, bude poplatek vypočítán:

$$95 \text{ EUR/g CO}_2/\text{km} \times \text{počet nových osobních automobilů} \quad (1.1)$$

- Pokud průměrné specifické emise CO₂ výrobce překračují cíl pro specifické emise o více než 2 g CO₂/km, avšak nejvýše o 3 g CO₂/km, bude poplatek vypočítán:

$$25 \text{ EUR/g CO}_2/\text{km} \times \text{počet nových osobních automobilů} \quad (1.2)$$

- Pokud průměrné specifické emise CO₂ výrobce překračují cíl pro specifické emise o více než 1 g CO₂/km, avšak nejvýše o 2 g CO₂/km, bude poplatek vypočítán:

$$15 \text{ EUR/g CO}_2/\text{km} \times \text{počet nových osobních automobilů} \quad (1.3)$$

- Pokud průměrné specifické emise CO₂ výrobce nepřekračují cíl pro specifické emise o více než 1 g CO₂/km, bude poplatek vypočítán:

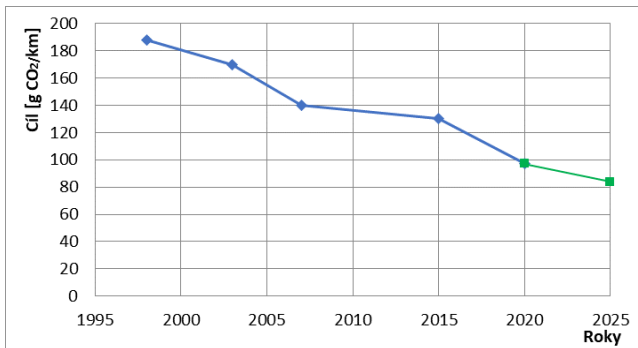
$$5 \text{ EUR/g CO}_2/\text{km} \times \text{počet nových osobních automobilů} \quad [11], [12] \quad (1.4)$$

b) Období od roku 2019:

$$95 \text{ EUR/g CO}_2/\text{km} \times \text{počet nových osobních automobilů} \quad (1.5)$$

Na základě nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 443/2009 ze dne 23. dubna 2009, kterým se stanoví výkonnostní emisní normy pro nové osobní automobily se pojmem „překročení emisí“ rozumí

kladný počet gramů na kilometr, o které průměrné specifické emise výrobce překročily jeho cíl pro specifické emise v daném kalendářním roce, zaokrouhlený na tři desetinná místa a pojmem „počet nových osobních automobilů“ se rozumí počet nových osobních automobilů, jichž je konkrétní společnost výrobcem a jež byly zaregistrovány v daném roce. [11], [12], [14]



Graf 1: Hodnoty snížení emisí CO₂ stanovené dohodou ACEA, včetně budoucích prognóz. [9]

Výpočet vycházející z nařízení EU č. 443/2009

Výsledkem tohoto výpočtu je hodnota, tvořící maximální přípustnou hranici hodnoty cíle průměrné emise CO₂ [g/km], kterou může nově vyrobené vozidlo produkovat. Jedná se o hodnotu přímé emise, jak popisuje předchozí kapitola. Tato hodnota je každoročně stanovena a upravována samotným výrobcem vozidla, základem pro její výpočet je hmotnost daného automobilu. [9, 14]

$$\text{Emise CO}_2 = T + a \times (M - M_0) \quad (1.6)$$

Kde

Emise CO₂ je celková výsledná hodnota vyprodukovaného CO₂ [g] na 1 [km]

T – CO₂ cílová hodnota emisí na jeden kilometr [g]

T = 130 g/km od roku 2012 do roku 2019

T = 95 g/km od roku 2020

a – koeficient [-]

$a = 0,0457$ od roku 2012 do roku 2019

$a = 0,0333$ od roku 2020;

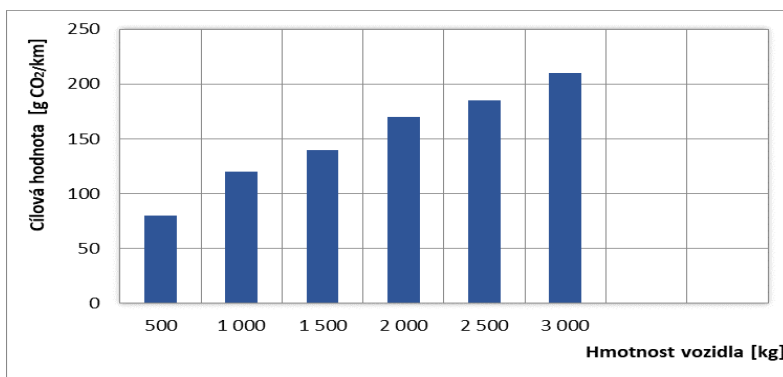
M – hmotnost vozidla [kg]

M_0 – průměrná hmotnost vozidla [kg]

$M_0 = 1372$ kg pro kalendářní roky 2012-2015.

$M_0 = 1392,4$ kg pro roky 2016-2019.

Hodnota průměrné hmotnosti vozidla M_0 je stanovena vždy jednou za tři roky a udává hodnotu průměrné hmotnosti nově vyrobených osobních automobilů za poslední tři kalendářní roky. Výpočet hodnoty emisí CO_2 [g/km] je v tomto případě vhodný pouze pro získání informativní maximální hodnoty produkovaného množství CO_2 , na základě hmotnosti. V případě vozidel o hmotnosti nižší, než je hmotnost průměrná, by byla cílová hodnota CO_2 [g/km] nižší. [9, 13]



Graf 2: Hodnota emisí vycházející z nařízení Evropské Unie č. 443/2009 [9]

Ekonomický význam tribologie

Z obecného ekonomického pohledu je možné tribologii považovat za jeden z nejdůležitějších směrů aktuálního vědecko-technického vývoje viz. zelená tribologie. [5] Vzhledem k tomu, že podmínky tření a opotřebení strojů, nástrojů a celých zařízení úzce souvisejí s jejich životností, je nutno

je stále zlepšovat a dbát na dodržování vhodných tribologických podmínek, a to od návrhu, přes konstrukci, výrobu, montáž až po samotnou údržbu stroje. Tření má nejen vliv na spotřebu energie, ale při opotřebením dochází k poškození materiálu, a danou komponentu je nutné zrenovovat či nahradit novou. Všechny tyto následné činnosti jsou energeticky náročné a zároveň vytváří vysoké nároky na spotřebu lidské práce. K poškozením a ztrátám dochází též při nedodržování tribologických zásad při provozu a údržbě.

Zásadní příčiny selhání funkčních dvojic z tribologického hlediska, jsou především:

- nevhodná volba materiálu funkční dvojice,
- nesprávné konstrukční řešení,
- nesprávný způsob mazání a nevhodná volba maziva,
- opomenutí vlivu okolí (znečištění, prach, teplota, atd.).

Cílem tribologie je tedy zabránit poškození povrchu a snížit ztráty a škody způsobené vlivem tření, respektive nevhodným řešením a provozem [5, 7]

Stále větší požadavky na efektivitu, produktivitu a ekologii technických procesů je dán též tím, že se stále vyvíjejí složitější a náročnější produkty s vyššími, kterým je z hlediska tribologie nutno věnovat větší pozornost splnění těchto požadavků.

S vyššími rychlostmi, větším zatížením, teplotou i s vyššími tlaky vstupuje do popředí použití tuhých a plyných maziv, stejně tak jako vytváření nových funkčních povrchových vrstev, které splňují lepší požadavky na životnost a odolnost proti opotřebením. Proto se v oboru tribologie mimo jiné vyvinula celá řada samostatných odvětví zkoumající podrobně využití poznatků o této problematice. [14], [15].

Výše uvedený vztah popisuje efektivní účinnost jako součin dílčích účinností. Jak uvádí zdroj [17], pro naftové motory nabývá hodnot 0,4 to je ve skutečnosti 40 % a u pohonných jednotek zážehového typu 25 %. Tyto hodnoty lze zvýšit pomocí přeplňování u naftových motorů až na 47 %. [21]

Snižování spotřeby energie omezením pasivních odporů

Podstatné zlepšení účinnosti vozidel má potenciál drasticky zvýšit ekonomickou, energetickou a ekologickou bezpečnost. Silniční vozidla představují téměř 60 procent celkové spotřeby ropy v Evropě a více než čtvrtinu emisí skleníkových plynů na planetě, což je hlavní přispěvatel ke změně klimatu. [13]

Evropská unie podporuje výzkum s cílem výrazně zlepšit účinnost paliva a snížit emise produkované lehkými i těžkými vozidly. Podporuje také organizace FuelEconomy.gov, který spotřebitelům poskytuje informace o spotřebě paliva všech vozidel až do roku 1984 a také tipy, jak řidičům pomoci ušetřit peníze a palivo. Technologie zaměřující se na omezení spotřeby energie a paliva by měli napomoci dosáhnout požadovaných parametrů pro udržení stavu ekologie ve světě. Z pohledu ekonomiky mají potenciál ušetřit spotřebitelům a podnikům biliony euro. [16], [17]

Snižování tření

Snižování tření a splnění potřebných tribologických parametrů automobilů, respektive spalovacích motorů jako stávajících pohonů je obtížné a to hlavně z hlediska konstrukční vyspělosti ale i důvodů neustálých výkonových inovací a tzv. downsizingu (snižování zdvihového objemu motoru). Zmenšování zdvihového objemu motoru, snižování počtu válců v kombinaci s přeplňováním, pro dosažení stále vyššího tzv. litrového výkonu. Tento trend je produktem vývojových tendencí poslední doby v souvislostech s již zmiňovaným omezením hodnot emisí a spotřeby energie.

Hlavní myšlenkou tzv. downsizingu není pouze zvyšování výkonů, ale jak už sám název napovídá, je zde zásadní především snižování zdvihového objemu a zástavbových rozměrů motoru. Motory jsou tedy lehčí, menší a k tomu výkonnější a úspornější. Tyto parametry jsou však dosti protichůdné a při pohledu na údaje o objemu a výkonu motoru až nereálně vyhlížející. Výkony, kterými tyto motory disponují, lze získat pouze za použití turbodmychadel, kompresorů, přímého vstřikování paliva, proměnného časování ventilů a jiných konstrukčních vývojových změn, které zvyšují účinnost motoru.[33]

Lze tedy konstatovat, že se zmenšujícími se objemy motorů se také zmenšují součásti, ze kterých se samotný motor skládá. Pro tuto problematiku

je pak zásadní, že tento fakt má vliv na zmenšující se stykové plochy jednotlivých komponent. Lze použít základní vztah (10), pro výpočet tlaku ve funkčních (kontaktních) dvojicích, z něhož je více než jasné, že vlivem těchto změn se tento tlak p_k stále zvyšuje. [21, 27]

$$p_k = \frac{F_k}{S_s} \text{ [MPa]} \quad (1.14)$$

Kde:

F_k [N] síla působící v místě kontaktu,

S_s [mm²] styková plocha funkčních dvojic.

Současná metodika snižování pasivních odporů

Hlavní nevýhodou zvýšení kontaktních tlaků, je nárůst doby, během které se povrchy nestýkají v režimu hydrodynamického mazání. V literatuře [9] se uvádí, že ložiska, která pracují 20% pracovního cyklu v režimu mezního tření, lze ještě považovat za provozně spolehlivá. U moderních motorů je však sklon k vytváření mezního tření u kluzných ložisek mnohem větší a tudíž se doba, během které není realizováno hydrodynamického mazání, citelně prodlužuje. Tento handicap motorů podléhajících fenoménu downsizingu, se v dnešní době vyrovnává zejména volbou kvalitnějších materiálů, nebo nových progresivních povrchových úprav. Ty pak velkou měrou přispívají k vytvoření a prodloužení intervalu hydrodynamického mazání, nebo zmenšují ztráty během doby, kdy dochází k meznímu tření. Pro komponenty typu vačkového hřídele, zdvihátek, pístních kroužků nebo pístních čepů nachází své uplatnění povlak DLC (Diamond like carbon). [28]

Na čepy klikového hřídele, pístní kroužky, nebo stěny válců je zase preferována technologie s názvem LST. Nano-kompozitové povlaky nacházejí své uplatnění zejména na pístních kroužcích. Uplatnění povlaků na bázi termoplastů UHMW-PE lze očekávat na kluzných ložiscích, kde nebude třeba dodávat mazivo, nebo na pánvích kluzných hydrodynamického mazání (HD) ložisek. Zde by při aplikaci této technologie bylo umožněno opět snížení ztrát během doby, kdy kluzné ložisko nepracuje v režimu HD mazání.

Tato progresivní řešení jsou přiblížena ve věnované typům a specifikaci mazání. [23], [24]

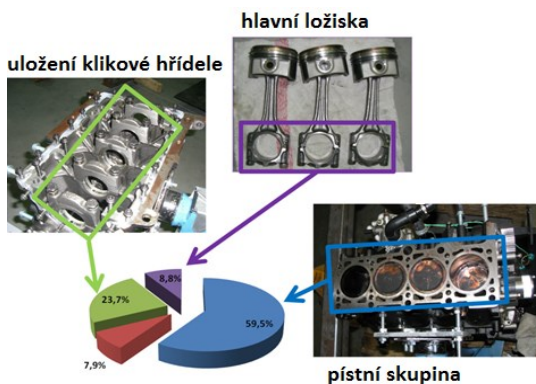
Zásadní důležitost snižování pasivních odporů spočívá ve vysoké kvalitě (velmi nízké drsnosti) povrchů funkčních dvojic a udržení tohoto stavu co možná po celou dobu plánované životnosti, případně tuto životnost ještě značně prodloužit.

Původní dokončovací technologie- broušení, honování, fosfátování i některé další již nestačí zásadně přispět ke zvyšování potřebné kvality povrchů případně k jejímu udržování či obnově na původní parametry. Jedním ze způsobů tohoto nového způsobu „dokončení“ a zajištění vyšší kvality povrchů za provozu motorů a převodovek přispívají prostředky a technologie SVS. [46] Tato technologie je založená na aditivace mazacího oleje, pomocí přípravku, který se smísí s olejem a vytváří tak výkonově pokročilé mazací medium. Díky reakci přípravku s funkčním povrchem na působení vysokých tlaků a teplot vzniká na kontaktní ploše funkční dvojice vrstva kovokeramiky, která chrání funkční člen pře opotřebením a vykazuje velmi nízké hodnoty koeficientu tření.

Důvody a principy omezování pasivních odporů

Jak již bylo zmíněno další vývoj spalovacích motorů je silně ovlivněn jejich účinností a hlavně ekologicko-emisními předpisy. Stále přísnější omezování legislativy a provozních předpisů parametrů motorů, má vliv na vyšší výkon motorů, na průběh krouticího momentu, či ke zvyšování teploty a tlaků ve spalovacích prostorech válců. Tyto příčiny mají různé formy následků, ale jedním z největších je tření a opotřebením součástí. Motor je kombinace mnoha konstrukčních uspořádání respektive funkčních dvojic, kde dochází k hraničním hodnotám tření, které ovlivňují nepříznivě životnost. K nejvíce namáhaným funkčním dvojicím patří třecí uzel píst/pístní kroužek/stěna válce. Většina třecích uzlů je namáhána v oblasti mezního tření. Mechanické ztráty v pístových spalovacích motorech se pohybují okolo 20%. Když tuto hodnotu aproximujeme v poměru k celkové účinnosti spalovacích motorů, která se pohybuje na hodnotě přibližně 35% u benzinových motorů a 40% u naftových, je jasné jak je nezbytné snižovat pasivní odpory. [16]

Z následujícího obrázku 1, je patrné rozdělení třecích ztrát v motorech. Každý motor má sice tyto hodnoty trochu odlišné, ale minimálně poměrové rozdělení ztrát je podobné. Když se zaměříme na skupinové rozdělení celkových ztrát třením, tak asi 50% připadá na ztráty mezi pístem a válcem, ze kterých je 70-80% způsobeno třením pístních kroužků s funkční plochou válce. [30] Tyto hodnoty jsou následkem zředění maziva v oblasti spalovacího prostoru reakcí s pohonnými hmotami a vlivem teploty. S ohledem na náročné podmínky v oblasti spalovacího prostoru se proto vývoj snižování třecích ztrát orientuje právě na tuto část. [17], [18]



Obr. 1: Schematické rozložení třecích ztrát v motoru [17]

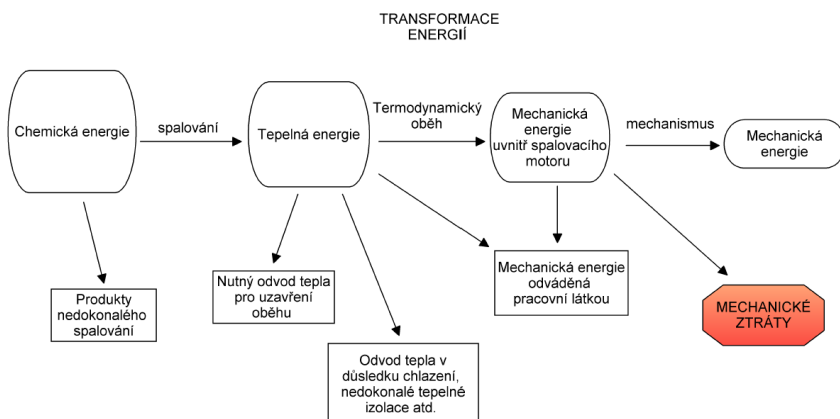
Třecí ztráty jsou přímým důsledkem tření na všech funkčních dvojic, respektive plochách pohybujících se součástí.

