ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav strojírenské technologie

Povrchy a povlaky s parametry pro automobilový průmysl

Disertační práce

Autor: Ing. Zdeněk Hazdra

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Strojírenská technologie

Školitel: doc. Ing. Viktor KREIBICH, CSc.

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

Praha 2022

Prohlášení:

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě disertační práci zpracovanou na závěr doktorského studia na Fakultě strojní ČVUT v Praze.

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval samostatně a použil jsem podklady uvedené v přiloženém seznamu.

Podle § 60 zákona č.121/2000 Sb., O právu autorském a právu souvisejícím s právem autorským, O studiu na vysokých školách a zákona o závěrečných zkouškách, je doktorská práce duševním spoluvlastnictvím autora, vedoucího doktorské práce a Fakulty strojní ČVUT. Citace povoluje fakulta. Podmínkou externího použití je smlouva s řešiteli.

V Praze dne 28. 1. 2022

.....

Zdeněk Hazdra

Anotace:

Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	doc. Ing. Ladislav KOLAŘÍK, PhD., IWE
Název disertační práce:	Povrchy a povlaky s parametry pro automobilový průmysl
Akademický rok:	2021/2022
Autor:	Ing. Zdeněk Hazdra
Vedoucí práce:	doc. Ing. Viktor KREIBICH, CSc.
Klíčová slova:	Povrchy, opotřebení, koeficienty tření, tribologie, funkční dvojice, šroubové spoje.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran:	184
Počet obrázků:	62
Počet tabulek:	26
Počet příloh:	5

Annotation:

University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Department of Manufacturing technology
Head of the department:	doc. Ing. Ladislav KOLAŘÍK, Ph.D., IWE
Theme of work:	Surfaces and coatings with parametres for automotive industry
Academic year:	2021/2022
Autor:	Ing. Zdeněk Hazdra
Supervisor:	doc. Ing. Viktor KREIBICH, CSc.
Keywords:	Surfaces, wear, coefficients of friction, tribology, functional pairs, screw connections.

Volume of work:

Number of pages:	184
Number of pictures:	62
Number of tables:	26
Number of attachments:	5

Abstrakt:

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 navržení 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.

Abstract:

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 with regard to 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.

Poděkování:

Děkuji Fakultě strojní ČVUT v Praze za možnost studia a vzdělání, kterého se mi tímto dostalo a všem pracovníkům z oboru tribologie, povrchových úprav a strojírenství, od kterých jsem měl možnost čerpat informace shromážděné v této práci.

Děkuji všem kolegům z Ústavu strojírenské technologie, za veškerou podporu a technickou spolupráci.

Děkuji tímto svým školitelům doc. Ing. Viktoru Kreibichovi, CSc. i Ing. Janu Kudláčkovi, Ph.D.

Poděkování patří vedoucímu odborné skupiny povrchových úprav na Ústavu strojírenské technologie Ing. Jiřímu Kuchařovi, Ph.D., IWE.

V neposlední řadě děkuji své rodině, za podporu a trpělivost.

OBSAH

ÚVOD…..22

1 Teoretická část - Problematika a současnost tribologie v automobilovém průmyslu. 24

1.1 Tribologie 25

1.1.1 Tribologie a emise v automobilovém průmyslu 25

1.1.2 Emise a Evropská legislativa 27

1.1.3 Ekonomický význam tribologie 31

1.2 Tření 33

1.2.1 Suché tření 33

1.2.2 Mezní tření.....33

1.2.3 Kapalinné tření 33

1.2.4 Tření v kapalinách 34

1.2.5 Smykové tření.....35

1.2.6 Valivé tření.....36

1.2.7 Parametry ovlivňující mechanické ztráty motorů 37

1.3 Mazání 40

1.3.1 Mazání motorů.....40

1.4 Maziva 41

1.4.1 Parametry maziv.....41

1.4.2 Rozdělení maziv 44

1.5 Snižování spotřeby energie omezením pasivních odporů.....54

1.5.1 Snižování tření.....54

1.5.2 Současná metodika snižování pasivních odporů.....55

1.5.3 Důvody a principy omezování pasivních odporů 56

1.6 Omezení rizik šroubových spojů 63

1.6.1 Šroubové spoje 64
1.6.2 Výroba vnitřních a vnějších závitů 64
1.6.3 Geometrie závitu 65
1.6.4 Předepjaté šroubové spoje 66
1.6.5 Silové poměry a samosvornost závitové dvojice 66
1.6.6 Samosvornost závitu 67
1.6.7 Tření v závitech 70
1.6.8 Povrchové úpravy šroubů 72
1.6.9 Selhání šroubových spojení 75
1.6.10 Únava a pevnost součástek šroubových spojů 78
1.7 Zvyšování výkonu třecích uzlů 79
1.7.1 Provozní a technologické parametry frikčních materiálů 80
1.7.2 Volba materiálu funkčních třecích dvojic 81
1.7.3 Rozdělení aktuálně využívaných materiálů 82
1.8 Shrnutí teoretické a rešeršní části práce. 84
2 STANOVENÍ HLAVNÍCH CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE 86
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST 87
3.1 Snížení emisí CO_2 spalovacích motorů cestou snížení pasivních odporů a spotřeby paliva 87
3.1.1 Měřící zařízení 87
3.1.2 Vliv testovaných aditivních přísad do motorového oleje 90
3.2 Ovlivnění vlastností motorového oleje 94
3.2.1 Vliv přípravků s vhodnými nanočásticemi na hodnoty koeficientu tření 98
3.2.2 Vliv mazacího oleje v kombinaci aditivním přípravkem na koeficient tření 101
3.3 Tribologie šroubových spojů 107
3.3.1 Testování koeficientů tření – maziva 107
3.3.2 Návrh zkušebního zařízení 110

3.3.3 Experimentální měření vlivu koeficientu tření na závislost krouticího momentu a osové síly 114

3.4 Brzdové uzly 121

3.4.1 Návrh a inovace zkušebního zařízení 121

3.4.2 Shrnutí parametrů a vlastností brzdových uzlů 149

4 DISKUZE VÝSLEDKŮ, PŘÍNOSY PRO VĚDU A PRAXI 151

5 SPLNĚNÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE 156

6 ZÁVĚR 157

7 Seznam zdrojů a použité Literatury 160

8 Publikace autora spojené s prací 169

9 Publikace autora 171

9.1 Vyzvané přednášky 174

10 PŘÍLOHY 176

Seznam obrázků

Obr. 1: Schématické rozdělení druhů tření [16] 33

Obr. 2: Schéma průběhu tření v kapalinách [19] 35

Obr. 3: Síly při kluzné tření [20] 36

Obr. 4: Silové poměry valivého tření [21] 37

Obr. 5: Obecná charakteristika mechanické účinnosti motoru na jeho otáčkách. [25] [25] 38

Obr. 6: Obecná charakteristika mech. účinnosti motoru $[\eta m]$ v závislosti na stupni komprese $[n]$. [25] 38

Obr. 7: Viskózní index. [3] 43

Obr. 8: Stribeckovy křivky udávající závislosti součinitele tření μ na rychlosti u při různých hodnotách tlaku p. [15] 44

Obr. 9: Porovnání vývoje výkonnosti maziv, kde zelená oblast označuje příklad motorového oleje z roku 1997 a žlutá oblast olej z roku 2012. [33] 45

Obr. 10: Zobrazení povrchu na konfokálním mikroskopu, závislost změn profilu povrchu před (vlevo) a po renovaci(vpravo). [54] 50

Obr. 11: Postavení nanočástic z hlediska rozměrů. [94] 52

Obr. 12: Schématické zobrazení nanočástic cibulových nanostruktur při rozbalování. [58] 53

Obr. 13: Schématické zobrazení nanočástic s micelární nanostrukturou. [58] 53

Obr. 14: Částice IF-WS_2 zobrazená pomocí elektronového mikroskopu. [58] 53

Obr. 15: Schematické rozložení třecích ztrát v motoru [24] 57

Obr. 16: Energie a její transformace ve spalovacím motoru [28] 58

Obr. 17: Zvětšený pohled (10 000krát) na kluzný lak zakotvený v základním materiálu. [35] 60

Obr. 18: Pístní kroužek upravený technologií LST: (a) prostorový pohled na kroužek, (b) schematické zobrazení sítě LST, (c) fotografie částečného LST [41] 61

Obr. 19: Gehring, Laser honing [43] 62

Obr. 20: Struktura povrchu válce se stopou bez valu, vytvořenou laserovým honováním [44] 62

Obr. 21: Úprava povrchu vyhonovaných vývrtů válců - Laser honing [44] 62

Obr. 22: Šrouby s různou úpravou povrchů. 63

Obr. 23: Geometrie závitu [63] 65

Obr. 24: Dva základní případ šroubových spojení [66] 66

Obr. 25: Rozložení silových poměru ve šroubovém spoji. [63] ..... - 66 -

Obr. 26: Předepjatý spoj zatížený osovou silou. [31] ..... - 66 -

Obr. 27: Montážní diagram předepjatého šroubového spoje- Rötscherův diagram. [68] 67