Tyto dvojice se nacházejí v oblastech, kde dochází ke vzájemné interakci jejich povrchu zejména u těchto součástí [18]:

- pístních kroužků a vložek válců,
- vačkového hřídele a vahadel,
- pláště pístů a vložek válců,
- malého ojnicního oka a pístního čepu,
- velkého ojnicního oka a klikového hřídele,
- kluzných ložisek a klikového hřídele,

- palivová a vstřikovací čerpadla,
- olejová a vodní čerpadla,
- v převodech rozvodů,
- u vačkových hřídelů,
- v alternátorech a generátorech.
- u dříků ventilů,
- u turbodmychadel, ventilátorů apod.

Transformace energií ve spalovacím motoru je schématicky zobrazena na obrázku 2.



Obr. 2: Energie a její transformace ve spalovacím motoru

Oblasti použití povrchů s nízkým koeficientem tření

Nejnáročnější oblastí automobilového motoru je oblast spalovacího prostoru. Hlavní částí jsou píst, pístní čep, pístní kroužky a stěna válce. Jak je již výše zmíněno, hlavní opotřebení a ztráty třením jsou mezi pístním kroužkem a stěnou válce. Na části pracující ve spalovacím prostoru nejsou kladeny konstantní účinky, neboť se zde mění teplota, tlak a mazací podmínky [18]. Z tohoto vyplývá, že pístní kroužky, musí být dimenzovány na vysokou únavovou životnost a očekává se od nich tepelná stálost. K neškodlivějším vlivům patří sloučeniny dusíku, jejichž výskyt je závislý na teplotě hoření a klesá s klesající teplotou.

Mají negativní vliv na celkové opotřebení motoru, zejména ale válců, pístních kroužků, ložisek a ventilových rozvodů. Vlivem recyklace spalin se do motoru dostávají částice uhlíku, které jsou relativně značných rozměrů v průměru cca 0,2 μm . [19, 20]

Uvážíme-li, že tloušťka mazacího filmu je 0,025 μm a menší, nastává zde závažný problém. Tyto částice působí jako brusná zrna a přes mazací oběh jsou roznášeny do všech mazaných uzlů motoru. [25]

Technologie funkčních úprav povrchu

Technologií povrchových úprav v automobilovém průmyslu tvoří široké spektrum speciálních technologií, které jsou produktem aktuálního vývoje v této oblasti s tribologickými aplikacemi. Ale protože těchto technologií je velké spektrum následně jsou uvedeny jen vybrané a inovační typy úprav povrchu.

Keramické povlaky

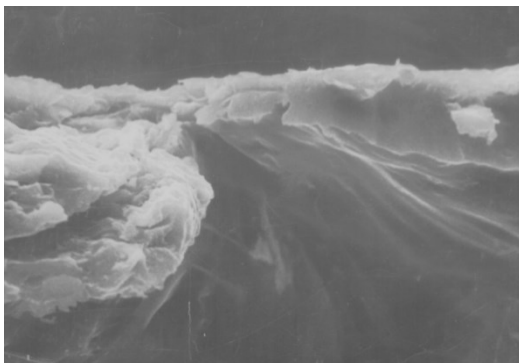
Po posouzení mnoha zdrojů lze konstatovat, že z pohledu zvyšování životnosti a snižování třecích ztrát se jedná nejčastěji o keramické materiály, neboť tyto aplikační technologie zaručují dobrou tepelnou izolaci. Tento typ materiálů je nanášen, na povrch pomocí plazmového paprsku. Při použití této technologie je dosahováno tvrdého povrchu s řízenou pórovitostí. Problém keramických materiálů spočívají nejčastěji ve špatné tepelné vodivosti. Při aplikaci ve spalovacím prostoru přezpívají tyto povlaky k lepšímu spalování paliva a tím snižování emisních produktů.[22],[38]

Kluzné laky

Kluznými laky, jsou suché vrstvy laku s vynikajícími mazacími vlastnostmi. Jsou používány především pro extrémně namáhané funkční dvojice a spoje. Vybraná tuhá maziva v kombinaci s pojivovými systémy jsou výchozími body každého kluzného laku. Prostřednictvím pečlivé aplikace se tyto kluzné laky stanou systémem kluzného laku s dobrými kluznými a protiotěrovými vlastnostmi. Systém kluzného laku je nutné brát v úvahu vždy ve spojení s aplikační technologií. Optimálních a především konstantních vztahů lze dosáhnout odzkoušením na konkrétní materiál a podmínky nasazení povlakované součásti. Prostřednictvím kvalitní

mechanické a chemické předúpravy povrchu bude dosaženo požadovanou přilnavostí mezi materiálem a kluzným lakem. Na takto držící vrstvě bude kluzný lak dlouhodobě ukotven do povrchové struktury materiálu. [28]

Systémy kluzného laku jsou z důvodu vysokého podílu tuhých maziv a z důvodu dobré vlastnosti ulpívat na povrchu součástek vhodné pro ta nejvyšší zatížení v oblastech mezního a přechodového tření. Tuhá maziva zabudovaná (navázaná) v systému kluzného laku (siričik molybdeničitý, grafit, PTFE a kombinace těchto látek, při záběhových procesech převezmou od funkčních dvojic nastupující špičková zatížení (náběhové špičky). Tímto je jinak abrazivní působení špiček drsnosti povrchu jednoduše změněno na přetvoření (tečení materiálu). Prostřednictvím tohoto procesu dojde k vytvoření stejnoměrného a hladkého povrchu a především počáteční specifické plošné tlaky jsou tak zřetelně redukovány. [28]



Obr. 3: Zvětšený pohled (10 000krát) na kluzný lak zakotvený v základ. materiálu. [35]

Diamantové povlaky DLC

V poslední době je použití diamantu v autopřemyslu je stále častější, a to hlavně na základě jeho funkčních vlastností [29]. Diamant disponuje funkčními vlastnostmi, z pohledu tribologie zásadně mechanickými a tepelnými. Povlaky či vrstvy obohacené diamantem vykazují vysokou tvrdost a odolnost proti oteru [25]. Díky vývoji povlaků a vrstev na bázi

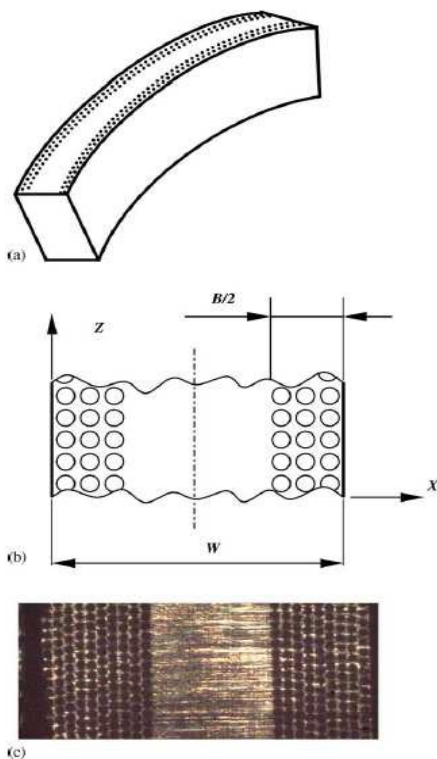
diamantu vznikly povlaky typu DLC (diamond like carbon), především pro využití v tribologických aplikacích. Tyto povlaky odolávají vysokým kontaktním tlakům, a díky vysoké teplotě tavení je eliminován vznik mikrosvarů a tudíž zadírání povrchů. Při provedení erozního testu diamantového povlaku [24] bylo dokázáno, že s rostoucí tloušťkou tohoto typu povlaků klesá jeho životnost.

Laser structure texture

Jedná se o laserem vytvořené mikrodůlky na povrchu. Tato technologie se testovala pro použití na pístních kroužcích, pístních čepech a stěnách válce. Základním principem této metody je možnost zanesení oleje do mikrodůlek, jejichž hloubka se pohybuje okolo 5 až 6 μm . Experimentálně byl získán nejvhodnější poměr mezi průměrem a hloubkou mikrodůlek. Mazivo usazené v takto upraveném povrchu mělo, poskytnou dostatečnou ochranu navzájem se pohybujících součástí. [24],[26]

Při použití metody technologie LST na pístní kroužky (ve většině případů pouze na první tzv. stírací kroužek) nedojde k tak radikálnímu setření oleje ze stěny válce. Vývoj této metody je nyní ve stádiu testování. V literatuře [29] provedli zkoušku, kdy porovnávali účinnost LST upravených kroužků, oproti neupraveným kroužkům. Jako referenční kroužek byl použit soudečkový kroužek a byl porovnán se soudečkovým kroužkem s plným a částečným texturováním s velmi dobrými výsledky. [20,21,22]

System částečného LST je zobrazen na obrázku 4, jenž pochází z článku [36]. Průměrný součinitel tření závisí na rozdílném normálovém zatížení pro různé čepy, neboť soudečkově tvarované kroužky poskytují dobrý hydrodynamický efekt. [26], [27]



Obr. 4: Pístní kroužek upravený technologií LST: (a) prostorový pohled na kroužek, (b) schematické zobrazení sítě LST, (c) fotografie částečného LST [27]

Gehring Laser honing

V podstatě se jedná o využití principu technologie LST popsanou v odborné literatuře[35] aplikovanou na funkční plochy válců spalovacího motoru. Ke snížení třecích ztrát a opotřebení dochází pomocí kombinace vyhlazování povrchu a laserového strukturování. Jedná se o technologii, která je schopna přinést poměrně skvělé výsledky. Tato technologie vyvinutá

firmou Gehring se stála již u některých automobilek standardem na litinových blocích válců a vložkách. Jelikož tato firma vyrábí honovací stroje a tak má mnohaleté zkušenosti s dokončováním kvality povrchu. [35]

1.2 Omezení rizik šroubových spojů

Problematika je velmi důležitá a závažná i ve zcela samostatné technické oblasti spojování, a to především u šroubových spojů. Výběr vhodného a především bezpečného spoje pro potřebné aplikace ve strojírenství a v automobilovém průmyslu závisí na jeho funkci, montáži, způsobu zatížení a požadavcích na pevnosti spojení. Spoj dále musí být navržen tak, aby bezpečně zvládl potřebné aplikační parametry a hlavně provozní zatížení. [38] S ohledem na automobilový průmysl je nutné zohlednit vysokou míru automatizace. Proto je důležité, aby šroubový spoj byl vždy funkční a při jeho montáži bylo možné zaručit všechny potřebné parametry, především bezpečnost spoje. [42]

Montáž – spojování se provádí nejčastěji roboticky, nebo lidská obsluha, která používá automatický utahovací nástroj, který je nastaven na utahovací moment. [44] Zaručit potřebné parametry předepnutí šroubového spoje lze, jen pokud známe závislost utahovacího momentu na osově síle. Tato síla a předepnutí je závislé na hodnotách koeficientu tření v závitě a plochách styku matice či hlavy šroubu se spojovaným materiálem nebo součástíou. [42], [45] Proto je zásadní znát vždy potřebné, ale i skutečné hodnoty koeficientu tření.

1.3 Zvyšování výkonu třecích uzlů

Stále stoupající nároky na požadavky na výkon třecích uzlů především u brzd a spojek nejrůznějších strojních zařízení a dopravních prostředků vyvolaly potřebu podstatného zdokonalování třecích materiálů pro tyto aplikace. Se zvyšujícími se rychlostmi a velikostmi přitlačných sil v uzlech tření přináší v mnohých případech takové zvýšení pracovních a aplikačních teplot vznikajících třením, že jim dnes již doposud používané materiály nemohou odolávat. Dalšími velmi aktuálními parametry jsou, jak uvádí zdroje [6],[13] omezující legislativní omezení environmentálního charakteru.

Ekologické nároky z pohledu produkce emisí a koloidních částic u brzdových a spojkových prvků jsou neustále přísnější. [12] Proto je velký tlak na vývoj třecích materiálů vyráběných technologií práškové metalurgie. Kovokeramické třecí materiály představují v současnosti hlavní spektrum používaných materiálů. Pod toto technické označení zahrnujeme skupinu materiálů, které se vyznačují vysokou a stabilní hodnotou součinitele tření a zároveň zaručují nízké hodnoty otěru za různých pracovních podmínek. [46]

Dříve používané materiály na výrobu brzdových obložení s obsahem azbestu do aut a jiných dopravních prostředků byly, z ekologických důvodů postupně omezeny, jak uvádí zdroj. [51], [52] Na základě rozhodnutí Evropské komise v roce 1991 (Směrnice komise 659. EC 1991), [47] o postupném odstranění veškerého využití azbestu a úplném v následujících letech o úplném zákazu všech jeho typů, tedy o postupu, který několik členských zemí přijalo již dříve, nezávisle na Evropské unii viz. Směrnice komise 77. EEC. ze dne 26. července 1999 uváděná ve zdroji [48]

Vzhledem k tomuto zásahu má mnoho nových frikčních materiálů (bez azbestu) značně zhoršené fyzikální technické charakteristiky a to i navzdory vysokým výrobním nákladům. Frikční materiály na bázi náhražkových vláken způsobují problémy především u typů vozidel s vysokou hmotností. Kupříkladu u brzd těžkých nákladních automobilů. [50]

1.4 Shrnutí teoretické a rešeršní části práce.

Shromážděné informace, spolu s rešeršním pohledem na řešenou problematiku, popisuje aktuální stav poznání v této oblasti s odvoláním na důležité zdroje. Vymezuje oblasti s dosud omezenými znalostmi, ale i se specifickým řešením, a zároveň uvádí teoretické základy tribologie i povrchových úprav. Na základě studia odborných zdrojů [10], [11], [13], zaměřených na legislativní změny a požadavky blízké budoucnosti v oblasti omezení produkce emisí u spalovacích motorů a poznání nových technologií povrchových úprav, jeví se několik možností snižování hodnot CO₂, jako sekundární odezva na snížení tření. Vzhledem k těmto informacím vznikla myšlenka, kterou podporuje zdroj [53], [55], [59], že lze najít snížení

pasivních odporů spalovacích motorů pomocí vhodných netradičních aditiv. Na základě těchto potřeb byl vymezen první hlavní cíl této práce:

Snížení emisí CO₂ spalovacích motorů cestou snížení pasivních odporů.

Literární prameny [35], [36], [37] se vymezují především ke vlivu koeficientů tření na přepínací osovou sílu ve šroubovém spoji z čehož lze čerpat při řešení problému snížení rizik, především při jejich robotické montáži v automobilovém průmyslu. Zdroj [43] upozorňuje na pozitivní ovlivnění tření ve šroubovém spoji pomocí kluzných laků, další z řady zdrojů [45], [46], [47] uvádějí faktory ovlivňující bezpečnost a funkčnost šroubového spoje. Dle prostudovaných zdrojů není zatím stanovena metodika pro testování koeficientů tření u šroubových spojů. Proto byl stanoven, na základě potřeb technické veřejnosti, druhý cíl této práce:

Omezení rizik selhání šroubových spojů stanovením přesných hodnot jejich koeficientů tření.

Velmi důležitou oblastí v oblasti automobilového průmyslu, dlouhodobě příliš neřešenou, je oblast tření při zvyšování výkonů třecích uzlů brzd. V této oblasti je poměrně málo odborných informací. Touto problematikou se zabývají především zdroje [51], [52] a to především vzhledem k nutným změnám složení třecích materiálů, vzhledem k omezování použití některých jejich složek. Z pohledu potřeb zvyšování výkonů třecích elementů je potřené nalézt vhodnější materiály, které nebudou mít zároveň nevhodné ekologické dopady. Odborné zdroje [44], [46] uvádějí, že brzdy automobilů jsou zatím daleko větším producentem škodlivin, než představují emisní produkty spalovacích motorů. Tento zdroj emisí bude narůstat i s povozem automobilů s alternativními pohony, i s rozvojem letecké a železniční dopravy. Touto problematikou se proto zabývá třetí hlavní cíl této práce z oblasti automobilového průmyslu:

Zvýšení výkonů třecích uzlů brzdových systémů přesným určením parametrů tření ekologických frikčních materiálů.

2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Vzhledem k zaměření vědecko-výzkumné činnosti Ústavu strojírenské technologie též na problematiku tribologie, ale i vzhledem k aktuálnímu značnému zájmu technické veřejnosti o spolupráci v těchto oblastech strojírenství, především v automobilovém průmyslu, byly během mého doktorandského studia hlavní cíle této práce stanoveny takto:

1. Snížení pasivních odporů a emisí CO₂ spalovacích motorů netradičními způsoby na principu kompozitních nanočástic v mazivech.
2. Omezení rizik selhání šroubových spojů stanovením přesných hodnot koeficientů tření a jejich vlivu na předepnutí šroubu.
3. Zvýšení výkonů brzdových systémů optimalizací složení materiálů funkčních třecích ploch na základě přesně zjištěných tribologických parametrů jejich povrchů.

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Představení nejdůležitějších experimentů provedených ke splnění cílů práce, které se opírají o řadu prováděných měření a závěrů prací řešených na ústavu v předchozím období [39], [53], [54], [55].

3.1 SNÍŽENÍ EMISÍ CO₂ SPALOVACÍCH MOTORŮ CESTOU SNÍŽENÍ PASIVNÍCH ODPORŮ A SPOTŘEBY PALIVA

Ke splnění tohoto cíle vedlo zvolení vhodného aditivního prostředku do motorového oleje (technologie SVS), s kterým lze ošetřit povrchu renovovat povrchy funkčních ploch motorů bez jejich demontáže.

U testování výkonových parametrů motorů obecně platí určitá pravidla, a to jak z pohledu věrohodnosti, tak hlavně z pohledu opakovatelnosti. Pro test byl vybrán atmosférický benzínový motor (1,4 MPi, 59 kW), parametry udávané výrobcem popisuje tabulka 4.

Motor byl zakoupen a vymontován z použitého havarovaného automobilu, jehož stav tachometru byl 163 548 km. Pro ověření charakteristik a hodnot emisí CO₂ bylo nutné uskutečnit několik měření. Pro test byl použit běžný olej se specifikací 10W 40. Motor byl zahřát provozem na měřicí stoličce přibližně 1 hod, poté byl vypuštěn obsah olejové náplně, následně došlo k naplnění novým obsahem maziva, motor byl 0,5 hod provozován kvůli zahřátí maziva a ustálení všech parametrů.

Měření emisí probíhalo pomocí dále popsané aparatury BOSCH BEA 950, obsah CO₂ vždy v intervalu 5 hodin provozu. První záznam měření proběhl po 5 hodinách. Celkový čas testu byl 100 hodin. Údaj CO₂ udávaný výrobcem je 173 g / km. Výkonové parametry nebyly předmětem měření, jelikož hlavními parametry pozorování, byla spotřeba paliva a od ní odvislé hodnoty CO₂.

Měřicí zařízení

Následující testování motoru za účelem posouzení možnosti snížení emisí CO₂ a snížení spotřeby paliva bylo zrealizováno díky pomoci ze strany firmy MaxPower. Měření proběhlo na měřicí stolici zn. Dynostar ETB 500, následně jsou uvedeny výstupu z měřicí aparatury. Pomocí ETB 500 lze rychle a efektivně zjišťovat parametry spalovacích motorů.

Motor je upevněn ve stolici spojen přes kardanový hřídel s tlumičem vibrací na retardér integrovaný v tomto standu včetně všech nutných okruhů, jako je chlazení, předeřev atd. [56]

Dynostar Model ETB 500 má integrovaný vzduchem chlazený retardér. Maximální výkon, který může být absorbován, je 275 kW, maximální rychlost otáčení dynamometru je 7000 ot. /min. [56]

Parametry a vlastnosti zařízení:

- Systém pro získávání dat DAS
- Softwarový balíček Dyno
- Junction Box vč. 37pinový kabel (délka 7,5 m)
- 12 pinový kabel (délka 2 m)
- Lineární motor pro ovládání škrtkicí klapky
- Kalibrační závaží
- Dálkové ovládání
- Operativní instrukce
- označení CE
- Univerzální spojovací příruba pro více typů motorů



Obr. 1: Sestava měřicího zařízení, pro zkoušení parametrů motoru [56]

Zařízení pro měření emisí Bosch BEA 950 [P2]

Jedná se o systém pro měření emisí značky BOSCH BEA 950, nabízí všechny možnosti pro rychlé a nákladově efektivní přezkoušení vozidel se zážehovými, vznětovými a plynovými motory.

System zahrnuje moduly:

- BEA 055, měřicí modul 4/5 plynů (CO, CO₂, HC, O₂, NO),
- BEA 070, měřicí modul opacimetru, Bluetooth,
- BEA 030, modul měření otáček, Bluetooth (B+/B-, TN/TD, teplota),
- Diagnostický tester řídicích jednotek KTS 560
- BEA 040, modul měření otáček na vibračně akustickém principu (součástí dodávky u modelů S1 a S2).

Zkušební vzorek

Motor 1.4 MPI, 59 kW, jedná se o atmosférický zážehový benzinový motor.

Tab. 2: Parametry sledovaného motoru udávané výrobcem

Kód výrobce	1,4 MPI
Palivo	benzín
Zdvihový objem	1 390 cm³
Výkon motoru	59 kW (80 PS) @ 5000 ot/min
Točivý moment	132 Nm @ 3800 ot/min
Rozvody	OHC
Válce	4 / Řadový
Počet ventilů	16

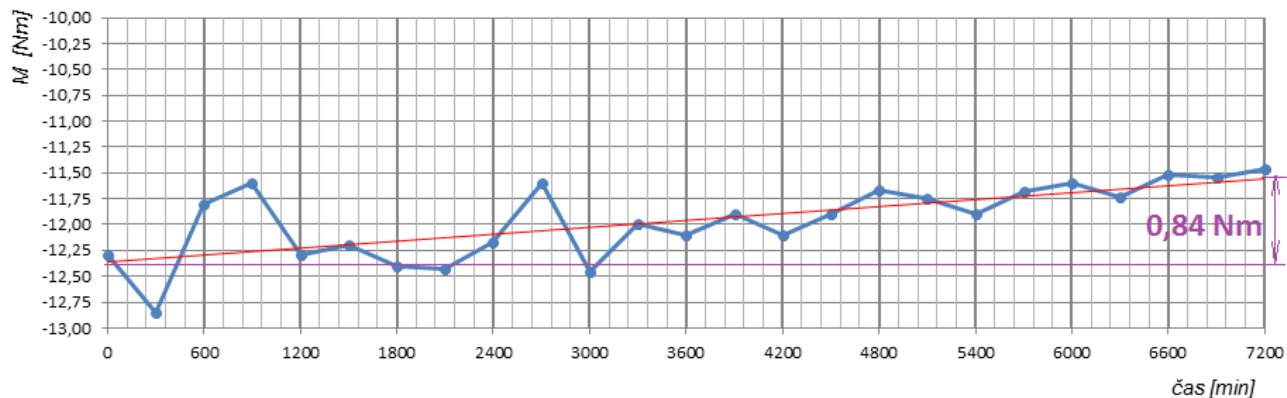
Vliv testovaných aditivních přísad do motorového oleje

V následujících tabulkách 2 až 3 a grafech 3, 4 a 5 jsou shromážděna technická data zjištěná z provedených experimentů, při použití aditivních přísad SVS. Pro lepší přehlednost byly zaznamenávány hodnoty každých 300 minut.

Tab. 3: Naměřené hodnoty hmotné spotřeby paliva při volnoběhu motoru

čas [min]	0	300	600	900	1200	1500	1800	2100	2400	2700	3000	3300	3600
M [Nm]	-12,30	-12,85	-11,80	-11,60	-12,30	-12,20	-12,40	-12,43	-12,17	-11,60	-12,45	-12,00	-12,10
čas [min]	3900	4200	4500	4800	5100	5400	5700	6000	6300	6600	6900	7200	
M [Nm]	-11,90	-12,10	-11,90	-11,67	-11,75	-11,90	-11,68	-11,60	-11,73	-11,52	-11,55	-11,46	

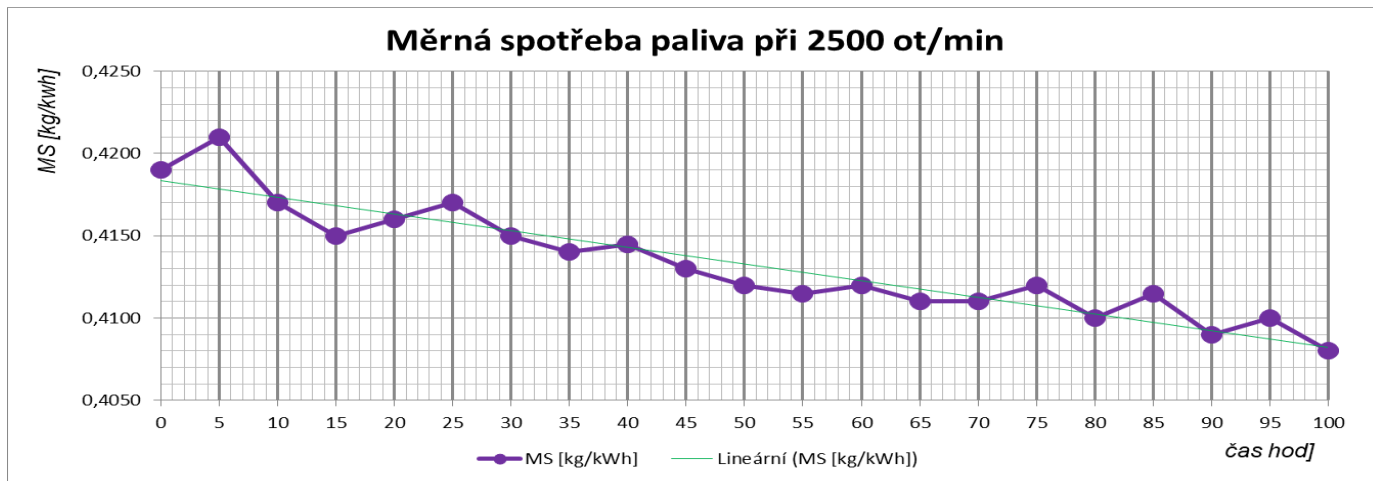
Pasivní odpory motoru při 2000 ot*min⁻¹



Graf 3.: Průběh pasivních odporů v motoru s přípravkem SVS

Tab. 4.: Naměřené hodnoty měrné spotřeby paliva (MS) při 2500 ot/min

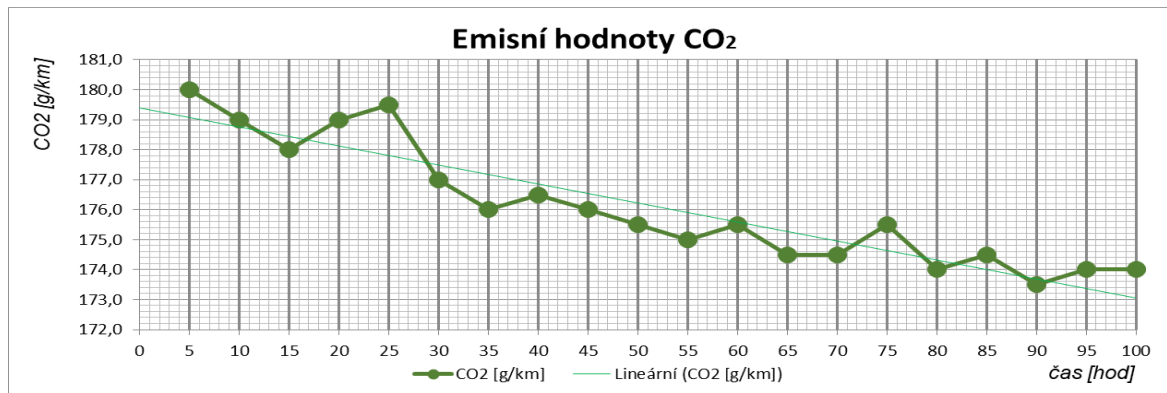
2500 ot/min	čas [hod]																					
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	
MS [kg/kWh]	0,4190	0,4210	0,4170	0,4150	0,4160	0,4170	0,4150	0,4140	0,4145	0,4130	0,4120	0,4115	0,4120	0,4110	0,4110	0,4120	0,4100	0,4115	0,4090	0,4100	0,4080	



Graf 4.: Hmotná spotřeba paliva s přípravkem SVS

Tab. 5: Emisní hodnoty CO₂ v závislosti na čase

CO ₂ [g/km]	čas [hod]																				
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
CO ₂ [g/km]	-	180,0	179,0	178,0	179,0	179,5	177,0	176,0	176,5	176,0	175,5	175,0	175,5	174,5	174,5	175,5	174,0	174,5	173,5	174,0	174,0



Graf 5: Závislost emisí na čase testu, testovaný motor se zkušným aditivem v motorovém oleji 10W 40

Z uvedených grafických závislostí z testování spalovacího motoru aplikací prostředků SVS je patrný pozitivní vliv tohoto postupu na snížení emisí CO₂ cestou renovace třecích ploch, která má vliv na snížení spotřeby paliva. V diskuzi výsledků budou uvedena důležitá zjištění, na nichž závisí úspěšnost aplikací těchto prostředků. Pasivní odpory testovaného motoru, v průběhu času testu klesaly, jak je z naměřených hodnot patrné rozdíl poklesu odporu motoru při protáčení je přibližně 0,84 Nm. Pokles momentu koresponduje jak se snižující se spotřebou paliva (o 0,011 kg/ kWh po 100 hodinách), tak i se snížením emisí CO₂.

Ovlivnění vlastností motorového oleje

Pro představení prováděných experimentů s pozitivními výsledky v oblasti maziv jsou uvedena využitelná poznání, a to i s aplikacemi aditiv na principu nanočástic, který je jedním z nejnovějších směrů tribologie.

Popis měřící metodiky:

Pro měření závislosti koeficientů tření maziva s aditivu s vhodnými nanočásticemi byl zvolen běžný motorový olej 10w 40 a to po jeho zatížení v běžných provozních podmínkách. Tento olej byl použit ve vozidle Mercedes – Benz Sprinter 316 CDI (dodávkový s tonáží do 3,5 t), SPZ 3AR****, který je provozován denně u logistické firmy. Na počátku měření byla do motoru vozu aplikována nová náplň oleje a olejový filtr. Po ujetí 10 000 km byl odebrán vzorek použitého motorového oleje a ten byl přeměřen na tribometru, Tento postup se opakoval po najetých 5000 a 10000 ujetých kilometrech. Následně byl vzorek oleje z posledního najetého intervalu smíchán s aditivem na bázi IF WS₂ (nanočástice s fulereny s woframem a sírou) v poměru 3 % a 5 % aditiva na objem vzorku použitého oleje a také tyto dva upravené vzorky maziva byla podrobena tribologickému testu.

Vstupní parametry vzorků olejů:

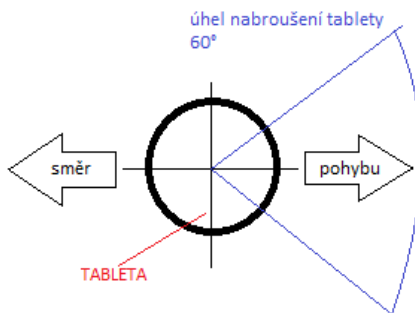
Tab. 6: Mísící poměr oleje s aditivem

Směšovací poměr suspenze IF WS ₂ a oleje		
koncentrace suspenze IF WS ₂	množství oleje cm ³	množství suspenze WS ₂ a oleje cm ³
1%	99	100

Tab. 71: Sílové vstupní parametry tribologického testu

ocejchované závaží [kg]	Normálová síla [N]	Styková plocha [mm ²] tableta/deska	Kontaktní tlak [Mpa] tableta/deska
1,04	10,202	314,159	0,032

Na následujícím obrázku 6 je zobrazen měřicí vzorek (tableta) se způsobem úpravy jeho povrchu. Způsob a směry broušení vzorku respektive jeho úpravy, byly zvoleny z důvodu napodobení profilu funkčních ploch válců motoru – honování.