Obr. 28: Charakteristika utahování šroubového spoje. [62] 69

Obr. 29: Převod utahovacího momentu na osovou sílu. [68] 69

Obr. 30: Vliv druhu maziva a povrchové úpravy na koeficient tření a utahovací moment a napínací sílu[65] 71

Obr. 31: Příklady správné aplikace maziva [66] 71

Obr. 32: Příklad z praxe-selhání závitu šroubového spoje. 75

Obr. 33: Graf závislosti osové napínací síly na utahovacím momentu a koeficientech tření. [65] 76

Obr. 34: Charakteristiky únavové pevnosti pro, 1. Válcované závity, 2. Kaleno-popuštěno s následným válcováním závitu [62] 78

Obr. 35: Řez brzdovou deskou-1.zakladni ocelová deska, 2. Přechodová adhezní vrstva, 3. třecí materiál. [90] 80

Obr. 36: Sestava měřícího zařízení, pro zkoušení parametrů motoru [93] 89

Obr. 37: Schéma nabroušení tabely před měřením ..... - 95 -

Obr. 38: Popis směrů měření drsností ..... - 95 -

Obr. 39: Pracoviště měření drsností tablet a desek 96

Obr. 40: Schématický popis tribometru TOP 3 96

Obr. 41: Program Chargemeter 5015A pro záznam měřených dat. 97

Obr. 42: Vzorové vyhodnocení koeficientu tření a jeho charakteristiky v programu Matlab..... 97

Obr. 43: Detailní pohled na tribometr TOP 3 – měření koeficientů tření různých maziv 107

Obr. 44: Kalibrační měření na tribometru Rtec 109

Obr. 45: Schématický model sestavy zkušebního členu ..... - 111 -

Obr. 46: Zkušební měřící člen ..... - 111 -

Obr. 47: 3D model navrženého měřicího zařízení pro zjišťování třecích momentů ve šroubovém spoji 112

Obr. 48:Sestava zrealizovaného měřícího zařízení, včetně snímání prodloužení dříku šroubu. 112

Obr. 49: Vzorky spojovacího materiálu, se závity M6, M8, M10, PÚ-galvanické zinkování 113

Obr. 50: Celková sestava tribometru VRT02 121

Obr. 51:Schématický popis tribometru VRT 02 122

Obr. 52:Tenzometrický snímač síly 123

Obr. 53: Detail měření drsnosti povrchu vzorku pomocí drsnoměru mitutoyo 124

Obr. 54: Spektrometr BAS Delta pro určování chemického složení materiálu [P1] 124

Obr. 55: Náčrt dílů funkční dvojice (FD) 125

Obr. 56: Funkční dvojice OCEL / DURAL před (vlevo) a po testu (vpravo) 135

Obr. 57: Funkční plocha vzorku A. 143

Obr. 58: Funkční plocha vzorku B. 145

Obr. 59: Funkční plocha vzorku C. 146

Obr. 60: Funkční plocha vzorku D. 147

Obr. 61: Funkční plocha vzorku E. 148

Obr. 62:Nové schéma volby dotahovacího momentu pro praktické použití. 154

Seznam tabulek

Tab. 1: Přehled emisních norem EURO pro kategorii osobních vozidel [9] 27

Tab. 2: Klasifikace třídy podle SAE [15] 46

Tab. 3: Přehled materiálů a tříd pevnosti šroubů. [64] 65

Tab. 4: Hodnoty vybraných součinitelů tření v závitu. [63] 70

Tab. 5: Základní frikční materiály a jejich koeficienty tření nebo uvedené v literatuře [80] 81

Tab. 6: Naměřené hodnoty hmotné spotřeby paliva při volnoběhu motoru 91

Tab. 7.: Naměřené hodnoty měrné spotřeby paliva (MS) při 2500 ot/min 92

Tab. 8: Emisní hodnoty CO_2 v závislosti na čase 93

Tab. 9: Mísící poměr oleje s aditivem 94

Tab. 10: Silové vstupní parametry tribologického testu 95

Tab. 11: Hodnoty koeficientu tření ocel – ocel, použitý olej 15 000km, tableta 60° 98

Tab. 12: Hodnoty koeficientu tření ocel – ocel, použitý olej 15 000km, tableta 60° 99

Tab. 13: Hodnoty koeficientu tření motorového oleje – kilometrový nájezd 102

Tab. 14: Naměřené hodnoty koeficientů tření vybraných maziv při zatížení 2 kg 108

Tab. 15: Naměřené hodnoty koeficientů tření vybraných maziv při zatížení 2 kg na tribometru Rtec 109

Tab. 16: Doporučené hodnoty utahovacích momentů a vypočtené hodnoty osové síly. 114

Tab. 17: Vypočtené parametry závitů 114

Tab. 18: Materiály testované funkční dvojice 123

Tab. 19: Specifikace vstupních silových parametrů 125

Tab. 20: Chemické složení testovaných materiálů 126

Tab. 21: Vstupní parametry tribologického testu FD I. -01 127

Tab. 22: Naměřené hodnoty – funkční dvojice Ocel/ Dural 127

Tab. 23: Naměřené hodnoty – funkční dvojice Ocel/ Bronz 130

Tab. 24: Vstupní parametry tribologického testu FD I. -03 135

Tab. 25: Naměřená data funkční dvojice ocel- dural, zatížení 29,921 [N] 135

Tab. 26: Naměřená data funkční dvojice ocel- ocel 316 L, zatížení 29,921 [N]..... 137

Seznam grafů

Graf 1: Hodnoty snížení emisí CO2 stanovené dohodou ACEA, včetně budoucích prognóz. [9] 30

Graf 2: Hodnota emisí vycházející z nařízení Evropské Unie č. 443/2009 [9] 31

Graf 3.: Průběh pasivních odporů v motoru s přípravkem SVS..... 91

Graf 4.: Hmotná spotřeba paliva s přípravkem SVS..... 92

Graf 5: Závislost emisí na čase testu, testovaný motor se zkoušeným aditivem v motorovém oleji 10W 40 93

Graf 6: Závislost koeficientu tření na čase, ocelové tablety, nový olej..... 100

Graf 7: Závislost koeficientu tření na čase, ocelové tablety, použitý olej 10 000km. 100

Graf 8: Závislost koeficientu tření na čase, ocelové tablety, použitý olej 15 000km. 101

Graf 9: Závislost koeficientu tření na čase, použitý olej 20 000km. 101

Graf 10: Závislost koeficientu tření na čase, použitý olej 20 000km, aditivum IF WS_2 3%. 101

Graf 11: Závislost koeficientu tření na čase, použitý olej 20 000km, aditivum IF WS_2 3%. 102

Graf 12: Porovnání koeficientů tření motorového oleje v závislosti na jeho kilometrovém opotřebení a aditivace pomocí nanočástic. 104

Graf 13: Porovnání grafických závislostí statických koeficientů tření – porovnání olejů 105

Graf 14: Porovnání grafických závislostí dynamických koeficientů tření – porovnání olejů 106

Graf 15: Grafické znázornění naměřených hodnot koeficientů tření maziv na tribometru TOP 3 108

Graf 16: Grafické znázornění naměřených hodnot koeficientů tření maziv na tribometru Rtec 109

Graf 17: Závislost osové síly na utahovacím momentu šroubu – závit M6 115

Graf 18: Zjištěné hodnoty koeficientů tření pro šroubový spoj se závitem M6. 116

Graf 19: Porovnání koeficientů tření naměřených na tribometru TOP 3 a na zařízení FV1. 117

Graf 20: Zjištěné hodnoty koeficientů tření pro šroubový spoj se závitem M8. 117

Graf 21: Závislost osové síly na utahovacím momentu šroubu – závit M8. 118

Graf 22: Porovnání koeficientů tření naměřených na tribometru TOP 3 a na zařízení FV1 -závit M8. 119

Graf 23: Zjištěné hodnoty koeficientů tření pro šroubový spoj se závitem M10. 119

Graf 24: Porovnání koeficientů tření naměřených na tribometru TOP 3 a na zařízení FV1-závit M10. 119

Graf 25: Závislost osové síly na utahovacím momentu šroubu – závit M10. 120

Graf 26: Vývoj hmotnostního úbytku FD1 na čase – Ocel/ Dural, zatížení 1kg. 128

Graf 27: Vývoj koeficientu tření FD1 na dráze – Ocel/ Dural, zatížení 1kg. 128

Graf 28: Vývoj koeficientu tření na dráze – Ocel/ Ocel 316L, zatížení 1kg. 129

Graf 29: Vývoj hmotnostního úbytku na čase – Ocel/ Ocel 316L, zatížení 1kg. 129

Graf 30: Vývoj koeficientu tření na dráze – Ocel/ Bronz, zatížení 1kg. 130

Graf 31: Vývoj hmotnostního úbytku na čase – Ocel/ Bronz, zatížení 1kg. 130

Graf 32: Vývoj hmotnostního úbytku na čase – Ocel/ Titan, zatížení 1kg. 131

Graf 33: Vývoj koeficientu tření na dráze – Ocel/ Titan, zatížení 1kg. 131

Graf 34: Vývoj hmotnostního úbytku na čase – Ocel/ Měď, zatížení 1kg. 132

Graf 35: Vývoj koeficientu tření na dráze – Ocel/ Měď, zatížení 1kg. 132

Graf 36: Průběh hmotnostního úbytku FD OCEL/ Mosaz v závislosti na čase testu, zatížení 1kg. 133