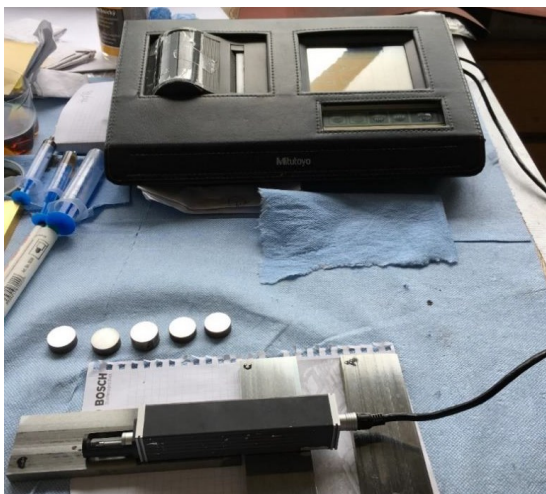
Obr. 2: Schéma nabroušení tablety před měřením



Obr. 3: Popis směrů měření drsnosti

Následně byla každá tableta označena a byly přeměřeny parametry drsnosti podle následujícího schématu, které je vyobrazeno na obrázku 7.

Hodnoty drsnosti byly měřeny ve dvou směrech. První směr je rovnoběžný se směrem pohybu desky vůči tabletě a druhý je na tento směr kolmý. Měření bylo provedeno před i po zkoušce na tribometru TOP 3. K měření drsnosti povrchu byl použit přístroj pro měření drsnosti Mitutoyo SJ-301. Měřeny byly parametry drsnosti Ra a Rz funkčního povrchu jak všech tablet a desek před, tak i po testech.

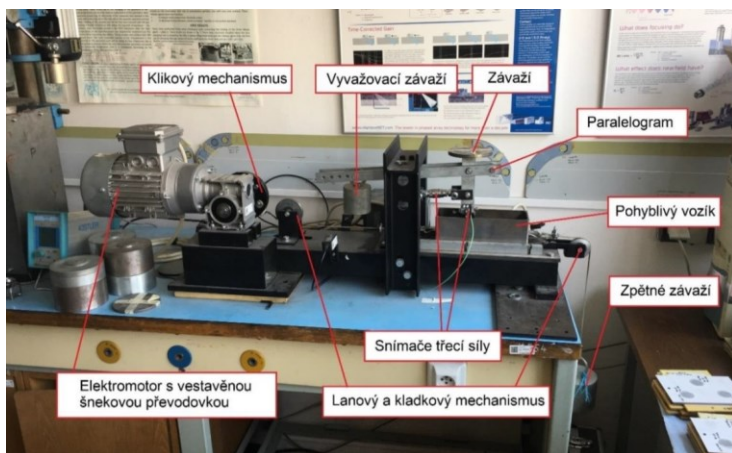


Obr. 8: Pracoviště měření drsnosti tablet a desek

Parametr drsnosti Ra (střední aritmetická úchylka profilu) je aritmetický průměr absolutních hodnot výšky a hloubky profilu v rozsahu základní délky. Tato hodnota nevypovídá zcela přesně o dané drsnosti, protože nereaguje citlivě na extrémní hodnoty výšky a hloubky měřeného profilu.

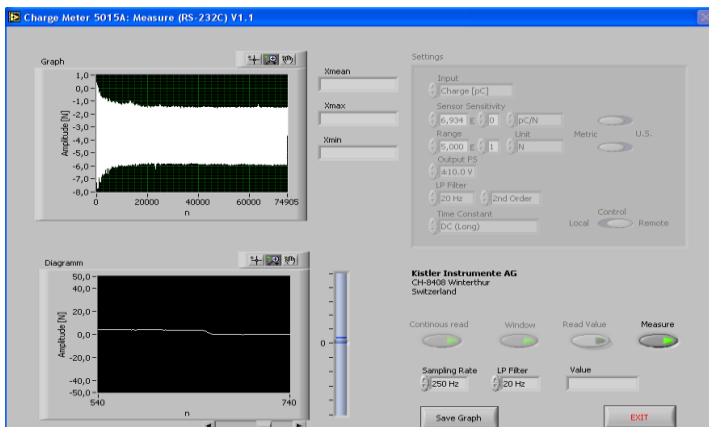
Parametr drsnosti Rz (největší výška profilu) je součet největší výšky a největší hloubky profilu v rozsahu základní délky, tento parametr je závislý i na způsobu dokončovací obráběcí technologii aplikované na zkoumaný povrch.

Následující obr. 9 schématicky popisuje jednotlivé hlavní členy tribometru TOP 3.



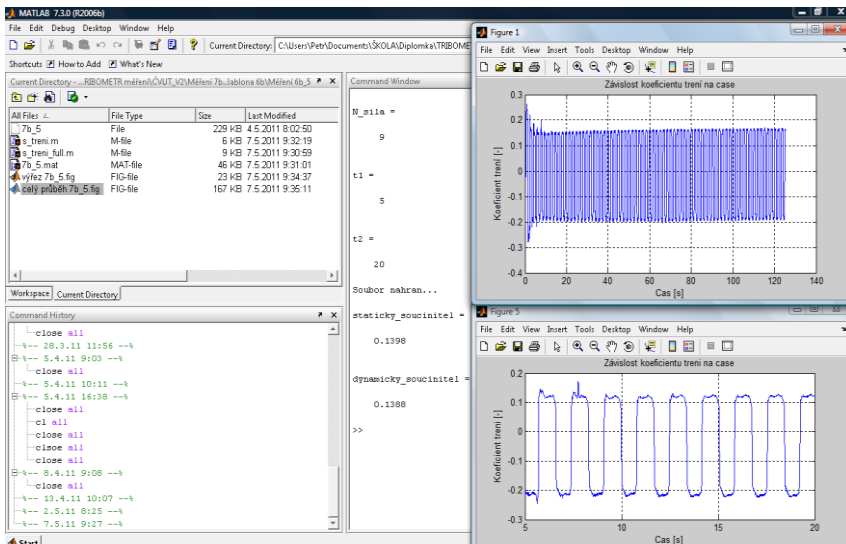
Obr. 9: Schématický popis tribometru TOP 3

Rozlišovací měření probíhalo na tribometru TOP 3 (translačně oscilační pohyb), výhodou tohoto zařízení je, že dokáže zaznamenávat hodnoty jak statického, tak dynamického koeficientu tření funkční dvojice. K tomuto záznamu slouží měřicí a záznamové rozhraní vyobrazené na následujícím obrázku.



Obr. 10: Program Chargemeter 5015A pro záznam měřených dat.

Následně je nutný export naměřených dat do vyhodnocovacího programu vytvořeného v softwaru Matlab. Po nastavení několika základních parametrů, dochází k velmi přesnému vyhodnocování koeficientů tření včetně jejich grafických závislostí. Na obr. 11 je vyobrazeno exemplární vyhodnocení koeficientu tření.



Obr. 11: Vzorové vyhodnocení koeficientu tření a jeho charakteristiky v programu Matlab.

Vliv přípravků s vhodnými nanočásticemi na hodnoty koeficientu tření

Měření koeficientu tření – nový olej 10W40

Tab. 8: Hodnoty koeficientu tření ocel – ocel, použitý olej 15 000km, tableta 60°

Tableta ozn.		Tnoil	Deska ozn.	Dnoil
interval. vyhodnocení koeficientu tření [s]			Statický koeficient tření [-]	Dynamický koeficient tření [-]
Od	Do	Ø hodnota		
0	10	5	0.052	0.049
20	40	30	0.053	0.046
60	80	70	0.068	0.055
100	120	110	0.047	0.039
140	160	150	0.062	0.050
180	200	190	0.045	0.038
220	240	230	0.057	0.049
260	280	270	0.044	0.036
300	320	310	0.062	0.045
340	360	350	0.046	0.037
380	400	390	0.064	0.050
420	440	430	0.047	0.037
460	480	470	0.071	0.051
500	520	510	0.061	0.041
540	560	550	0.068	0.048
580	600	590	0.062	0.043
620	640	630	0.070	0.048
660	680	670	0.060	0.042
700	720	710	0.073	0.049
740	760	750	0.065	0.044
780	800	790	0.072	0.049
820	840	830	0.068	0.044
860	880	870	0.078	0.051
900	920	910	0.077	0.049
Ø hodnota koeficientu tření			0.061	0.045

Tab. 9: Hodnoty koeficientu tření ocel – ocel, použitý olej 15 000km, tableta 60°

Tableta ozn.		Tp011	Deska ozn.	Dpo15	
interval.		vyhodnocení koeficientu tření [s]		Statically koeficient tření [-]]	Dynamický koeficient tření [-]
Od	Do	Pr. hodnota			
0	10	5		0,058	0,055
20	40	30		0,057	0,050
60	80	70		0,070	0,059
100	120	110		0,051	0,041
140	160	150		0,069	0,054
180	200	190		0,050	0,040
220	240	230		0,068	0,052
260	280	270		0,047	0,039
300	320	310		0,067	0,048
340	360	350		0,051	0,040
380	400	390		0,070	0,054
420	440	430		0,053	0,040
460	480	470		0,077	0,054

3.2 TRIBOLOGIE ŠROUBOVÝCH SPOJŮ

V následující části je pozornost věnovaná kromě testování tribologických parametrů maziv v oblasti šroubových spojů, především návrhu a realizaci zařízení pro měření závislosti osového optimálního předepnutí šroubového spoje na koeficientech tření v závitě, pod hlavou šroubu nebo pod maticí.

Testování koeficientů tření – maziva

Pro porovnání a ověření vlivu maziva na velikost osového předpětí bylo nutné určit základních hodnoty koeficientů tření. Vybrané typy maziva byly podrobeny testu na tribometru. Zatížení bylo zvoleno a vytvořeno pomocí ocelového závaží 2 kg, funkční dvojice ocelová deska – tableta, délka testu 5 minut. Každou minutu byla aplikována 2 ml dávka maziva. Následující obrázek zobrazuje průběh zkoušky.

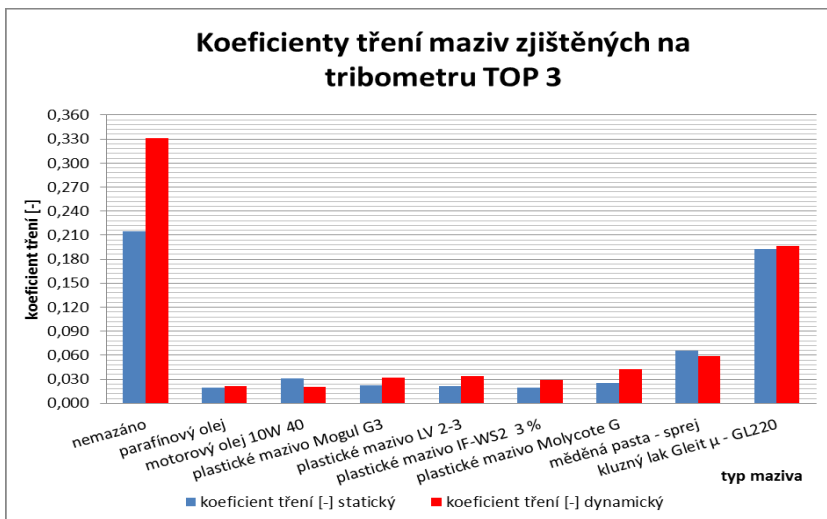


Obr. 12: Detailní pohled na tribometr TOP 3 – měření koeficientů tření různých maziv

Následující tabulka shrnuje hodnoty zjištěných koeficientů tření, které vykazovala testovaná maziva. Test zahrnuje i záznam a vyhodnocení dynamického koeficientu tření, jehož hodnota je u maziv zásadní.

Tab. 9: Naměřené hodnoty koeficientů tření vybraných maziv při zatížení 2 kg

Test koeficientů tření vybraných maziv při zatížení 2 kg - TOP 3		
typ maziva	koeficient tření [-]	
	statický	dynamický
nemazáno	0,2147	0,3312
parafínový olej	0,0193	0,0210
motorový olej 10W 40	0,0308	0,0204
plastické mazivo Mogul G3	0,0220	0,0322
plastické mazivo LV 2-3	0,0217	0,0339
plastické mazivo IF-WS ₂ 3 %	0,0191	0,0290
plastické mazivo Molycote G	0,0257	0,0422
měděná pasta - sprej	0,0655	0,0592
kluzný lak Gleit μ - GL220	0,1923	0,1969

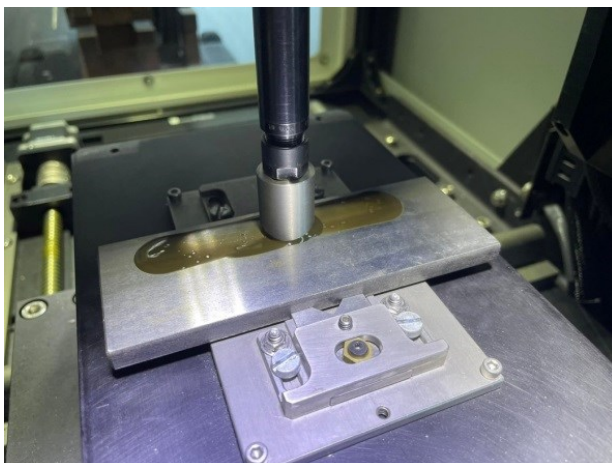


Graf 6.: Grafické znázornění naměřených hodnot koeficientů tření maziv na tribometru TOP 3

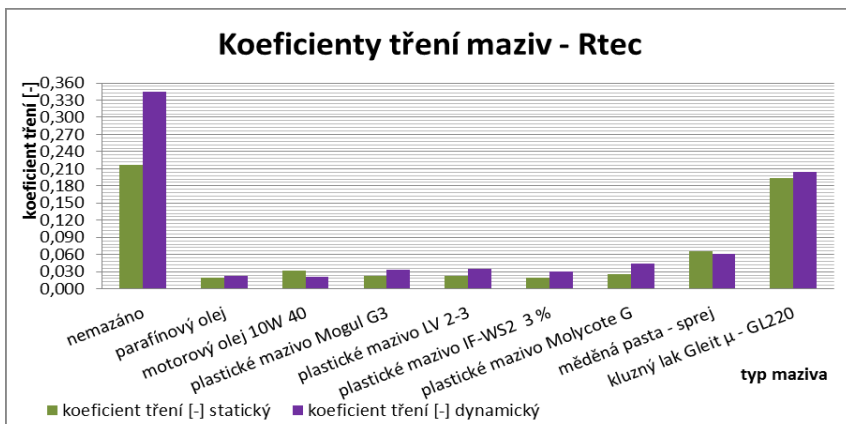
Pro ověření výše uvedených hodnot a kalibraci použité měřicí techniky bylo uskutečněno kalibrační měření na tribometru Rtec. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce 10. Tento novější přístroj má řadu výhod, hlavní je možná volba zatěžování a jeho monitoring.

Tab. 20: Naměřené hodnoty koeficientů tření vybraných maziv při zatížení 2 kg na tribometru Rtec

Test koeficientů tření vybraných maziv při zatížení 2 kg - Rtec		
typ maziva	koeficient tření [-]	
	statický	dynamický
nemazáno	0,2171	0,3444
parafínový olej	0,0195	0,0218
motorový olej 10W 40	0,0311	0,0212
plastické mazivo Mogul G3	0,0223	0,0334
plastické mazivo LV 2-3	0,0220	0,0353
plastické mazivo IF-WS ₂ 3 %	0,0193	0,0301
plastické mazivo Molycote G	0,0260	0,0439
měděňá pasta - sprej	0,0662	0,0616
kluzný lak Gleit μ - GL220	0,1944	0,2048



Obr. 12: Kalibrační měření na tribometru Rtec



Graf 7: Grafické znázornění naměřených hodnot koeficientů tření maziv na tribometru Rtec

Výše uvedený graf zobrazuje hodnoty koeficientů tření zjištěných na tribometru Rtec, jak je patrné, z porovnání tabulek 9 a 10, hodnoty jsou téměř identické jako hodnoty naměřené na tribometru TOP 3.