Graf 37: Průběh koeficientu tření FD OCEL/Mosaz v závislosti na dráze testu, zatížení 1kg 133

Graf 38: Průběh hmotnostního úbytku FD OCEL/ šedá litina v závislosti na čase testu, zatížení 1kg. 134

Graf 39: Průběh koeficientu tření FD OCEL/šedá litina v závislosti na dráze testu, zatížení 1kg..... 134

Graf 40: Vývoj hmotnostního úbytku FD1 na čase – Ocel/ Dural, zatížení 29,921 [N] .. 136

Graf 41: Průběh koeficientu tření FD OCEL/DURAL v závislosti na dráze testu, 29,921 [N] 136

Graf 42: : Průběh hmotnostního úbytku FD OCEL/Ocel 316L v závislosti na čase testu, 29,921 [N]..... 137

Graf 43: Průběh koeficientu tření FD OCEL/Ocel 316L v závislosti na dráze testu, 29,921 [N]..... 138

Graf 44: Průběh hmotnostního úbytku FD OCEL/Bronz v závislosti na čase testu, 29,921 [N]..... 138

Graf 45: Průběh koeficientu tření FD OCEL/Bronz v závislosti na dráze testu, 29,921 [N] 139

Graf 46: Průběh hmotnostního úbytku FD OCEL/Titan v závislosti na čase testu, 29,921 [N]..... 139

Graf 47: Průběh koeficientu tření FD OCEL/Titan v závislosti na dráze testu, 29,921 [N] 140

Graf 48: Průběh hmotnostního úbytku FD OCEL/ Měď v závislosti na čase testu, 29,921 [N]..... 140

Graf 49: Průběh koeficientu tření FD OCEL/Měď v závislosti na dráze testu, 29,921 [N] 141

Graf 50: Průběh hmotnostního úbytku FD OCEL/ Mosaz v závislosti na čase testu, 29,921 [N]..... 141

Graf 51: Průběh koeficientu tření FD OCEL/Mosaz v závislosti na dráze testu, 29,921 [N] 142

Graf 52: Průběh hmotnostního úbytku FD OCEL/ šedá litina v závislosti na čase testu, 29,921 [N]..... 142

Graf 53: Průběh koeficientu tření FD OCEL/ šedá litina v závislosti na dráze testu, 29,921 [N]..... 143

Graf 54: Průběh hmotnostního úbytku FD OCEL/ vzorek A v závislosti na čase testu, zatížení 2kg. 144

Graf 55: Průběh koeficientu tření FD OCEL/vzorek A v závislosti na dráze testu, zatížení 2kg..... 144

Graf 56: Průběh hmotnostního úbytku FD OCEL/ vzorek B v závislosti na čase testu, zatížení 2kg. 145

Graf 57: Průběh koeficientu tření FD OCEL/vzorek B v závislosti na dráze testu, zatížení 2kg..... 145

Graf 58: Průběh hmotnostního úbytku FD OCEL/ vzorek C v závislosti na čase testu, zatížení 2kg. 146

Graf 59: Průběh koeficientu tření FD OCEL/vzorek C v závislosti na dráze testu, zatížení 2kg..... 146

Graf 60: Průběh hmotnostního úbytku FD OCEL/ vzorek D v závislosti na čase testu, zatížení 2kg. 147

Graf 61: Průběh koeficientu tření FD OCEL/vzorek D v závislosti na dráze testu, zatížení 2kg..... 148

Graf 62: Průběh hmotnostního úbytku FD OCEL/ vzorek E v závislosti na čase testu, zatížení 2kg. 148

Graf 63: Průběh koeficientu tření FD OCEL/vzorek E v závislosti na dráze testu, zatížení 2kg..... 148

Graf 64: Porovnání hodnot dynamických koeficientů tření slitinových materiálů 149

Graf 65: Porovnání průměrných hodnot koeficientu tření, navržených materiálů. 150

Seznam použitých zkratek a symbolů

ZKRATKA	SLOVNÍ NÁZEV - cizojazyčně	POPIS - ČESKY
5.6	Bolt strength class	Třída pevnosti šroubu
8.8	Bolt strength class	Třída pevnosti šroubu
10.9	Bolt strength class	Třída pevnosti šroubu
µm	Mikrometer	mikro metr, jednotka délky
ACEA	Automobile Manufactures Association	Evropská asociace výrobců automobilů
B	Boron	Bor, chemické označení prvku
BMW	Bayerische Motoren Werke	Výrobce automobilů
C	Carbon	Uhlík, chem. označení
CO	Carbon monoxide	oxid uhelnatý, chem. označení
CO_2	Carbon dioxide	oxid uhličitý, chem. označení
Cr	Chrome	Chrom, chemické označení prvku
DLC	Diamond Like Carbon	Uhlík v podobě grafitu, chemické označení typu povlaku
EC	European comission	Evropská komise
EEC	European Economic Community	Evropské hospodářské společenství
EKO	Ecology materials	Označení ekologicky šetrných materiálů
EN AW 7075	Aluminium aloy	Označení hliníkové slitiny s vysokou pevností
EURO 1	Europe car norm	označení a stupeň normy pro emise dopravních prostředků
F_k	Contact force	Kontaktní síla
Fo	Force	Osová síla
g/cm^3	Density unit	Jednotka hustoty
GM	General motors	Americký výrobce automobilů
HC	Hydrocarbon	sloučenina vodíku a uhlíku, emise
HRC	Hardness Rockwell C	Tvrdost podleRockwela
JAMA	Japan Automobile Manufactures Association	Japonská asociace výrobců automobilů
K	Axial geometry of thread	Označení osy geometrie závitu
KAMA	Korean Automobile Manufactures Association	Korejská asociace výrobců automobilů
kN	Unit of force	kilo Newton, jednotka síly
LST	Laser Structure Texture	Laserová technologie, vytváří stopy na povrchu materiálu
m	Meter	metr, jednotka délky
Mk	Torque moment	Krouticí moment
mm	Milimeter	milimetr, jednotka délky

Mn	Mangan	Mangan, chemické označení prvku
MoS_2	Molybden sulfide	Sirník molybdenu, chem.označení
MPI	Multi point injection	vícebodové vstřikování paliva do válců motorů zn. Škoda Auto
M_{TH}	friction torque under the bolt head	Moment tření pod hlavou šroubu
M_{TM}	friction torque under the nut	Moment tření pod maticí
N	Newton	Newton, jednotka síly
Nm	Newtonmeter	Newton metr, jednotka momentu
NO_x	Nitrous oxide	oxidy dusíku, chem.označení, emise
Pk	Contact pressure	Kontaktní tlak
PSA	Peugeot Société Anonyme	Evropský automobilový koncern
PTFE	Chemical designation of teflon	Chemické označení teflonu
Q_0	Axial preload	Označní osového předpětí šroubového spoje
ReL	Contractual yield strength of material	Smluvní mez kluzu materálu
Rm	Ultimate strength of material	Mez pevnosti materálu
SAE	Society of Automotive Engineers	Americka společnost upravujicí normy viskozity olejů
SVS	samovosstanoleniva sistema	Samoregulační renovační systém funkčních ploch
S235JR	Construction steel	označení třídy konstrukční oceli
S_s	Contact surfase	Styková plocha
TÜV	Technischer Überwachungsverein	Technické kontrolní sdružení
VW	Volkswagen	Evropský automobilový koncern

ÚVOD

Prosperita a ekonomická vyspělost se doposud všeobecně posuzuje společenskou spotřebou a růstem objemů výroby. Skutečná vyspělost a udržitelnost společenského růstu je však zásadně závislá na vzdělanosti, poznání, a výsledcích lidské tvůrčí invence.

Tyto výsledky lze v technických oborech spatřovat především v potřebné optimální životnosti výrobků, v jejich odolnosti proti opotřebení, v ochraně proti korozi, v bezpečnosti a omezení rizik, ve snížení energetické náročnosti, ve snížení nároků na údržbu, v recyklovatelnosti a v neposlední řadě v ochraně životního prostředí.

Neustále stoupající požadavky na parametry strojů a jejich částí vyžadují stále vyšší kvalitativní parametry jejich vlastností. Téměř vždy mají zásadní důležitost pro jejich funkci a odolnost povrchy materiálů výrobků, jejich stav, kvalita a odolnost proti vnějším vlivům.