Návrh zkušebního zařízení

Hlavní cílem v této oblasti je navrhnout zařízení a metodiku měření vlivu koeficientu tření na nutnou osovou sílu pro správnou funkci šroubového spoje. Při dotahování, respektive předepírání šroubového spoje je jedním z hlavních hodnotících parametrů spoje, utahovací moment, tento parametr má zajistit vyvození potřebné osové síly ve spoji. A avšak jak již bylo popsáno teoretickými vztahy v kapitole o šroubových spojích, Tento moment je sumou momentů, které je potřeba zohlednit. Jedním z dílčích momentů je moment, který je závislý na velikost součinitele tření v závitu a pod hlavou šroubu, nebo maticí šroubového spoje.

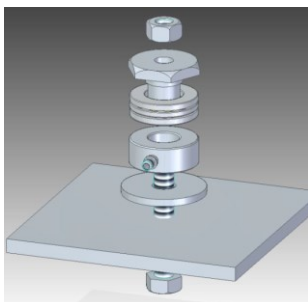
Správné stanovení hodnot jednotlivých součinitelů tření je obtížné, a to z více důvodů. Jedná se o soubor faktorů, které ovlivňují tyto parametry:

- Materiál součástek šroubového spoje,
- Kvalita povrchů – závit, stykových ploch,
- Povrchová úprava spojovacích elementů a její parametry,
- Volba mazacích podmínek – maziva,
- Aplikační teplota,
- Nečistoty na povrchu;

Popis, princip a funkce

Zkušební zařízení bylo navrženo a vyrobeno tak, aby díky jeho funkci bylo možné zjistit nezávisle na sobě, velikost koeficientu tření ve stykových plochách závitu a pod maticí nezávisle na sobě. První návrh zařízení umožňoval pouze zjištění závislosti osové síly na dotahovacím momentu, další návrh zařízení je již schopen zaznamenávat i třecí moment pod maticí, či hlavou šroubu, a to i včetně měření protažení dřívku šroubu.

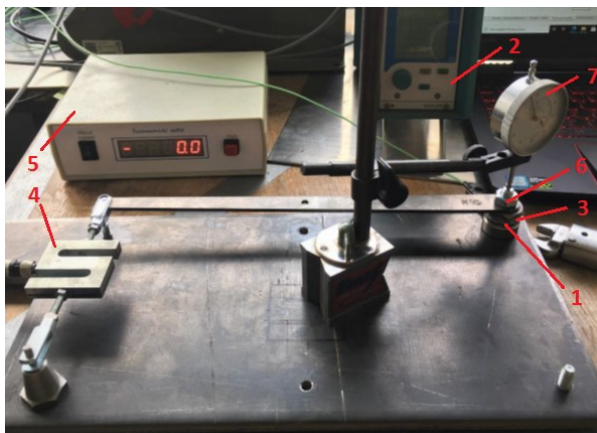
Pro správnou funkci měřících členů a eliminaci tření mezi maticí a snímačem síly, bylo do sestavy zakomponováno axiální ložisko, jak je vidět v následujícím schématu modelu měřícího členu. Na pravém obrázku, je vyobrazen již vyrobený funkční vzor měřícího členu.



Obr. 13: Schématický model sestavy zkušebního členu (vľavo), zkušební člen (vpravo)

Tento měřící člen se skládá z těchto dílů:

- Snímač osové síly – KISTLER 9103A (Měřící rozsah – 0 až 100 kN)
- Měřící jednotka – KISTLER Charge Meter Type 5015
- Axiální ložisko – SKF 51102A
- redukce pro šrouby se závity M6, M8 a M10



Obr. 15: Sestava zrealizovaného měřicího zařízení, včetně snímání prodloužení dřívku šroubu.

Zařízení bylo postupně doplněno o rameno se snímačem síly, pro určení momentu vznikajícího na základě tření v kontaktní ploše pod maticí.

Popis použitých dílů:

- Snímač osové síly – KISTLER 9103A (pozice 1)
Měřicí rozsah – 0 až 100 kN
- Měřicí jednotka – KISTLER Charge Meter Type 5015 (pozice 2)
- Axiální ložisko – SKF 51102 (pozice 3)
- Tenzometrický snímač – VTS, typ F181 (pozice 4)
Měřicí rozsah – 0 až 100 N
- Tenzometrické měřicí zařízení – TENZ 2307C (pozice 5)
- Testované šrouby a matice – M6, M8 a M10 (pozice 6)
- Číselníkový úchylkoměr Kinex (pozice 7)
Měřicí rozsah – 0-10 mm, 0,01mm

Vzorky šroubových spojů

Spojovací materiál připravený pro měření, byl vybrán na základě zkušeností. V automobilovém průmyslu jsou nejčastěji používány šrouby se závitů M6, M8, M10, a povrchová úprava galvanickým zinkováním.



Obr. 16: Vzorky spojovacího materiálu, se závity M6, M8, M10, PŮ-galvanické zinkování

Experimentální měření vlivu koeficientu tření na závislost krouticího momentu a osově síly

Tab. 31: Doporučené hodnoty utahovacích momentů a vypočtené hodnoty osově síly.

Pevnost		5,8		8,8	
D	P	M_K [Nm]	F_o [N]	M_K [Nm]	F_o [N]
M6	1	6,4	5448	9,7	8302
M8	1,25	16,1	10003	24,5	15242
M10	1,5	31,8	15930	48,4	24275
M12	1,75	54,9	23231	84	35401

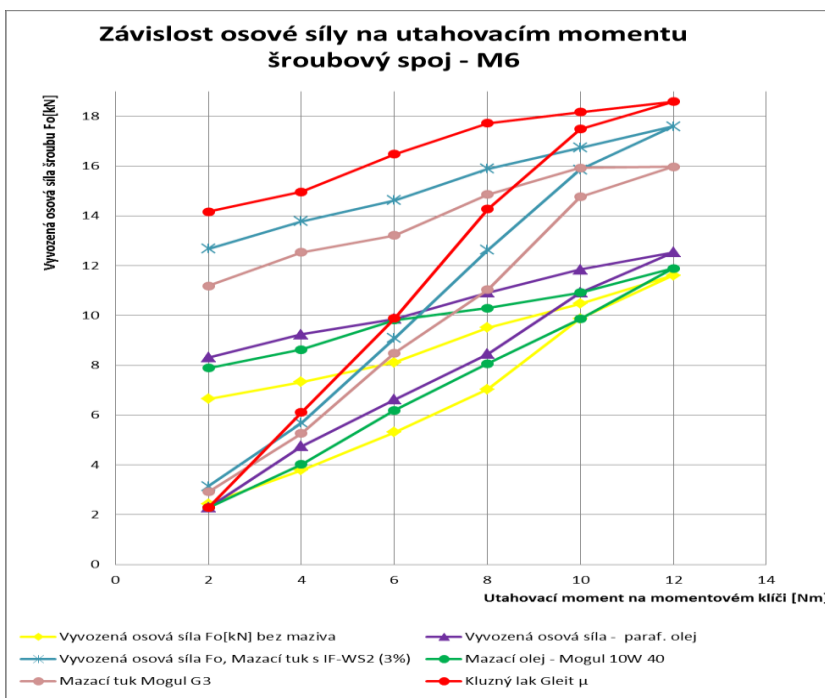
Tab. 42: Vypočtené parametry závitů

Závit	Stoupání P_h [mm]	Střední průměr d_2 [mm]	Úhel stoupání γ [rad]	Úhel stoupání γ [°]
M6	1	5,35	0,059427119	3,404923094
M8	1,25	7,188	0,055297957	3,168339538
M10	1,5	9,026	0,05284957	3,028057282

Postup měření

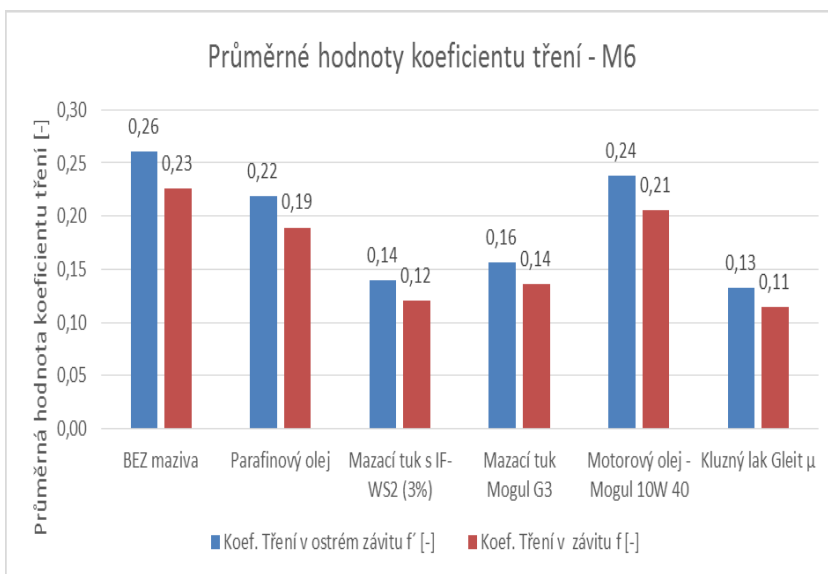
Vlastní měření proběhlo po sestavení měřících zařízení a zapojení příslušných snímačů. Každý vzorek byl postupně zatěžován momentovým klíčem krokově od hodnoty 2 Nm až do maximální hodnoty utahovacího momentu ve výše uvedené tabulce 16 (po krocích 2 Nm). Následující graf 8. zobrazuje závislosti dotahovacího momentu na osovém předpětí šroubového spoje se závitem M6, vzhledem k použitému mazivu aplikovaného do oblasti závitu matice. V grafu jsou zaznamenány charakteristiky, které popusují proces dotahování až na hodnotu doporučeného momentu k dané velikosti testovaného šroubu (závitu), následně byl daná spoj odlehčován v krocích po 2 Nm. I tento proces povolování je zachycen v následujícím grafu.

Výsledky měření osově síly v závislosti na utahovacím momentu šroubu - M6



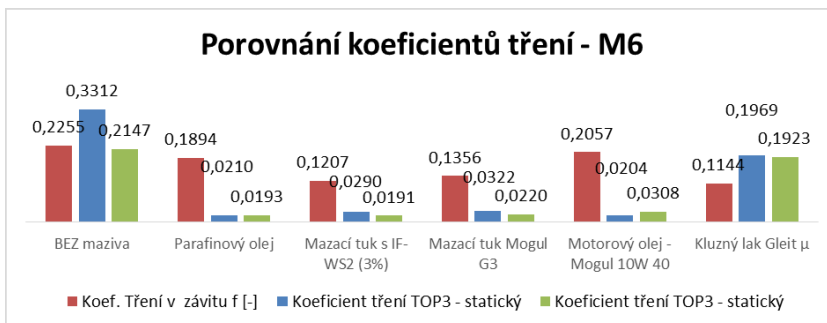
Graf 8: Závislost osově síly na utahovacím momentu šroubu – závit M6

Následující graf 9. zobrazuje závislosti dotahovacího momentu na osovém předpětí šroubového spoje se závitem M6, vzhledem k použitému mazivu aplikovaného do oblasti závitu matice. Modře označené sloupce udávají hodnoty v ostrém závitu (čistě teoretické), červené hodnoty koeficientu tření v závitu, které jsou běžně používané v praxi. Tento typ má sražený vrchol profilu závitu, kvůli snížení zadrírání.

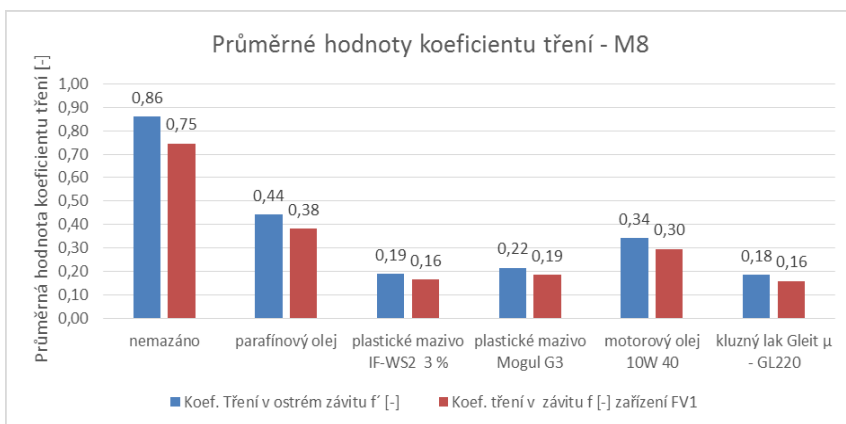


Graf 9: Zjištěné hodnoty koeficientů tření pro šroubový spoj se závitem M6.

Tyto hodnoty koeficientu tření jsou zjištěny výpočtově z parametrů krouticích momentů a sil naměřených pomocí výše popsaného zařízení. [FV1] Jak je z grafu patrné nejvyšší hodnoty koeficientu tření vykazuje zkušební dvojice bez mazání, nejlepší hodnoty koeficientu tření jsou přiřazeny kluznému laku (0,11), avšak mazací tuk s nanočásticemi se k hodnotám laku velmi blíží. V procentuálním porovnání je koeficient tření u mazacího tuku s nanočásticemi IF-WS2 jen o přibližně 9 % vyšší. U motorového oleje, koeficient tření nabývá hodnoty 0,21, což je v porovnání s kluzným lakem o 95,5 % vyšší.



Graf 60: Porovnání koeficientů tření naměřených na tribometru TOP 3 a na zařízení FV1.



Graf 11: Zjištěné hodnoty koeficientů tření pro šroubový spoj se závitem M8.

Pro porovnání byly provedeny měření i na šroubech se závity M8, M10 se standardizovaným, základním stoupáním. Charakteristiky závislosti osové síly na dotahovacím momentu a použitím mazivu či povrchové úpravě, jsou zaznamenány v následujících dvou grafech. Grafy jednotlivých testů a průběhy koeficientu tření v závitu jsou uvedeny v přílohách [P4] disertační práce práce.

3.3 BRZDOVÉ UZLY

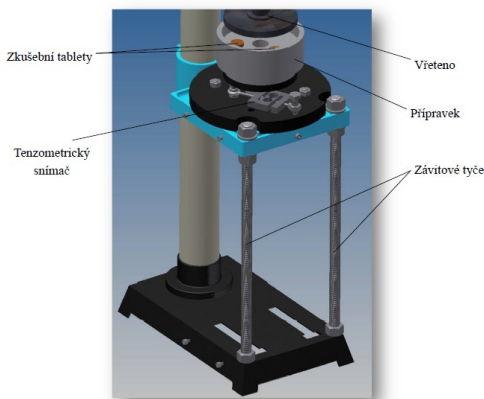
Následně popsaná experimentální část je zaměřená na zjišťování a porovnávání tribologických vlastností materiálů. Hlavní těžiště spočívá ve sledování a zhodnocování třecích koeficientů, hmotnostních, rozměrových úbytků funkčních dvojic.

Návrh a inovace zkušebního zařízení

Tribometr VRT 02, na kterém se prováděly testy, byl v rámci této disertační práce inovován pomocí nové snímací techniky, dále byly vyrobeny přípravky a redukce pro upínání brzdových materiálů. Toto zařízení má oproti stávajícímu tribometru TOP 3 několik výhod.

- možnost použití většího zatížení a jeho regulace
- vyšší rychlost funkčních dvojic (možnost regulace otáček rotačního disku)
- možnost měření tří vzorků při jednom testu

Tato možnost lze využít pro osazení unášecí hlavičky válečky-tabletami vyrobených ze třech různých základních materiálů a tím simulovat skladbu brzdového kompozitního materiálu.



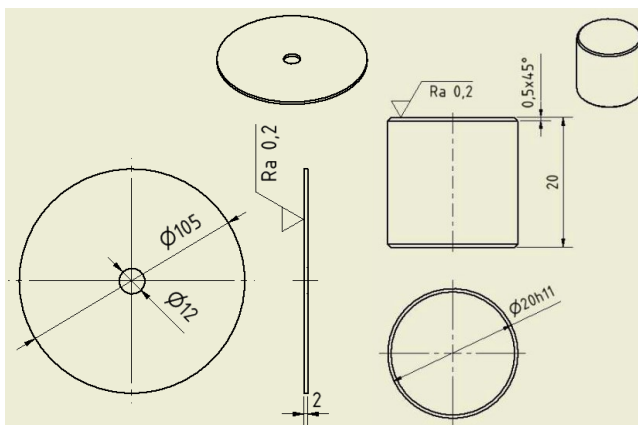
Obr. 17: Schématický popis modelu tribometru VRT 02

Princip a funkce

Po zkušenosti z předchozích testování bylo celé zařízení vyztuženo sloupky ze závitové tyče, avšak toto řešení mnohonásobně vylepšilo tuhost, je potřeba pro lepší opakovatelnost měření ještě vylepšit. To ale není předmětem této práce. Vertikálním pohybem vřetena se přitlačí zkušební disk na sestavu válečků, mezi kotoučem a válečky, díky působení normálové síly dochází k unášivému pohybu po kružnici o průměru 80mm, reakcí tohoto posunu a vyvozena unášivá síla, kterou tenzometrický snímač. Zjištěné hodnoty se vloží do vyhodnocovacího softwaru v MS Excel, ten vyhodnotí a vytvoří grafické závislosti měření. V rámci této disertační práce bylo vyrobeno či upraveno, otestováno a vyhodnoceno celkem 14 sestav funkčních dvojic (FD). Každá funkční dvojice představovala jiný materiál či upravené vzorky konvenčních brzdových materiálů. Pro opakovatelnost a možnou porovnatelnost jednotlivých kombinací byl použit jednotný materiál zkušebních kotoučů.

Tab. 53: Materiály testované funkční dvojice

Funkční dvojice - materiály		
FD	Disk	Váleček
1	ocel	dural
2	ocel	korozivzdorná ocel
3	ocel	bronz
4	ocel	titan
5	ocel	měď
6	ocel	mosaz
7	ocel	šedá litina
10	ocel	A
11	ocel	B
12	ocel	C
13	ocel	D
14	ocel	E



Obr. 18: Detailní popis vzorků

Vstupní parametry

Následující hodnoty jsou vypočítány na základě parametrů zkušebního stroje VRT02

- Průměr zkušební stopy 80mm
- Průměr zkušebního válečku 20mm
- Počet válečků testovaného materiálu: 3ks
- Zatěžovacích závaží: 1, 3 kg
- Otáčky disku: 230 ot/min⁻¹

Tab. 65: Specifikace vstupních silových parametrů

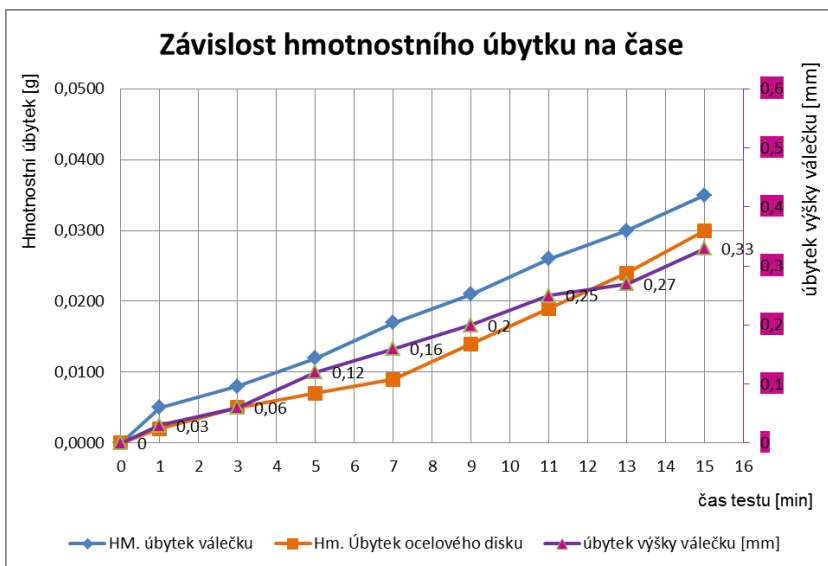
ocejchované závaží [kg]	Normálová síla [N]	Styková plocha [mm ²] 1 váleček	Kontaktní tlak [Mpa] 1 váleček	Styková plocha [mm ²] 3 váleček	Kontaktní tlak [Mpa] 3 Válečky
1,04	10,202	314,159	0,032	942,478	0,097
3,05	29,921	314,159	0,095	942,478	0,286

- suché tření,
- funkční dvojice: kotouč/tablety
- teplota při měření 22 °C,
- měřený úsek: pětiminutový interval a následně čtyři dvouminutové.

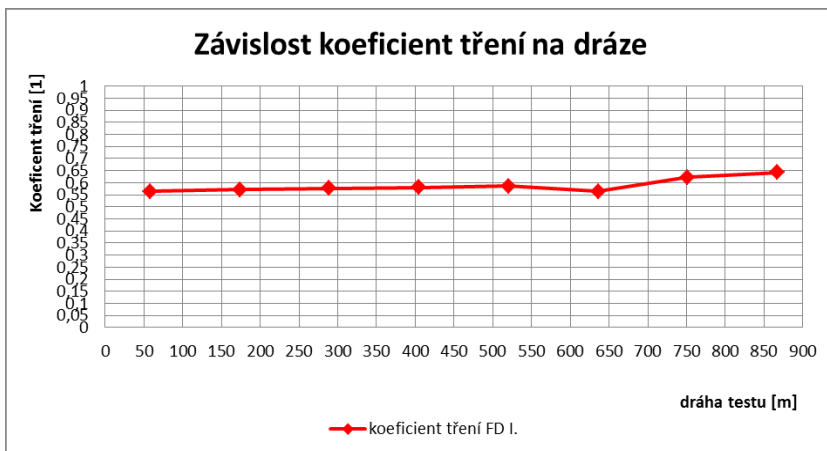
Měření hmotnosti:

Pro určení hmotnostních úbytků bylo nutné vzorky (tablety) vážit před a po testu. K tomu sloužila analytická váha OHAUS EXPLORER PRO EP214C.

Pro představu popisu jednotlivých měření a zaznamenávání hodnot je uveden následující příklad grafických závislostí koeficientu tření v závislosti na čase a závislost hmotnostního úbytku na délce dráhy testu.



Graf 17: Vývoj hmotnostního úbytku FD1 na čase – Ocel/ Dural, zatížení 1kg.



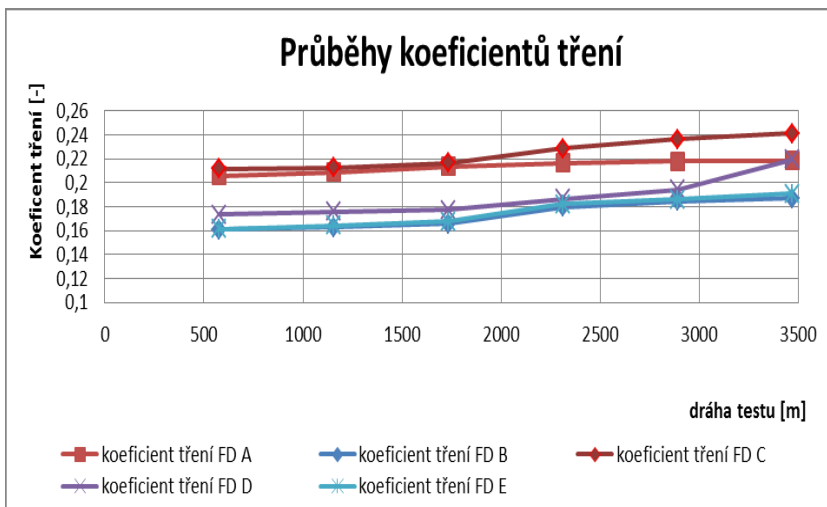
Graf 13.: Vývoj koeficientu tření FD1 na dráze – Ocel/ Dural, zatížení 1kg.

Shrnutí parametrů a vlastností brzdových uzlů

Pro náležitou a adekvátní volbu základních materiálů brzdných uzlů, bylo nutné otestovat třecí vlastnosti, a hmotnostní úbytek základních možných materiálů. Na základě těchto informací byly navrženy a prodiskutovány s dodavatelskou firmou slitiny materiálů, které byly následně označeny písmeny abecedy A až E, a poté podrobeny testu.

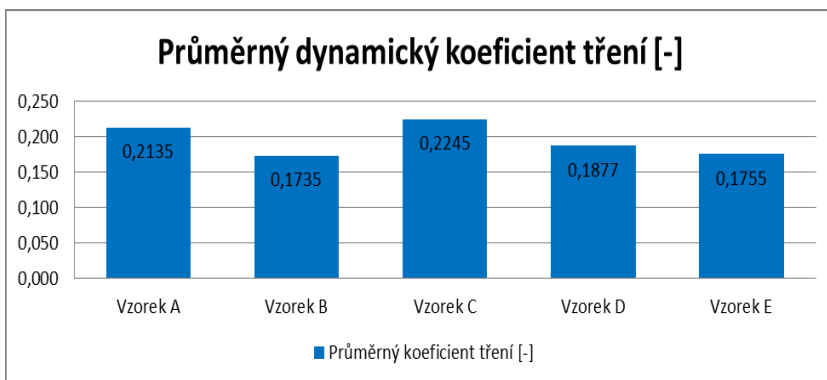
Srovnání dynamických koeficientů tření

Hlavní faktor, který má zásadní vliv na třecí vlastnosti a to hlavně na koeficient tření je materiál funkční třecí dvojice, dalším faktorem je drsnost povrchů, Dynamický součinitel smykového tření je zaznamenáván během pohybu funkčních ploch vůči sobě. Naměřené hodnoty shrnuje níže uvedený sloupcový graf.



Graf 14.: Porovnání hodnot dynamických koeficientů tření slitinových materiálů

Z grafického porovnání je patrné, že nejvyšší dynamický součinitel smykového tření dosahuje vzorek C, jedná se o vzorek s jednoznačně nejvyšším obsahem mědi. Avšak legislativně je podíl mědi v brzdných materiálech omezen, proto je nutné volit jiný materiál. Druhou nejvyšší hodnotu dosahuje vzorek A, poté následuje vzorek D. Nejnižší hodnoty koeficientu tření vykazují vzorky B a E.



Graf 15: Porovnání průměrných hodnot koeficientu tření, navržených materiálů.

Srovnání hmotnostních úbytků třecích materiálů

Na níže uvedeném grafu jsou vyobrazeny průběhy hmotnostních úbytků testovaných vzorků. U dvou z pěti vzorků (vzorky A, E) došlo v průběhu tribologického testu k záporným hodnotám hmotnostního úbytku. Hmotnost vzorků tedy v určitý okamžik byla vyšší než před začátkem testu. To bylo způsobeno kontaktem vrcholků mikronerovností testovacího kotouče a vzorku. V těchto místech docházelo z počátku k elastické deformaci, po určité době začala vznikat v povrchových vrstvách materiálů i plastická deformace. Atomy obou materiálů tak byly v blízkém kontaktu, tím docházelo ke vzniku mikrospojů (mikrosvarů), tímto způsobem přibýval materiál na disku.

Největší hmotnostní úbytek vykazoval vzorek D. Téměř lineární závislosti vykazují hmotnostní úbytky vzorků C a B. Na základě experimentů lze nastavovat životnost těchto brzdých materiálů při tření za sucha. Z pohledu emisních norem a ekologie je hmotnostní úbytek materiálu brzd a spojek velmi důležitý. Z těchto hodnot je možné kontaminační množství koloidního třecího materiálu, který kontaminuje aplikační prostředí. Ze základního chemického složení materiálů, lze následně určit škodlivost prvků a sloučenin po opotřebení třecího materiálu, a tím předcházet vzniku škodlivin.

4. SPLNĚNÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE

Následně je uveden přehled splnění cílů (dle kapitoly 3), které byly postupně plněny při řešení této disertační práce.

Hlavním cílem práce (viz kapitola 3)

Navržení a provedení experimentů směřujících k nalezení energetických a ekologických úspor, v souladu s celosvětovou snahou udržitelného rozvoje a environmentálního uvědomování.

CÍL č. 1: Snížení pasivních odporů a emisí CO₂ spalovacích motorů netradičními způsoby na principu kompozitních nanočástic v mazivech.

Navržení způsobu úspory CO₂ v provozu automobilů. **BYL SPLNĚN**

CÍL č. 2: Omezení rizik selhání šroubových spojů stanovením přesných hodnot koeficientů tření a jejich vlivu na předepnutí šroubu. Přesné stanovení závislosti předepnutí šroubu na utahovacím momentu s ohledem na koeficientech třecích ploch. **BYL SPLNĚN**

CÍL č. 3: Zvýšení výkonů brzdových systémů optimalizací složení materiálů funkčních třecích ploch na základě přesně zjištěných tribologických parametrů jejich povrchů. Ovlivnění brzdných účinků složením materiálů funkčních ploch. **BYL SPLNĚN**

5. DISKUZE VÝSLEDKŮ PŘÍNOSY PRO VĚDU A PRAXI

Jak vyplývá z teoretické a experimentální části práce je reálné aplikacemi pokročilých technologií zlepšit energetickou i klimatickou situaci naší planety. Tyto aspekty dopodrobna rozebírají rešeršně zkoumané zdroje [10, 11, 13, 14].

Za všechny zdroje informací je možno citovat velmi aktuální studii, kterou zpracovali Kenneth Holmberg (VTT Technical Research Centre of Finland) a Ali Erdemir (Texas A&M University, USA) [5], která prezentuje vliv tření a opotřebením na klima planety, zejména na emise CO₂ pro čtyři hlavní nejnáročnější oblasti: dopravu, průmysl, výrobu elektřiny a bydlení.

V současnosti představují tribologické kontakty více jak 23 % z celkové světové spotřeby energie, což popisuje zdroj [1]. K překonávání tření je potřeba 20 % a zbylá 3 % připadají na repasování opotřebených dílů nebo jejich výměnu. [7]

Tyto parametry potvrzuje publikace autora. [VV4] Průkopník kvantové fyziky Wolfgang Pauli se ve své době k tomuto problému vyjádřil památnou větou: „Hmotu stvořil Bůh, povrchy d'ábel“.

Využitím zcela nových materiálů a technologií je nezbytné snížit energetické ztráty v krátkodobém výhledu deseti let k minimálně 15 %, v dlouhodobém horizontu 20 let až o 40 %. Tyto hodnoty vycházejí z výzkumných experimentů, které popisuje [VV6] a [VV8]. Zásadní roli v naplnění těchto prognóz sehraji nanotechnologie a děje v submikronových rozměrech povrchů na zcela nových poznacích vědy. Ocel a litina mají přes své nesporné výhody i podstatné nedostatky spočívající především:

- v nízké odolnosti proti opotřebením, zvláště při suchém tření,
- ve ztrátě pevnosti při nízkém zahřátí (nutnost chlazení),
- v náchylnosti ke korozi.

Z pohledu tribologie se hledají a nacházejí způsoby, jak tyto nedostatky odstraňovat, a to především mazacími prostředky, které již ale v klasickém pojetí omezují zvládnutí tribologických potřeb při zvyšujících se parametrech strojů. K hlavním nedostatkům klasických maziv patří především:

- kontakt třecích ploch v místech výstupků mikoreliéfů,
- ztráta mazacích vlastností při vyšších teplotách;

Tribologické procesy a jejich průběh je již nyní nutné ovlivňovat změnou stavu povrchů mazivy na nových vědeckých poznatcích.

Jedním ze způsobů řešení je využití tenkých kovokeramických vrstev označovaných jako technologie SVS.

Technologie SVS je renovační technologie založená na atomové výměnné reakci způsobené teplem vytvořeným v třecích kontaktech. Tato technologie umožňuje vytvoření kovokeramické, ferosiliciové povrchové struktury na ocelovém povrchu. Tato struktura má ojedinělé fyzikální a chemické vlastnosti a je zcela prolnutá se základním kovem.

SVS prostředky jsou jemně disperzní mnohosložkové směsi minerálů, přísad a katalyzátorů [54]. Základní surovinou pro její výrobu je šungit, serpentinit a nefrit. Velikost částic je 1-10 μm .

Tyto jemné částice z uvedených minerálů se nerozpouští v mazadlech a nevstupují s nimi v chemickou reakci. Nemění viskozitu (kvůli velice malé koncentraci v oleji). Jsou ekologicky nezávadná jak v prášku, tak i v procesu jejich aplikací.

Prostředky SVS se nejčastěji aplikují do vhodných motorových olejů ale i maziv. Třecí a kontaktní povrchy strojních částí jsou ve svém původním stavu tvořeny výstupky a prohlubněmi a postupně dochází k vyrovnávání povrchu a vytvoření tvrdé povrchové kluzné vrstvy.

Vlastnosti této kovokeramické struktury:

- Nemá ostrou hranici mezi vzniklou vrstvou a kovem, na kterém se vytvořila.
- Vlastní podstatou není cizí kov, a proto má dobrou přilnavost k povrchu.
- Částice RVS, které nevstoupily do reakce, adsorbují atomární vodík z povrchu kovu. Tím se zároveň zabraňuje vodíkovému praskání.
- Vzniklá vrstva má s kovem, kterým vznikla, stejný součinitel lineární tepelné roztažnosti.
- Kovokeramickou vrstvu je možné obnovovat v souladu s jejím opotřebením, při údržbě.