Jedním ze základních vnějších vlivů je tření. Tato jedna z fyzikální podstaty a přirozenosti tohoto světa, s níž se člověk setkává po celou dobu své existence, je v řadě případů jevem negativním, ale naopak v mnoha případech potřebnou nezbytností.

Podstatou vývoje člověka je ulehčit si práci, ušetřit energii, ale též dbát o bezpečnost svou i svého okolí. Člověk, jemuž byla dána schopnost svého rozvoje se od pradávna snažil ovládat i podstatu tohoto fenoménu označovaného jako tření, které úzce souvisí s problematikou opotřebení povrchů.

Na základě potřeb hlubšího poznání tření a opotřebení se postupně rozvíjí poznání této interdisciplinární problematiky, až po současný celý vědní obor s názvem Tribologie.

Pod tímto pojmem je v dnešní době vnímána mezioborová věda a technologie (teorie a praxe) zabývající se chováním funkčních dvojic povrchů při jejich vzájemném dotyku, pohybu, nebo při snaze o tento pohyb s cílem praktického využití výzkumu pro oblasti tření, opotřebení a mazání.

Po historickém vývoji těchto oblastí poznání sahajícím od pravěkého rozdělávání ohně třením přes zásadní objevy, které postupně vytvořili Leonardo da Vinci, Amontas, Dasagulier, Reynolds, Brinell, Burwell a celá řada dalších vážených učenců a vědců, se poprvé objevil termín „tribologie“ v roce 1966 v tzv.Jostově zprávě (Jost Report) vypracované pro vládu Velké Británie, upozorňující na interdisciplinární charakter tribologie a na úspory, kterých lze dosáhnout využíváním poznatků této vědy i technologie.

Více jak 50 národních tribologických společností a výborů, které navzájem propojuje International Tribology Council (ITC) se sídlem v Londýně pomáhají celosvětovému rozvoji v úsporách materiálů, energií a investic. Nejnovějším samostatným směrem rozvoje tribologie je oblast nazývaná „Zelená tribologie“ (Green Tribology), která se zaměřuje na kvalitu života a životní prostředí.

Koncept tohoto celosvětově velmi potřebného směru „Zelená tribologie“, který formuloval poprvé v Londýně v roce 2009 čínský profesor Si-wej Zhang, přináší stále více aktuální reakci na politicko-ekonomickou situaci naší technicky vyspělé společnosti.

Technický rozvoj, poznávání dalších technologických skutečností, ale i environmentální uvědomování přinášejí zcela nové možnosti a potřeby v celé řadě tribologických aplikací, a to i ve strojírenství, včetně automobilového průmyslu.

Jedná se především o využití a aplikace nanočástic, kompozitních a slitinových materiálů i povlaků, další rozvoj spékaných mikrokompozitních a kovokeramických materiálů i možností zcela nových typů maziv včetně využití přírodních organických komponent pro jejich výrobu.

Na základě stále aktuálních požadavků snižování spotřeby energií a tím i ochrany životního prostředí, zároveň však i s ohledem na nové požadavky na zvyšování výkonů uzlů tření (brzdy, spojky) je potřebné sledovat a rozvíjet nová poznání, technická řešení a možnosti celého tribologického oboru pro jeho další potřebné aplikace. To je, v mezích svých přiměřených možností, i snahou této práce.

Cílem této práce je přispět k rozvoji tribologické problematiky, na základě nových současných poznatků i výsledků prováděných experimentů, objasněním a ovlivněním hodnot koeficientů tření.

V rozdílných tribologických aplikacích upozorňuje tato práce na možnosti a nezbytnost využití poznatků o těchto zásadních tribologických parametrech pro blízkou budoucnost i v automobilovém průmyslu, a to v těchto vybraných oblastech:

- Snížení spotřeby energie spalovacích motorů automobilů a následné snížení emisí CO_2,
- Omezení rizik šroubových spojů především při robotické montáži, stanovením přesných hodnot koeficientů tření šroubového spoje,
- Zvýšení výkonů třecích uzlů brzdových systémů automobilů.

1 Teoretická část - Problematika a současnost tribologie v automobilovém průmyslu.

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

1.1 Tribologie

Hlavním obsahem zkoumání tribologie je působení povrchů součástí pří jejich vzájemném pohybu nebo při pokusu o vzájemný pohyb. Rozeznáváme hlavní dva druhy pohybu, valivý a smykový. Problematika tření, opotřebení a mazání má značný význam, protože má vliv na životnost a spolehlivost strojů a zařízení, i na výši provozních nákladů. [1,2]

Základní systém tribologie je tvořen, dvěma třecími tělesy, mezi látkou a okolním prostředím. V tomto systému dochází k procesu tření, a opotřebení, tyto děje jsou ovlivněny hlavními provozními podmínkami, které jsou: rychlost pohybu, druh pohybu, velikost zatížení, a teplota. [2]

Obor tribologie je velmi důležitým oborem technického vývoje i z ekonomického hlediska. Tření a opotřebení má negativní vliv na spotřebu energie i na zvyšující se provozní náklady. S parametry tření a opotřebení úzce souvisí životnost strojů a zařízení. Tribologickými poznatky je nutné se řídit již při návrhu a konstrukci stroje a zajistit tak vhodné tribologické podmínky, které je nutné dodržovat správnou údržbou stroje, a tím dosáhnout jejich požadované životnosti. [2]

1.1.1 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 CO_2 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, razantním způsobem tlačí 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 CO_2 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 dobíjet 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]

1.1.2 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+NOx	NOx	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 (CO_2), 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 CO_2 v závislosti na roku výroby vozidla.

- snížení emisí CO_2 z hodnoty 186 g CO_2/km na hodnotu 140 g CO_2/km, s cílem splnění do roku 2008, kdy by tato změna znamenala snížení hodnoty o 25 %.[9]
- nezbytné snížení emisí CO_2 na maximální hodnotu 170 g CO_2/km do roku 2003;
- rozšíření dohody o cíl snížení emisí CO_2 na hodnotu 130 g CO_2/km s cílem splnění do roku 2015 – tato hodnota je povinná pro všechny výrobce vozidel; v současné době je hodnota 130 g CO_2/km platná. [9], [10]
- hodnota emisí 95 g CO_2/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 CO_2 [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 CO_2, 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 CO_2 výrobce překračují cíl pro specifické emise o více než 3 g CO_2/km, bude poplatek vypočítán:

95 EUR/g CO_2/km × počet nových osobních automobilů *(1.1)*

- Pokud průměrné specifické emise CO_2 výrobce překračují cíl pro specifické emise o více než 2 g CO_2/km, avšak nejvýše o 3 g CO_2/km, bude poplatek vypočítán:

25 EUR/g CO_2/km × počet nových osobních automobilů *(1.2)*

- Pokud průměrné specifické emise CO_2 výrobce překračují cíl pro specifické emise o více než 1 g CO_2/km, avšak nejvýše o 2 g CO_2/km, bude poplatek vypočítán:

15 EUR/g CO_2/km × počet nových osobních automobilů *(1.3)*

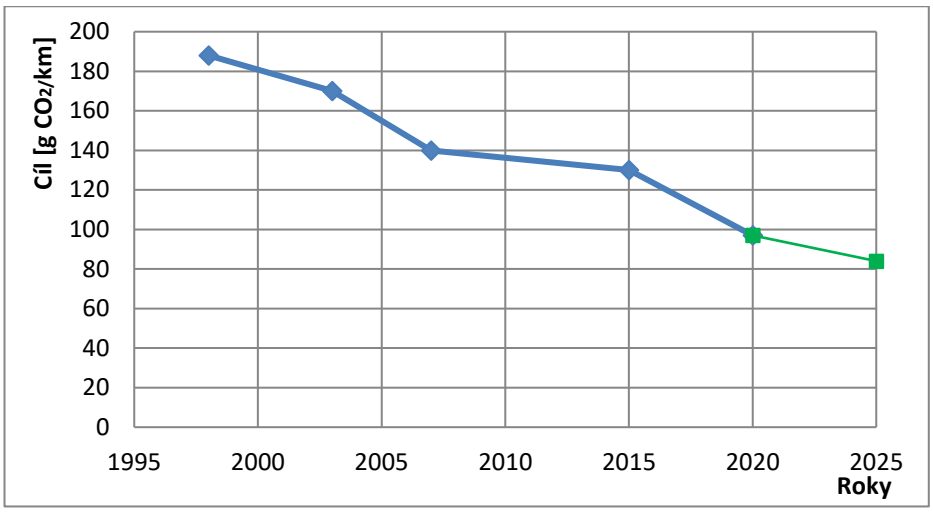
- Pokud průměrné specifické emise CO_2 výrobce nepřekračují cíl pro specifické emise o více než 1 g CO_2/km, bude poplatek vypočítán:

5 EUR/g CO_2/km × počet nových osobních automobilů [11], [12] *(1.4)*

b) Období od roku 2019:

95 EUR/g CO_2/km × počet nových osobních automobilů *(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 CO_2 [g/km], kterou může nově vyrobené vozidlo produkovat. Jedná se o hodnotu přímé emise, jak popisuje výše kapitola 2.1.2. Tato hodnota je každoročně stanovena a upravována samotným výrobcem vozidla, základem pro její výpočet je hmotnost daného automobilu. [9, 14]

$$\text{Emise } CO_2 = T + a \times (M - M_0) \qquad (1.6)$$

Kde *Emise CO2* je celková výsledná hodnota vyprodukovaného CO_2 [g] na 1 [km]

T – CO_2 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]

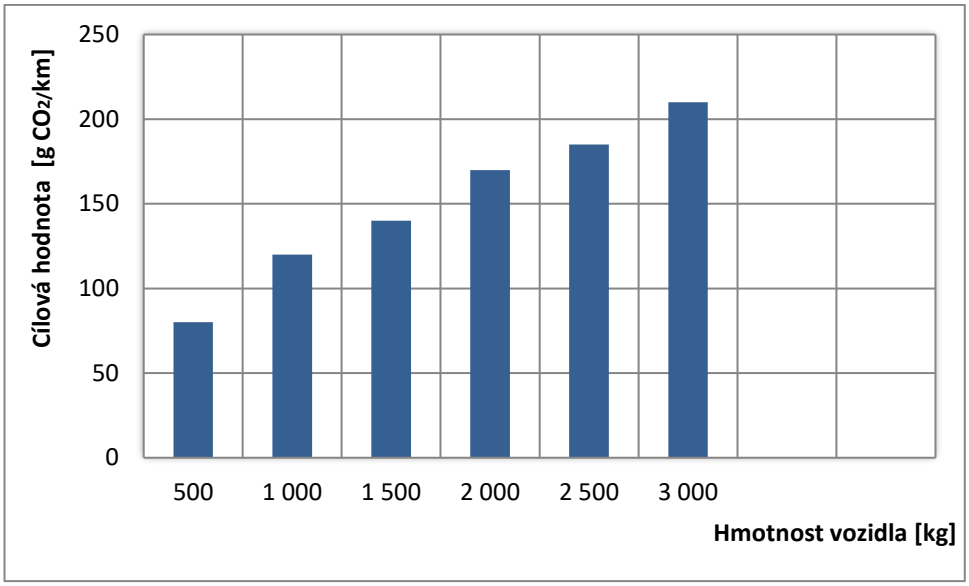
M0 – průměrná hmotnost vozidla [kg]

M0 = 1372 kg pro kalendářní roky 2012-2015.

M0 = 1392,4 kg pro roky 2016-2019.

Hodnota průměrné hmotnosti vozidla M0 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]

1.1.3 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 opotřebení 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]

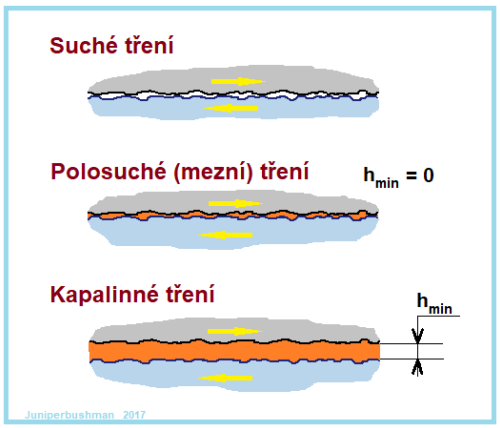
Stále větší požadavky na efektivitu, produktivitu a ekologii technických procesů je dán též tím, že se stále vyvíjejí složitější a náročnější produkty s vyššími, kterým je z hlediska tribologie nutno věnovat větší pozornost splnění těchto požadavků. S vyššími rychlostmi, větším zatížením, teplotou i s vyššími tlaky vstupuje do popředí použití tuhých a plynných maziv, stejně tak jako vytváření nových funkčních povrchových vrstev, které splňují lepší požadavky na životnost a odolnost proti opotřebení. Proto se v oboru tribologie mimo jiné vyvinula celá řada samostatných odvětví zkoumající podrobně využití poznatků o této problematice. [14], [15].

1.2 Tření

Tato kapitola popisuje typy a principy tření, jejich rozdělení. Dále rozděluje a rozebírá problematiku mechanických ztrát a parametrů ovlivňující jejich velikost.

1.2.1 Suché tření

V případě suchého tření se dostávají do přímého kontaktu nerovnosti a výstupky třecích ploch a povrchů. V těchto místech může docházet k abrazi, tedy k působení jednoho povrchu výstupky do druhého povrchu. Mohou vznikat studené spoje a mikrosváry, které jsou typické pro adhezi. Při takovémto opakovaném zatěžování povrchu může dojít ke vzniku a šíření trhlin, což se může projevit až únavovým poškozením povrchu materiálu. Na základě těchto dějů dochází k uvolňování mikročástic povrchů funkčních dvojic a k jejich přemisťování v daném systému. Postupně tak dochází ke změnám rozměrů a tvarů třecích ploch. [16], [17]



Obr. 1: Schématické rozdělení druhů tření [16]

1.2.2 Mezní tření

Mezní tření nastává v případě, kdy je mezi třecími povrchy tenká vrstva kapaliny nebo plynu. K meznímu tření může docházet z důvodu nedostatečného přívodu maziva, snížení rychlosti u hydrodynamicky mazaných součástí nebo u velkého zatížení, či při startu stroje, respektive automobilu (start- stop systém). Za těchto podmínek se třecí plochy přiblíží a dělí je od sebe jen minimální vrstva maziva. Vrstva maziva snižuje tření, ale je tak malá, že nedokáže zabránit styku výstupků nerovností povrchu. Z tohoto důvodu dochází k většímu opotřebení než v případě kapalinného tření. [17, 18]

1.2.3 Kapalinné tření

Mazivo jako funkční kapalina smáčí třecí plochy a má k nim takovou přilnavost, že lze předpokládat, že mezi mazivem a povrchem třecí plochy nenastane žádný skluz. Vrstva maziva zabrání vzájemnému styku povrchů a vyrovná drsnost povrchů. Třecí síla

F_t je tedy závislá pouze na velikosti vnitřního tření v tloušťce mazacího filmu a lze ji popsat matematickým vztahem:

$$F_t = \eta \cdot \frac{S \cdot v}{h} \qquad (1.7)$$

Kde:

η je dynamická viskozita [1],

S je styčná plocha povrchů [mm^2],

v je lineární rychlost pohybu povrchů [m/s],,

h je tloušťka vrstvy maziva [mm].

Aby byla mazací vrstva schopna snášet zatížení, kterým jsou k sobě povrchy stlačovány, musí být v mazivu vytvořen odpovídající protitlak. Tohoto protitlaku lze dosáhnout dvěma způsoby. [19]:

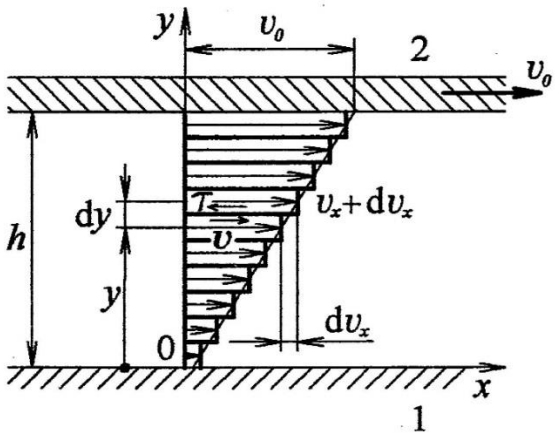
- Hydrostaticky
- Hydrodynamicky

Přesná specifikace typů mazání je popsána v kapitole o mazivech a mazání. (viz. kap. 1.3)

1.2.4 Tření v kapalinách

Tření probíhá ve všech prostředích, tedy i v kapalinách. Tento jev se popisuje jako odpor tekutiny proti změně tvaru. Je přímo úměrně ovlivněn jednou z hlavních vlastností kapalin a to viskozitou. Působením sil mezi molekulami tohoto média vznikají při proudění tekutiny třecí síly mezi sousedními vrstvami, které se pohybují různými rychlostmi. [19]

Tyto síly jsou nazývané vnitřním třením, mají tečný směr k povrchu a působí tak, že urychlují pohyb pomalejší vrstvy a zpomalují pohyb rychlejší vrstvy. Vrstva kapaliny, která je v bezprostředním styku s pevným tělesem, se díky vnitřnímu tření mezi kapalinou a pevným tělesem nepohybuje. [20, 21]



Obr. 2: Schéma průběhu tření v kapalinách [19]

Na obrázku č. 2 jsou zobrazeny dvě desky, mezi kterými je vrstva kapaliny. Spodní deska (na obrázku označena 1), je ve statickém stavu-klidu a horní deska (2) se vykonává přímočarý pohyb o konstantní rychlosti ve směru roviny desky. [19, 22]