Tyto výsledky byly potvrzeny laboratorně i při provedených experimentech v praxi, tyto skutečnosti potvrzuje publikace [VV9] a [VV10].

Druhý zcela nový způsob, jak naplnit požadavky „Zelené tribologie“, a tedy především snížení emisí CO₂ představují vhodná aditiva na bázi nanotechnologií odzkoušená a ověřená v této práci.

Ochranná mezilátka s nanočásticemi umožňuje, aby tloušťka mezního mazacího filmu mohla být jen několik desítek nanometrů. Takové vrstvy jsou schopny přenést i velmi vysoké tlaky (3-4 GPa) a dosahují řádově nižších koeficientů tření (až 0,005).

Pozornost výzkumu je věnována nanomateriálům aditiv na bázi uhlíku, (nanodiamanty, grafen, grafit), i nanočásticím na bázi mědi, bóru, molybdenu i polymerů. [VV3] a [VV8].

Velmi perspektivní v submikronových aditivech jsou anorganické fullereny dichalkogenidů, přechodových kovů, jako MoS₂ a WS₂. Jejich objevitelem je prof. Reschef Teune na Welzmann Institute of Science. Tento velmi revoluční objev a též jejich stabilizace a průmyslová výroba bude mít v blízké budoucnosti značný vliv v oblasti tření a opotřebení.

Zkoušky získaných vzorků těchto fullerenů IF-WS₂ (disulfid wolframu) pro experimentální řešení této práce prokázaly, že jejich aplikacemi lze snížit tření v řádech desítek a opotřebení v řádech stovek %. Souhrn zjištěných parametrů a výsledky, které zcela jasně potvrdily možnost značného snížení pasivních odporů a tím zjevně snížit hodnoty CO₂ jsou shrnuty v publikaci [VV12]. Nanočástice WS₂ zlepšují vlastnosti maziv, které následně mění stav povrchů. Fungují na principu tzv. cibulového efektu, když při rozbalování fullerenových struktur vytvářejí na povrchu tenkou vrstvu, která vyrovnává vady povrchu v místě kontaktu a soustředěné prstence nanomateriálů se postupně odlupují a usazují na povrchu i při extrémním kontaktním tlaku.

Z uvedených experimentálně ověřených příkladů použitých aditiv SVS a nanočástic IF-WS₂ vyplývají změny v oblastech tribologie směřující k omezení poškozování klimatu cestou snižování spotřeby paliv a energie, a to i v automobilové dopravě viz publikace [VV11] a [VV12].

Tento trend podporuje a představuje i celosvětový tribologický směr tzv. „Green Technology“, která svými pevně stanovenými pravidly určuje tribologický vývoj pro nejbližší období. Tato pravidla, jako je: minimalizace

vzniku a odvodu tepla, minimalizace opotřebení, biologicky rozložitelná maziva, biomimetický přístup. Jsou ve vyspělých technologiích plně akceptována a vedou ke splnění stanovených legislativních opatření v řadě celosvětových smluv.

Problematika a cíle směřující k bezpečnosti šroubových spojů, řešených v této práci, má jen dopady lokální, a snahou práce bylo zamezit zažitým zvyklostem a nešvarům při montáži šroubového spoje. Podněty pro řešení této problematiky vychází ze studia informačních zdrojů [43, 44, 45, 46]. I v této technické oblasti jsou základem tribologická pravidla, která budou platit i při robotické montáži a s tím související kontrole. Cesta definovaného spoje vede nejen přesnou výrobou závitů a jejich kvalitní úpravy povrchu s definovaným koeficientem tření, ale i zde použitím vhodných maziv, které jsou a budou k dispozici. Experimenty a měření potvrzené skutečnosti popisují publikace [VV1], [VV2]. Doposud používaný postup pro volbu parametru předepnutí šroubového spoje je založen na volbě dotahovacího momentu na základě hodnot určených tabulkou, avšak tyto hodnoty ne zcela přesně zaručí potřebné předepnutí šroubu [45]. Proto byla navržena metodika a zařízení [FV1], které zjišťuje parametry s vysokou přesností a specifikuje přesné hodnoty osovou sílu v závislosti na dotahovacím momentu pro danou přesnou aplikaci.

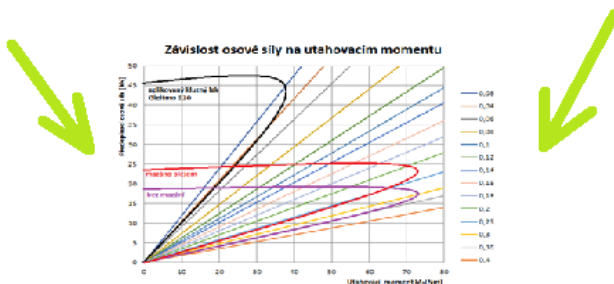
Následně uvedený obrázek popisuje typově nový postup volby parametrů pro správné hodnoty předpětí, tato metodika, popis zařízení je shrnutý v technické zprávě [FV1]. Jednotlivé závislosti a hodnoty koeficientů tření, včetně jejich průběhů v závislosti na dotahovacím momentu a typu povrchové úpravy, či maziva jsou uvedeny v publikaci [VV1].

Tribologie třecích uzlů je zcela opačným problémem tření, ale z pohledu bezpečnosti a omezování rizik jde o oblast, která nesmí omezovat potřeby a záměry konstruktérů. I zde je nutné plnit legislativní opatření a cestou nových ekologicky nezávadných materiálů ubrzdít, spojit a přenášet stále rostoucí výkony motorů, strojů a vozidel.

V Publikacích autora [VV1], jsou uvedeny některé z výsledků experimentů směřující k optimalizaci složení frikčních materiálů prováděných na navržených a sestavených tribo stendech k těmto účelům na pracovišti autora na ČVUT v Praze.



Pevnost		8.8	
D	P	M_x [Nm]	F_n [N]
M6	1	9,7	8302
M8	1,25	24,5	15242
M10	1,5	48,1	24275



Obr. 19: Nové schéma volby dotažovacího momentu pro praktické použití.

Základní suroviny pro výrobu frikčních materiálů v současnosti tvoří především směsi práškových oxidů a karbidů kovů. Jedná se obvykle o kombinace mědi, bronzu, železa a cínu doplněných složkami, jsou částice grafitu, molybdenu, korundu, barytu, siliky a stopové i dalších. Podstatnou roli má tvar a velikost částic a parametry slinování (teplota cca 800 C, tlak až 2000 MPa).

Vývoj v oblasti kovokeramických materiálů je velmi rychlý zvláště i zde aplikací nanočástic. Vývoj práškové metalurgie a kovokeramických materiálů umožňují renezanzi těchto materiálů i technologií a další rozvoj kluzných materiálů s vysokou odolností proti otěru (pod $1\mu\text{m}\cdot\text{km}^{-1}$) a potřebnými koeficienty tření (0,1-0,2), což umožňuje bezúdržbové řešení pokročilých tribologických řešení a aplikace i kluzných ložisek s možností vysokých zatížení. Výsledky výzkumu uvedené v [VV2], a částečně i této disertační práce nabízejí nové způsoby, jak snížit negativní důsledky tření a zvýšit dle požadavků výkony třecích uzlů.

6. ZÁVĚR

Poznání a porovnání vlastností povrchů při jejich vzájemném pohybu je častým požadavkem konstruktérů někdy i technologů. Na skutečné hodnoty opotřebení, na pasivní odpory či přesné koeficienty tření materiálů a životnost funkčních dvojic má vliv nejen jejich konstrukční řešení, ale i zatížení (kontaktní tlak), průběh vzájemného pohybu i mezilátka, respektive mazivo.

Z obecného pohledu nemusí špičkové parametry povrchů zajistit bezpečný provoz, či funkci definovanou hodnotami koeficientů tření. Má-li se vyhledat a určit optimální kombinace dvou povrchů je to možné pouze na základě věrohodných a odzkoušených parametrů povrchů za podmínek skutečného zatížení, nejraději na dostupném jednoduchém a přesně vypovídajícím zkušebním zařízení, ne pouze na základě, ale za podpory simulace či výpočtů. Neznamená to tedy především hledat pouze mezi zatím ověřenými kombinacemi z dostupných materiálů, ale pokusit se ověřit a využít nové možnosti, tak jak je věda a technika postupně objevuje a nabízí k aplikacím.

I tato práce se pokusila přispět k posunutí poznání v tribologii s cílem snížení emisí CO₂ v automobilovém průmyslu těmito dvěma způsoby:

- Aplikacemi aditiv umožňujících obnovu původních vlastností povrchů (technologie SVS)
- Využití zcela nových vlastností nanočástic aplikovaných do maziva na bázi fullerenu (technologie s částicemi maziva sférických fullerenu disulfidu wolframu IF-WS₂)

Technologie SVS je velice vhodná pro obnovení kluzných povrchů na jejich původní stav bez demontáže zařízení. Výhodou je renovace povrchů za provozu zařízení. Vůle na všech funkčních pohyblivých třecích dvojicích jsou po několika hodinách optimalizovány do stavu, který je obtížně dosažitelný běžnými technologiemi dnes používanými. Výsledkem je renovace do původních či velmi se blížících parametrů původním hodnotám.

U renovovaných motorů i nových strojů vede ke zkvalitnění parametrů povrchů a snížení spotřeby paliva, respektive snížení emisí CO₂, což prokázala i provedená měření v této disertační práci.

Nejdokonaleji využívá nanočástice a ještě menší částice příroda. Z atomů a molekul dokáže vytvořit složité sloučeniny, tvary i tvory schopné fungovat. Díky pokročilým technologiím můžeme již těchto poznatků začít využívat i v běžném životě.

Produkty vhodné pro aplikace v tribologii byly doposud používané pouze k vojenským a vesmírným projektům pro svoji vysokou cenu, ale i užitnou hodnotu. Vhodným výběrem nano aditiv do všech typů maziv lze dosáhnout především snížení spotřeby energie, a tedy v návaznosti i ke snížení produktů emisí především CO₂ při výrobě a používání energií všech typů. Nanočástice na bázi fullerenu například IF-WS₂ o submikronové velikosti zlepšují vlastnosti olejů a maziv v molekulární oblasti, a tak řádově snižují hodnoty opotřebení. To dokazují i prezentovaná měření a jejich výsledky v experimentální části práce.

Nutnost omezení rizik v automobilovém průmyslu dokládají statistiky nehod, které uvádějí příčinu uvolnění šroubového spoje. Jen v USA se eviduje u 12 % nových vozů selhání související s povolením šroubového spoje. U starších vozů po servisní práci dokonce dvojnásobek, tedy 24 %.

Nejdůležitějším faktorem ovlivňujícím pevnost a spolehlivost šroubového spoje spočívá v optimální hodnotě předepínací síly. Tato síla, která je vyvozena krouticím momentem při montáži, je však vyvozena pouze při správném a kontrolovaném koeficientu tření, na němž je přímo závislá. Jedním z cílů této práce bylo kvantifikovat vliv velikosti tření na optimální dotažení šroubu, a z toho důvodu navržení a realizace zkušebního zařízení, kterým lze snadno sledovat tribologické vztahy při používání šroubových spojů. Zařízení, které je klasifikováno jako „funkční vzor“ [FV1] je využíváno k testování maziv a jejich vhodné aplikaci a je plně k dispozici k využití technickou veřejností.

Vývoj i výroba kovokeramických materiálů patřily v Československu k velmi dobré světové úrovni. Tato problematika se přednášela a studovala i na ČVUT a to především na našem technologickém pracovišti. Z té doby existují i řady literárních pramenů včetně diplomových prací, skript a norem. Výkonná obložení a odolné frikční materiály přispívají k úspěšnému řešení problémů velmi namáhaných třecích uzlů.

Zvyšující se rychlosti i přítlačné síly v uzlech tření způsobily značné zvýšení pracovních teplot, které vyžadují nové třecí materiály odlišných vlastností, připravených především cestou práškové metalurgie. Navíc ekologické uvědomování zastavilo používání řady materiálů, především z křemičitanů (osinek-azbest). Na dnes vyráběné prvky brzd, spojek, tlumičů jsou kladeny stále vyšší požadavky ze strany nejen automobilového průmyslu, ale i konstruktérů letadel, kolejových vozidel ale i třeba větrných elektráren.

I když problematika zvyšování výkonů třecích uzlů vychází z kvalitních základních poznatků tribologie, materiálů a technologických disciplín, není možné zcela opomíjet oblast vzdělávání a výzkumu, a to ani pro pouhé jejich aplikační využívání. Všichni přeci dobře vědí, že bezpečně zpomalit či zastavit je daleko náročnější než akcelerovat.

Omezené možnosti této práce upozorňují ne na posledním místě na opomenutí nezbytného návratu k alespoň sledování výsledků a stavu tribologických oblastí a disciplín. Vzpomeňte na tuto skutečnost včas, dříve než budete v dopravním prostředku, který bude mít problémy zpomalit či zastavit. Děkuji Vám autor.

Publikace autora související s tématem disertace

- [FV1] HAZDRA, Z. Zařízení pro měření koeficientu tření ve šroubových spojích. [Funkční vzorek], 2021.
- [VV1] HAZDRA, Z. – BLAHA, M. INFLUENCE OF FRICTION COEFFICIENT ON THE SAFETY OF THREAD CONNECTIONS. In: KUDLÁČEK, J., ed. Sborník konference Technological forum 2021. TECHNOLOGICAL FORUM 2021, HOTEL LUNA, KOUTY, 2021-06-30/2021-07-02. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2021, s. 56-59. ISBN 978-80-87583-33-3.
- [VV2] HAZDRA, Z.- KUCHAR, J. Tření ve šroubových spojích. In: MECHATRONICS - PRODUCTION TECHNOLOGIES - DIGITAL ENTERPRISE. Trnava, 2021-04-14. Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2021. s. 135-139. sv. 1. ISBN 978-80-87691-36-6.
- [VV3] HAZDRA, Z. – KUCHAR, J. – KREIBICH, V. *Reduction of friction losses in the internal combustion engine*. In: TECHNOLOGICAL FORUM 2020. Jaroměř, 2020-11-25. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2020. s. 53-56. ISBN 978-80-87583-32-6.
- [VV4] HAZDRA, Z. – BLÁHA, M. Optimalizace třecích ztrát pomocí úpravy parametrů dokončovacích operací povrchu. Občasník Povrcháři. 2019, 4(8), 20-22. ISSN 1802-9833. Dostupné z: http://povrchari.cz/kestazeni/201908_povrchari.pdf
- [VV5] HAZDRA, Z. Aplikace kluzných laků pro snížení pasivních odporů a emisí CO₂ v automobilismu. Občasník Povrcháři. 2019, 4(4), ISSN 1802-9833. Dostupné z: http://povrchari.cz/kestazeni/201904_povrchari.pdf
- [VV6] HAZDRA, Z. – KREIBICH, V. *RENOVATION TECHNOLOGY OF CYLINDER LINERS IN COMBUSTION ENGINE*. In: IN-TECH 2018 International Conference on Innovative Technologies, Zagreb, Proceedings. IN-TECH2018, Zagreb, 2018-09-05/2018-09-07. Rijeka: Faculty of Engineering University of Rijeka, 2018. P. 203-206. ISSN 0184-9069.
- [VV7] KUCHAR, J. – KREIBICH, V. - HAZDRA, Z. *MAINTENANCE OF ENERGY EQUIPMENT*. In: International Conference on Innovative Technologies 2017. International Conference on Innovative Technologies, IN-TECH2017, Ljubljana, 2017-09- 11/2017-09-13. Rijeka: Faculty of Engineering University of Rijeka, 2017. s. 267-270. ISSN 0184-9069.