Pokud není rychlost horní desky relativně vysoká, kapalina proudí laminárně, tj. proudí ve vrstvách, které se vzájemně nemísí. Působením vnitřního tření se uvedou do pohybu všechny vrstvy kapaliny s výjimkou vrstvy, která přiléhá ke spodní desce, vůči které je v klidu. Vrstva kapaliny přiléhající k horní desce je vůči této desce také v klidu a spolu se tedy pohybují konstantní rychlostí. Působením vnitřního tření se vrstvy kapaliny pohybují rychleji, čím více jsou vzdáleny od pevné desky. [19, 22]

1.2.5 Smykové tření

Smykové nebo také kluzné tření probíhá mezi dvěma tělesy při posuvném pohybu jednoho po druhém a je popisováno jako odpor proti pohybu vznikající v oblasti styku povrchů. Tento druh tření může probíhat buď jako čisté tření mezi plochami těles nebo jako tření v tzv. adhezních vrstvách. K čistému tření dochází především ve vakuu. Vyleštěné rovinné povrchy kovových těles k sobě přilnou velkou silou způsobenou difúzí atomů, až dojde k vytvoření pevných spojů s pevností mikrosvarů. V běžném prostředí dochází na povrchu kovu k jeho rychlé mikrooxidaci respektive pasivaci a to případně i působením dalších látek z okolí. [18], [20]

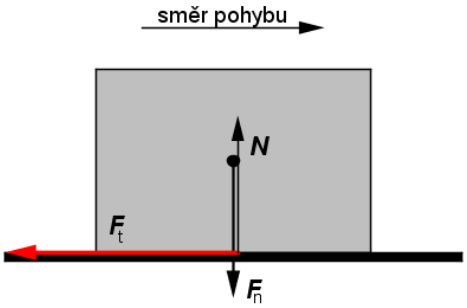
Při vzájemném pohybu povrchů dochází k opotřebení a vytváří se adhezivní vrstvy. Třecí síla je způsobována difúzí atomů dotýkajících se povrchů, kde vznikají mikrosvary mezi výstupky nerovností. Další možností vzniku třecí síly je zachytáváním nerovností povrchů, nebo jiných části, které se vtěsnaly mezi povrchy, v místě kde síla působí pružné a plastické deformace. Velikost třecí síly F_t mezi těmito povrchy těles je závislá na hodnotě přítlačné normálové síly a platí: [20]

$$F_t = \mu \cdot F_n \qquad (3)$$

Kde:

μ je koeficient tření materiálů,

F_n je normálová přítlačná síla.



Obr. 3: Síly při kluzné tření [20]

Kde:

N je normálová síla reakce podložky,

F_n je normálová přítlačná síla,

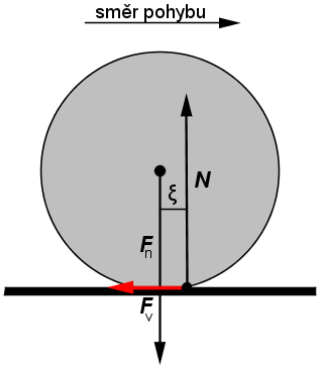
F_t je třecí síla.

1.2.6 Valivé tření

Valivé tření vzniká při valení tělesa po podložce. Dochází k rozdílným deformacím podložky a valivé plochy tělesa. Při vzniku těchto deformací a následném zpětném odpružení vznikne rozdíl mezi uběhlou vzdáleností na povrchu tělesa a podložky. Dochází tedy k malým prokluzům. Díky vnitřnímu tření je část přivedené energie při vzniku a zpětném odpružení elastických deformací změněna na teplo. Vzniklé deformace nemusí být jen elastické, ale mohou tak vznikat též plastické deformace. Energie vynaložená ke vzniku plastických deformací způsobuje také ztráty. Další ztráty vznikají při prokluzu tělesa a podložky, kde dochází ke smykovému tření. K minimalizování valivého tření se na třecí kontakty používají povrchově upravené povrchy, kde jsou deformace a s nimi spojené ztráty velmi malé. [21]

Pro výpočet valivé třecí síly F_v platí vztah [21]: $F_v = F_n \cdot \frac{\xi}{R}$ *(1.8)*

Kde: F_n je normálová síla, ξ je rameno valivého odporu, R je poloměr valícího se tělesa



Obr. 4: Silové poměry valivého tření [21]

1.2.7 Parametry ovlivňující mechanické ztráty motorů

Z pohledu tribologie v oblasti spalovacích motorů jsou v literatuře [28] uváděny dvě hlavní skupiny mechanických ztrát:

- Ztráty třecí
- Ztráty ventilační

V každé části motoru se projevují zmiňované ztráty v různé velikosti. Samozřejmě se ztráty projevují značnou měrou na velikosti výkonu, spotřebované energie, účinnosti a spolehlivosti komponent či zařízení spojených přímo s hnací jednotkou, nebo zakomponovaných do motoru.

Mezi tato pomocná zařízení zařazujeme [28]:

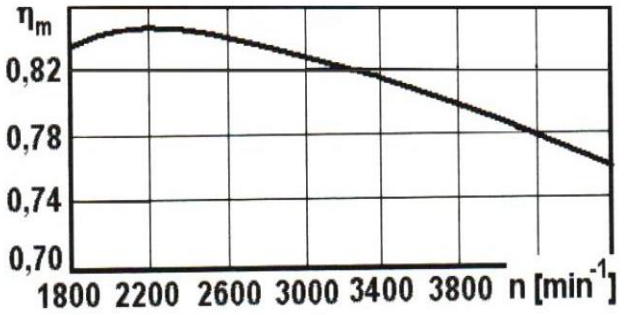
- Zdroje elektro energie nezbytné pro funkci motoru
- Čerpadla – mazání a chlazení
- Čerpadla palivového systému
- Kompresory či dmychadla závislá na mechanické energii motoru
- Ventilátory zlepšující chlazení – závislé na mechanické energii motoru

V podstatě každý motor je sám o sobě originál, respektive je něčím výjimečný, a to stavbou, uspořádáním, a použitými materiály. Jedním z hlavních srovnávacích parametrů je mechanická účinnost, a to nejen motoru, ale i již zmiňovaných pomocných zařízení. Proto je důležité pečlivě zvážit, která zařízení zohlednit při výpočtu mechanické účinnosti η_m:

$$\eta_m = \frac{P_e}{P_i} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} P_z}{P_i} \; [-] \qquad (1.9)$$

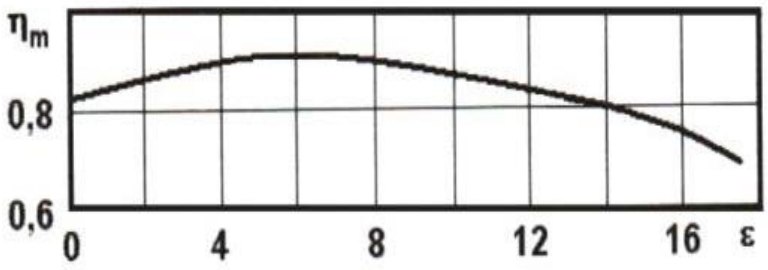
Kde: P_e[W] efektivní výkon motoru, P_i [W], výkon indikovaný, ΣP_z [W] suma zohledněných mechanických ztrát (P_z ztrátový výkon).

Na základě působení mechanických ztrát klesá výkon motoru, a to jak uvádí literatura [34] až o 20%. To závisí na mnoha faktorech, v prvé řadě na kvalitě technologického vyhotovení a otáčkovém rozpětí motoru. Na následujících charakteristikách (obr. 5 a 6) jsou vyobrazeny závislosti mechanické účinnosti na otáčkách a stupni komprese, který je závislý na přesnosti a povrchové kvalitě obrobených ploch. [25], [34]



Obr. 5: Obecná charakteristika mechanické účinnosti motoru na jeho otáčkách.

Při konstantní hodnotě zatížení, při zvyšujících se otáčkách a pracovních tlacích, mechanická účinnost klesá.



Obr. 6: Obecná charakteristika mech. účinnosti motoru $[\eta_{m}]$ *v závislosti na stupni komprese* $[n]$*. [25]*

Každý motor je charakterizován souborem mnoha parametrů a podmínek, které je potřeba při jeho hodnocení zohlednit. Nejvhodnějším hodnotícím faktorem je efektivní účinnost. [24]

$$\eta_e = \eta_{ch} . \eta_t . \eta_p . \eta_m = \eta_i . \eta_m \; [-] \qquad (1.10)$$

Kde:

η_e [-] účinnost efektivní,

η_{ch} [-] účinnost chemická,

η_t [-] účinnost tepelná,

η_p [-] účinnost stupně plnosti diagramu,

η_m [-] účinnost mechanická,

η_i [-] účinnost indikovaná,

Výše uvedený vztah popisuje efektivní účinnost jako součin dílčích účinností. Jak uvádí zdroj [24], 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 %. [28]

1.3 Mazání

Trendem automobilového průmyslu je snižování provozních nákladů, zvyšování výkonů a v dnešní době plnění stále přísnějších emisních požadavků. Při návrhu jakéhokoli zařízení nebo z pohledu automobilů, motorů, jak vznětové, tak i zážehové, se klade důraz na kompaktnost, velikost zastavěného prostoru a jeho hmotnost, kterou zásadně ovlivňuje volba materiálu a konstrukce. Vyvinout motor, který má splňovat všechny tyto požadavky, vytvářené kupní poptávkou zákazníků, či ekologů, řeší každý výrobce aut. Proto je důležité zvolit vhodnou konstrukci, výrobní technologie, aby výroba a na ni navázané činnosti působily co nejmenší náklady a hlavně, aby výrobky -automobily splňovala dané požadavky funkčnost a trvanlivost. Se spolehlivostí a životnost pohonné jednotky přímo souvisí mnoho parametrů a ty jsou zase závislé na parametrech mazání.

1.3.1 Mazání motorů

Hlavní úkoly maziva v případě spalovacích motorů patří snižování třecích ztrát, a to tím způsobem, že vytváří mezi vzájemně se pohybujícími součástmi vrstvu, která udržuje, pokud možno za každých podmínek kapalinné tření. To však není vždy možné a to hlavně z důvodů malých relativních rychlostí stýkajících se povrchů. Dalšími úkoly olejové vrstvy je odvádět teplo z ložisek a vysoce tepelně namáhaných součástí, jako jsou především písty, napomáhat dotěsnit spalovací prostor, oplachovat funkční plochy nečistot od produktů vytvořených otěrem a spalováním. Dále pak tlumit vibrace a konzervovat vnitřní části motoru a kontaktní plochy mimo pracovní dobu. [22]

Mazání čtyřtaktního motoru jak uvádí zdroj [46], se provádí olejem, jež je přiváděn do funkčních uzlů a uložení pod tlakem, který vyvozuje olejové čerpadlo, nejčastěji zubové. Princip mazání je popsán v kapitole o tření (viz. kap. 1.2.3). Na rozdíl od dvoutaktních motorů, kde jsou pracovní plochy a uložení mazány směsí paliva a oleje, má mazaní čtyřtaktního motoru určitá úskalí.

Hlavně během studených startů motoru dochází k nejméně 50 % jeho celkového opotřebení, protože většina komponent není správně mazána. Při každém odstavení motoru olej stéká do olejové vany a po několika hodinách jsou některé součásti již zcela bez potřebné ochrany. V několika prvních vteřinách po opětovném uvedení do chodu, než je dosažen plný průtok oleje všemi mazanými místy, trpí některé součásti motoru, jako např. pístní kroužky, ložiska, vačky a hrníčková zdvihátka přímým kontaktem kovových ploch, na kterých dochází k nevratnému poškození jejich povrchu. [23], [46]

Mazání pístové oblasti je zajištěno natlačováním maziva do pórů v materiálu, tudíž je nutné použití materiálu, který vykazuje určitou potřebnou pórovitost. [27] V těchto mikro prohlubních se mazivo usadí a následně zajišťuje potřebné mazání. V dalším textu jsou popsány možnosti progresivní technologie pro snižování tření, tyto technologie vytvářejí přesnou síť prohlubní pro přesné rozmístění mazacího filmu.

Tato síť zajišťuje udržení filmu i při velmi mezních stavech mazání respektive udržuje dlouhou dobu kapalinné tření. To přispívá k udržení filmu v oblasti pod horní úvratí a částečně zamezuje únik oleje do okruhu spalování a tím snižuje množství spáleného oleje a jeho emise. [27, 28, 29]

1.4 Maziva

Následující kapitola shromažďuje informace o mazivech, charakterizuje jejich vlastnosti, parametry, nutnost a důsledky jejich aplikace.

1.4.1 Parametry maziv

Tato kapitola popisuje parametry mazacích médií, vliv a charakteristiky těchto parametrů.

1.4.1.1 Viskozita maziva

Základní vlastností charakterizující chování oleje je jeho viskozita. Tento parametr vyjadřuje míru vnitřního tření v samotném oleji a přímo ovlivňuje únosnost olejového filmu. Pokud je viskozita příliš vysoká, tak mazivo výrazně snižuje mechanickou účinnost pohonné jednotky, omezuje průchod oleje ložiskem a třecí práce (která je dosti značná) zvyšuje jeho provozní teplotu. U olejů s extrémně nízkou viskozitou je nepříznivých vlivů mnohem méně, za to jsou dosti podstatné. Tím nejvýznamnějším je malá mazací schopnost. V tom případě by olej nesplňoval jeho zásadní úkol a to zaručovat kapalinné tření v kontaktních dvojicích. Oleje s menší viskozitou mají na rozdíl od těch vysoko viskózních mnoho výhod, mezi které patří lepší chladící účinek, vytváření o mnoho méně úsad ve spalovacím prostoru a lepší čistící účinky.[47]

Dynamická viskozita maziva

Tato vlastnost maziva popisuje závislost na teplotě a tlaku a je dána vztahem:

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{-\beta \cdot (T - T_0) + \alpha \cdot (p - p_0)} \qquad (1.11)$$

Kde:

η [Pa.s^{-1}] je dynamická viskozita,

η_{ch} [-] je účinnost chemická,

η_t [-] je účinnost tepelná,

η_p [-] je účinnost stupně plnosti diagramu,

η_m [-] je účinnost mechanická,

η_i [-] je účinnost indikovaná;

V tomto vztahu (7) je η_0 viskozita při teplotě T_0 a tlaku p_0, piezo koeficient vazkosti $\alpha = (1{,}2\ až\ 2{,}6) \cdot 10^{-8}\ Pa^{-1}$ a součinitel β se určí dosazením dvou známých viskozit pro dvě dané teploty při stejném tlaku. [22]

Kinematická viskozita maziva

Kinematická viskozita určuje podíl dynamické viskozity a hustoty. Vypočítá se ze vztahu (8):

$$\upsilon = \frac{\eta}{\rho} \qquad (1.12)$$

Kde:

υ [m^2.s^{-1}] kinematická viskozita,

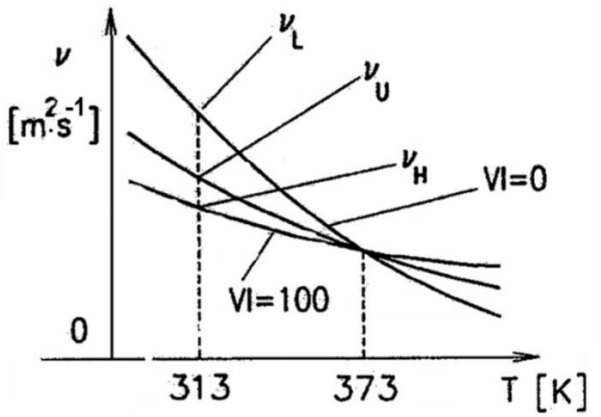
η [mm^2.s^{-1}] dynamická viskozita,

η_{ch} [kg.dm^3] hustota;

Vliv teploty na viskozitu mazacích olejů bývá udáván viskozitním indexem VI. Je to poměrné číslo, které vyjadřuje vliv teploty na změnu viskozity v porovnání se dvěma standartními oleji, které mají při teplotě 98,9°C stejnou viskozitu jako hodnocený olej.

Viskozitní index VI je dán vztahem:

$$VI = \frac{\upsilon_L - \upsilon_U}{\upsilon_L - \upsilon_H} \cdot 100 \qquad (1.13)$$



Obr. 7: Viskózní index. [3]

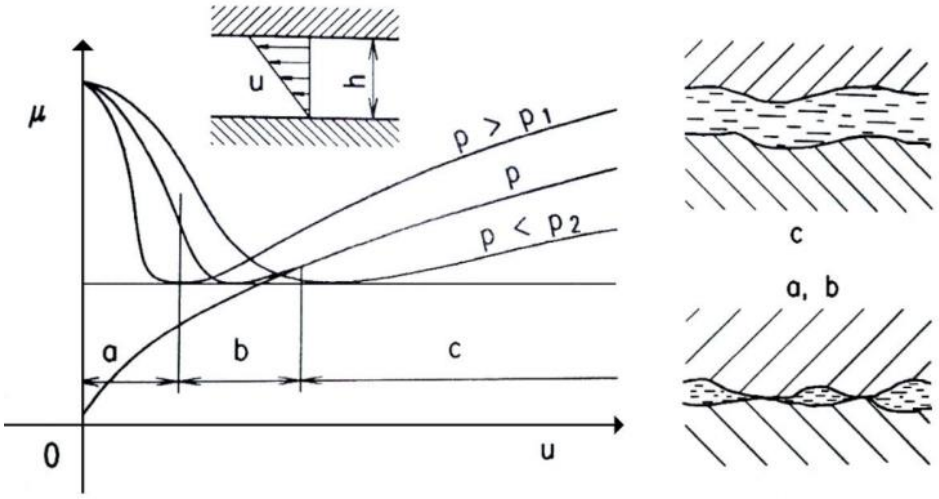
υ_U označuje viskozitu hodnoceného oleje při teplotě 313 K, υ_L viskozitu prvního standartního oleje a υ_H viskozitu druhého oleje. Olej s větším viskozitním indexem má plošší křivku závislosti viskozity na teplotě a dosahuje menší změny viskozity při změnách teploty. [15, 22]