- [VV8] HAZDRA, Z., J. KUDLÁČEK a V. KREIBICH. Friction in Automotive Internal Combustion Engines. In: БАЛИЦКИЙ, А.Г.В et al., eds. ТЕХНИЧЕСКИЕ УНИВЕРСИТЕТЫ: ИНТЕГРАЦИЯ С ЕВРОПЕЙСКИМИ И МИРОВЫМИ СИСТЕМАМИ ОБРАЗОВАНИЯ. Технические университеты: интеграция с европейскими и мировыми системами образования», Izhevsk, 2017-03-21/2017-03-23. Izhevsk: ISTU Izhevsk, 2017.s. 174-179. ISBN 978-5-7526-0754-7.
- [VV9] HAZDRA, Z. Progresivní technologie snižování pasivních odporů v automobilovém průmyslu. Občasník Povrcháři. 2015,(8), ISSN 1802-9833. Dostupné z: http://povrchari.cz/kestazeni/201508_povrchari.pdf
- [VV10] KUCHAR, J., V. KREIBICH a Z. HAZDRA. Renovování strojních součástí technologií tampónování. Občasník Povrcháři. 2015,(8), 9-10. ISSN 1802-9833. Dostupné z: http://povrchari.cz/kestazeni/201508_povrchari.pdf
- [VV11] HAZDRA, Z. Technologie povrchových úprav snižující spotřebu paliv a produkci CO₂. Povrcháři. 2016,(4), ISSN 1802-9833. Dostupné z: http://www.povrchari.cz/kestazeni/201604_povrchari.pdf
- [VV12] HAZDRA, Zdeněk. Vliv pasivních odporů na spotřebu paliva a tvorbu emisí CO₂. Technický týdeník. 8. 3. 2022, roč. 64, č. 4, s. 26.
- [VV13] HAZDRA, Zdeněk. Bezpečnost šroubového spoje v závislosti na koeficientu tření. *Strojárstvo* [online]. Žilina: MEDIA/ST, 2022, roč. 2022, č. 3, 66/4-68/6 [cit. 2022-03-09]. ISSN 1335- 2938. Dostupné z: http://www.engineering.sk/images/stories/pdf/stroj11_3_cb_el.pdf
- [VV14] Z. HAZDRA. *Zvýšení výkonu brzdných uzlů* Občasník Povrcháři. 2023,(4), 9-10. ISSN 1802-9833. Dostupné z: http://povrchari.cz/kestazeni/202204_povrchari.pdf
- [VV15] HAZDRA, Zdeněk. Povrchy a povlaky s parametry pro automobilový průmysl. *TRIBOLÓGIA* [online]. © 2022- 2022 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika12010/Povrchy-a-povlaky-s-parametry-pro-automobilovy-prumysl.html>

Vyzvané přednášky související s tématem disertace

[1VP] HAZDRA, Z., - KUDLÁČEK, J. - V. KREIBICH. Friction in Automotive Internal Combustion Engines. In: БАЛИЦКИЙ, А.Г.В et al., eds. ТЕХНИЧЕСКИЕ УНИВЕРСИТЕТЫ: ИНТЕГРАЦИЯ С ЕВРОПЕЙСКИМИ И МИРОВЫМИ СИСТЕМАМИ ОБРАЗОВАНИЯ. Технические университеты: интеграция с европейскими и мировыми системами образования», Izhevsk, 2017-03-21/2017-03-23. Izhevsk: ISTU Izhevsk, 2017.s. 174-179. ISBN 978-5-7526-0754-7.

[2VP] HAZDRA, Z. – KUCHAR, J. **Tření ve šroubových spojích.**
In: MECHATRONICS - PRODUCTION TECHNOLOGIES - DIGITAL ENTERPRISE. Trnava, 2021-04-14. Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2021. s. 135-139. sv. 1. ISBN 978-80-87691-36-6.

Seznam použité literatury v tezích

- [1] ABDELBAR, Ahmed. *Extreme tribology: fundamentals and challenges*. 1 vydání, 2020. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2020. 330s. ISBN 9781138328150. Kapitola 2, s. 9nn.
- [2] HELEBRANT, F. – ZIEGLER, J. – MARASOVÁ, D. *Technická diagnostika a spolehlivost*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2001. 155s. ISBN 8070788836. s. 15-19.
- [3] BEČKA, J. *Tribologie*. Praha: České vysoké učení technické, 1997. 212s. ISBN 8001016218. Kapitola 1, s. 11nn
- [4] Merksiz J., Pielecha J., Radzimirski S. Structure and Applicability of Regulations. In: *New Trends in Emission Control in the European Union. Springer Tracts on Transportation and Traffic*, vol 4., Springer, Cham. 2014. p. 221-227. https://doi.org/10.1007/978-3-319-02705-0_2
- [5] Holmberg, K., Erdemir, A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions. *Friction* 5, 2017. p. 263–284. <https://doi.org/10.1007/s40544-017-0183-5>
- [6] Holmberg K, Andersson P, Erdemir A. Global energy consumption due to friction in passenger cars. *Tribology International* 47, 2012. p. 221–234.
- [7] Holmberg K, Andersson P, Nylund P O, Mäkelä K, Erdemir A. Global energy consumption due to friction in trucks and buses. *Tribology International* 78, 2014. p. 94–114.
- [8] CHYTIL, I. *Stanovení emisí CO2 výfukových plynů u CNG, benzinových a naftových vozidel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 95 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Bača, Ph.D. str. 20-22.
- [9] EU: Cars and Light Trucks [online]. Ecopoint DieselNet, 2017 [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: <https://www.dieselnet.com/standards/eu/ld.php>
- [10] EU: Cars: Greenhouse Gas Emissions—ACEA Agreements [online]. Ecopoint DieselNet, 2017 [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: https://www.dieselnet.com/standards/eu/ghg_acea.php
- [11] Dohoda ACEA: IP/98/734 [online]. Brusel: European Commission, 1998 [cit. 2021-12-09]. Dostupné z: http://europa.eu/rapid/press-release_IP-98-734_en.htm?locale=en

- [12] NAŘÍZENÍ EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (ES) č. 443/2009. Štrasburk: EVROPSKÝ PARLAMENT A RADA EVROPSKÉ UNIE, 2009, ročník 2007, číslo 0297.
- [13] Reducing CO2 emissions from passenger cars [online]. 2017: EUROPEAN COMMISSION, 2017 [cit. 2021-11-20]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars_en
- [14] Invention and Transfer of Environmental Technologies [online]. Paříž: OECD Publishing, 2011 [cit. 2021-11-20]. ISBN 9789264115620. Dostupné z: http://www.oecd-ilibrary.org/environment/invention-and-transfer-of-environmental-technologies_9789264115620-en
- [15] Schommers, J., Scheib, H., Hartweg, M. et al. *Minimising Friction in Combustion Engines*. *MTZ Worldw* 74, p.28–35. 2013. <https://doi.org/10.1007/s38313-013-0072-x>
- [16] Aufischer, R, Walker, R, Offenbecher, M, Feng, O, & Hager, G. "Friction Reduction Opportunities in Combustion Engine Crank Train Bearings." *Proceedings of the ASME 2015 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference. Volume 2: Emissions Control Systems; Instrumentation, Controls, and Hybrids; Numerical Simulation; Engine Design and Mechanical Development*. Houston, Texas, USA. November p. 8–11, 2015. V002T07A008. ASME. <https://doi.org/10.1115/ICEF2015-1087>
- [17] HRMÁDKO, Jan. *Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. 1. vyd. Praha: Grada, 2011, 296 s. ISBN 978-80-247-3475-0.
- [18] KLIMEŠ, Pavel. Části a mechanismy strojů. 1.vyd. Brno: CERM, 2003, 70 s. ISBN80-214-2422-2. s. 29-31.
- [19] KOŽOUŠEK, Josef. Výpočet a konstrukce spalovacích motorů II. 1. vyd. Praha: SNTL, 1983, 483 s. s. 114-119.
- [20] MACEK, Jan. Spalovací motory. 2. vyd. V Praze, 2012, 262 s. ISBN 978-80-01-05015-6, s. 88nn
- [21] Simon C. Tung, Hong Gamb, *Tribological characteristics and surface interaction between piston ring coatings and a blend of energyconserving oils and ethanol fuele*, *Wear* 255, 2003.
- [22] ALLMAIER, H., C. PRIESTNER, D.E. SANDER a F.M. REICH. Friction in Automotive Engines. *Tribology in Engineering*. InTech, 2013. DOI: 10.5772/51568. ISBN 978-953-51-1126-9. Dostupné také z: <http://www.intechopen.com/books/tribology-in-engineering/friction-in-automotive-engines>

- [23] NOVOTNÝ, Pavel, Václav PÍŠTĚK, Richard AMBRÓZ a Lubomír DRÁPAL. *MODERN COMPUTATIONAL APPROACHES TO POWERTRAIN MECHANICAL LOSS SOLUTION*. In: [online]. 2010 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: http://pernerscontacts.upce.cz/20_2010/Novotny.pdf
- [24] *Částicová fyzika, ekvipartiční teorém*. [online]. [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: http://fyzika.fce.vutbr.cz/pub/otazky_cb54.pdf
- [25] *Radostný i bolestný vývoj nových motorů*. [online]. 2012 [cit. 2021-07-12]. Dostupné z: <http://www.autopress.cz/?page=311.radostny-i-bolestny-vyvoj-novych-motoru>
- [26] TAYLOR, C.M. *Automobile engine tribology—design considerations for efficiency and durability*. [online]. 1998 [cit. 2014-03-29]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164898002531>
- [27] GÄNSHEIMER, Josef. *Optimalizace šroubových spojů za pomoci tuhých maziv*. Nacházal, s.r.o., [2001]. R. Berman, Physical Properties of Diamond, Clarendon press, Oxford, 1965
- [28] K.E. Spear, *Journal of the American Ceramic Society* 72, 1989, p. 171.
- [29] D.W. Wheeler, R.J.K. Wood, *Wear* 225–229(1999) 523. reduction, *Wear* (2006)
- [30] R. Ipek, B. Selkuk, *The dry wear profile of cam shift*, *Journal of Materials Processing Technology* 168 (2005), p.373–376.
- [31] Nagaraj Nayaka, P.A. Lakshminarayanan, M.K. Gajendra Babu, A.D. Dani, *Predictions of cam follower wear in diesel engines*, *Wear* 260, 2006., p. 181–192.
- [32] G. Ryk, I. Etsion, *Testing piston rings with partial laser surface texturing for friction*
- [33] MALEC, P. *Povrchové úpravy válců spalovacích motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 49 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Maršálek.
- [34] Shrawan Kumar Singh, Avinash Kumar Agarwal, Mukesh Sharma, *Experimental investigations of heavy metal addition in lubricating oil and soot deposition in an EGR operatér*, *Applied Thermal Engineering* 26, 2006. p. 259–266.
- [35] Gehrung Technologies GmbH 2015: *LASER HONING*. *Gehring Technologies GmbH 2015: LASER HONING* [online]. Ostfildern: Gehrung, 2012, 2015 [cit. 2015-12-18]. Dostupné z: <http://www.gehrung.de/en-ww/laser-honing>

- [36] Vlk, F., *Paliva a maziva motorových vozidel.*, 1. Vydání, Brno: Vlk František, 2006, ISBN 80-239-6461-5. s. 177-184.
- [37] Specifikace motorových olejů. *Petroleum.cz* [online]. [cit. 20.3.2019]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/vyroby/oleje-motorove-specifikace.aspx>
- [38] WALD, F. - ROZLÍVKA, L. – SOKOL, Z. – ŠERTLER, H. *VLIV MAZIVA NA UTAHOVÁNÍ ŠROUBŮ TŘECÍCH SPOJŮ* [online]. , 1-5 [cit. 2019-04-22]. Dostupné: [http://people.fsv.cvut.cz/~wald/Clanky%20v%20Adobe%20\(Pdf\)/Vliv_maziva_na_VP_srouby.pdf](http://people.fsv.cvut.cz/~wald/Clanky%20v%20Adobe%20(Pdf)/Vliv_maziva_na_VP_srouby.pdf)
- [39] VÁLOVÁ, Marie, KREIBICH, Viktor a SOVJAK Sergej. Povrchové úpravy a renovace technologiemi RVS. *Mm Spektrum* [online]. 13.4.2005 [cit. 10.3.2019]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/povrchove-upravy-a-renovace-technologie-mi-rvs.html>
- [40] RVS *TECHNOLOGY®* *GASOLINE ENGINE TREATMENT* [online]. RVS, 2010, 2010 [cit. 2021-11-23]. Dostupné z: <https://www.rvs-usa.com/product/rvs-technology-gasoline-engine-treatment/>
- [41] Erdemir, A. – Ramirez, G. – Eryilmaz, O., L. – Narayanan, B. – Liao, Y. – Kamath, G. et al., *2016 Carbon-based tribofilms from lubricating oils Nature* 536 67
- [42] POSPÍŠIL, František. *Závitová a šroubová spojení*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1968. 264s. Řada strojírenské literatury, s. 167nn
- [43] WESSELY, Andreas. *Test šroubů při těžkých zatíženích: Mazání šroubů*. Nacházel, s.r.o., [2000].
- [44] FOJTA, Lubomír. *Analýza šroubových spojů při aplikaci moderních spojovacích prvků, povlaků a maziv*. FS ČVUT, 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Jan Kanaval.
- [45] CROCCOLO, Dario; DE AGOSTINIS, Massimiliano; VINCENZI, Nicolò. Influence of tightening procedures and lubrication conditions on titanium screw joints for lightweight applications. *Tribology International*, 2012, p. 68-76.
- [46] HOUŠTĚK, Jan. Povrchové úpravy šroubů. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 12.4.2006. [cit. 13.5.2021]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/povrchove-upravy-sroubu>
- [47] Směrnice komise 659. EC ze dne 3. prosince 1991, o sblížení právních

- a správních předpisů členských států týkajících se omezení uvádění na trh
a používání některých nebezpečných látek a přípravků (azbest). In: EUR-Lex-31991 L 0659
- [48] Směrnice komise 77. EEC. ze dne 26. července 1999, o sblížení právních
a správních předpisů členských států týkajících se omezení uvádění na trh
a používání některých nebezpečných látek a přípravků. In: EUR-Lex-31999 L 0077
- [49] DUFEK, Vladimír. *Kovokeramické třecí materiály*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965. 134s. Řada strojírenské literatury. s. 76-84.
- [50] MINISTR, Zdeněk. *Strojní součásti z práškových kovů*. 1. Praha: SNTL, 1963, 215 s.
- [51] ARANGANATHAN, N. a Jayashree BIJWE. Development of copper-free eco-friendly brake-friction material using novel ingredients. In: *Wear*. 2016, s. 79-91. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2016.01.023
- [52] G. Sathyamoorthy, R.- Vijay, D. -Lenin Singaravelu. *Brake friction composite materials: A review on classifications and influences of friction materials in braking performance with characterizations. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* 2021, 11, 135065012110640. <https://doi.org/10.1177/13506501211064082>
- [53] VÁLOVÁ, Marie. *Kvalita povrchů a tribologické vlastnosti materiálů*. Praha, 2004, p. 90. Diplomová. ČVUT v Praze.
- [54] PLESKAČ, Jan. *Tribologické vlastnosti funkčních dvojic materiálů*. Praha, 2004, p. 72, Diplomová. ČVUT v Praze.
- [55] BLÁHA, Miroslav. *Snižování třecích ztrát ve strojírenství* [online]. Praha, 2019, 98 s. [cit. 2021-12-11]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/84824/F2-BP-2019-Blaha-Miroslav-BP_BLAHA_2019.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Bakalářská. ČVUT v Praze.
- [56] Dynostar: Dynostar ETB 500. *Dynostar.com* [online]. Roosendaal The Netherlands: Dutch Dynamometers & Engineering Solutions BV, 2022 [cit. 2019-07-21]. Dostupné z: <https://www.dynostar.com/engine-dynamometer/dynostar-etb500/>

Anotace

Na základě doporučení během doktorského studia se tato práce zabývá problematikou rozšíření dosavadního poznání z oblasti tribologie se zaměřením na zjišťování a optimalizaci koeficientů tření povrchů strojírenských materiálů s ohledem na aplikace v automobilovém průmyslu.

Hlavní cíle práce spočívají v návržení a provedení experimentů směřujících k nalezení energetických a ekologických úspor, v souladu s celosvětovou snahou udržitelného rozvoje a environmentálního uvědomování.

Práce zároveň, na základě aktuálních požadavků a potřeb technické veřejnosti, napomáhá a přispívá ke vznikajícímu tribologickému a diagnostickému pracovišti na ČVUT v Praze.

Summary

Based on the recommendations during the doctoral study, this work deals with the issue of expanding existing knowledge in the field of tribology with a focus for determining and optimizing the coefficients of friction of engineering materials about applications in the automotive industry.

The main goals of this work are to design and perform experiments aimed at to find energy and environmental savings, in line with the global pursuit of sustainable development and environmental awareness.

The work also wants, based on the current requirements and needs of the technical public, to help and contribute to the emerging tribological and diagnostic workplace at CTU in Prague.

Bez ohlasů a recenzí