Většina výrobců maziv uvádí viskozitu svých výrobků při 40 °C a 100 °C. Změna ve viskozitě ve vztahu k teplotě je vyjádřena viskozitními indexem. Ten je zpravidla uváděn v tabulce technických údajů každého oleje. Čím vyšší je uváděná hodnota, tím menší změny viskozity lze očekávat při změně teploty. Jedná se tedy o klíčové hledisko, který by měl být zvážen, když uvažujete o přechodu na jiný druh či značku oleje. [47]

Viskozita při 100 °C je klíčová pro všechna zařízení. Je důležité vědět, jaké mají ložiska či převodovky požadavky na viskozitu při provozní teplotě, aby mohlo být použito vhodné mazivo. Pokud je zajištěna vhodná viskozitu, bude docházet k menšímu opotřebení vašich zařízení, čímž bude prodloužena jejich životnost. [19]

1.4.1.2 Závislost součinitele tření na rychlosti funkčních ploch

Závislost součinitele tření na rychlosti u mazaných funkčních kontaktních dvojic udávají tzv. Stribeckovy křivky znázorněné na Obr. 8. Tyto křivky jsou rozděleny na tři oblasti, a to podle režimu mazání, které mezi povrchy nastává. Podrobnější zobrazení kontaktu je znázorněno v detailech a, b, c.



Obr. 8: Stribeckovy křivky udávající závislosti součinitele tření μ na rychlosti u při různých hodnotách tlaku p. [15]

1.4.1.3 Tepelná vodivost maziva

Tato vlastnost maziva je charakterizována součinitelem tepelné vodivosti. Součinitel teplotní vodivosti je materiálová konstanta, která udává schopnost vést teplo. U kapalných maziv je jeho hodnota velmi malá, přibližně $\lambda = 0{,}12$ až $0{,}16\ W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. Se vzrůstající teplotou hodnota tepelné vodivosti klesá a s klesající hustotou roste. [15, 22]

1.4.1.4 Teplota tuhnutí maziva

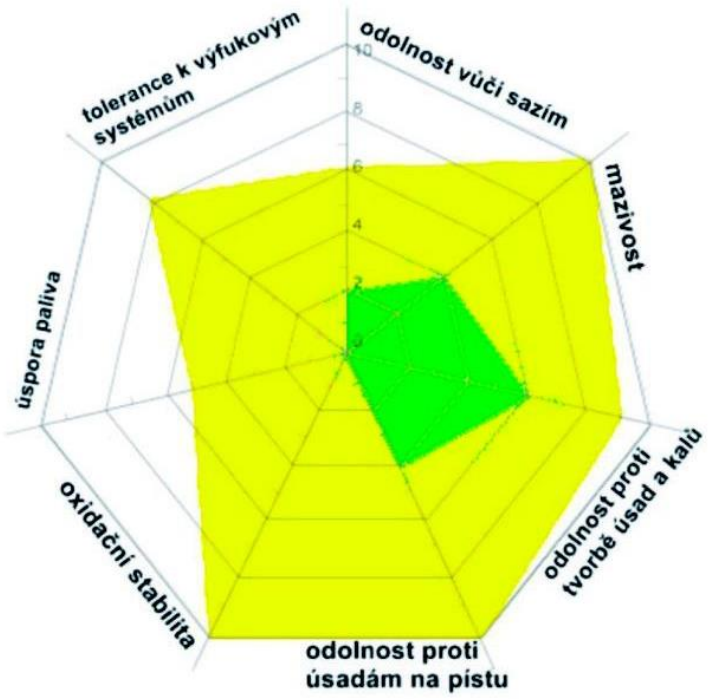
Teplota tuhnutí maziva je nejvyšší hodnota teploty, při které ztrácí olej tekutost a mění se v polotuhou hmotu. Při ochlazování oleje dochází ke změně kapalné fáze na fázi tuhou ve dvou bodech. Prvním bodem je bod zákalu, kde začíná probíhat vylučování krystalů pevné fáze z oleje. Dalším ochlazováním nastane bod tuhnutí, kde olej přechází do tuhé fáze. [22]

1.4.2 Rozdělení maziv

Popisuje typy a rozdělení maziv, jejich složení a změny jejich vlastností v závislosti na okolních podmínkách aplikace.

1.4.2.1 Mazací oleje

Trendem dnešní doby v automobilovém průmyslu a strojírenství je preferované použití nejčastěji olejů, s co možná nejmenší viskozitou, což má pozitivní vliv především na mechanické ztráty a to hlavně z důvodů malých smykových napětí v samotném mazivu. Vývoj a výzkum v oblasti technologie zpracování ropných produktů zaznamenal během posledních přibližně 15 let velký pokrok. [38]



Obr. 9: Porovnání vývoje výkonnosti maziv, kde zelená oblast označuje příklad motorového oleje z roku 1997 a žlutá oblast olej z roku 2012. [33]

- Složení mazacích olejů

Průmyslová maziva jsou složená z 90 % ze základového oleje a z 5 % z aditiv. Základový olej udává chemické vlastnosti hotového oleje. V mnoha případech je chemicky inertní. Výsledný olej je potom označován podle druhu tohoto základového oleje. Základové oleje dělíme podle původu na minerální nebo syntetické. Oleje vyrobené z těchto zdrojů projevují různé vlastnosti a jsou vhodné pro rozdílná použití. [2]

- Minerální oleje

Minerální oleje, označované také jako ropné, jsou komplexní směsi uhlovodíků. Vyrábí se rafinací z ropy. Minerální oleje jsou nejčastěji používanými mazivy v průmyslu. Používají se v aplikacích, kde nejsou kladeny požadavky na velké změny teplot. Cena minerálních olejů je nízká a dokonce s rapidním vývojem syntetických olejů, pevných maziv a polymerů odolných proti opotřebení si stále udržují své místo v mnoha odvětvích průmyslu [2].

Rozlišujeme základní chemické formy olejů [2]:

- Parafinické
- Naftenické
- Aromatické

1.4.2.2 Značení olejů

Pro značení olejů se využívá výhradně klasifikace SAE. Oleje jsou řazeny do jednotlivých tříd podle jejich dynamické a kinematické viskozity. Označení olejů se skládá ze dvou čísel např. SAE 10W/40. První číslo je tzv. zimní číslo viskozity a je určeno při nízké teplotě. Druhé, tzv. letní číslo viskozity je určeno při teplotě 210°F (98,9°C), tedy přibližně při provozní teplotě. Čísla, kterými se značí, jsou bezrozměrná, ale platí, čím je číslo větší tím je olej při dané teplotě viskóznější. [19]

Tab. 2: Klasifikace třídy podle SAE [15]

Viskozitní třída SAE	Vlastnosti za nízkých teplot		Vlastnosti za vysokých teplot	
	Dynamická viskozita [MPa.s^{-1}] max. při °C		Kinematická viskozita při 100°C min. max. [mm$_2$.s^{-1}]	
0W	6200	-35	3,8	
5W	6600	-30	3,8	
10W	7000	-25	4,1	
15W	7000	-20	5,6	
20W	9500	-15	5,6	
25W	13000	-10	9,3	
20			5,6	< 9,3
30			9,3	< 12,5
40			12,5	< 16,3
50			16,3	< 21,9
60			21,9	< 26,1

1.4.2.3 Změna vlastností mazacího oleje

Degradace oleje je jev, který je způsoben v důsledku reakcí s kyslíkem. Velikost a rychlost změn způsobených oxidací je závislá na chemických vlastnostech maziva, na přítomnosti látek zpomalujících oxidační reakce a na teplotě, která výrazně ovlivňuje průběh oxidačních reakcí. [2] V průběhu používání oleje také dochází ke změně viskozity, která může probíhat dvěma směry, zvyšováním nebo poklesem. Zvyšování viskozity je způsobeno produkty oxidace oleje nebo znečišťováním kondenzačními produkty. Ke snižování viskozity dochází díky tepelné a mechanické degradaci aditiv, případně vniknutím paliva do mazacího systému.

Když je viskozita příliš nízká, tak dochází k meznímu až suchému tření s důsledkem nadměrného opotřebení a možností zadření třecích ploch. Vysoká viskozita způsobuje ztráty energie v důsledku zvýšeného koeficientu tření. [22]

Dalším činitelem zhoršujícím kvalitu oleje je voda, která se do mazacího systému dostává jako produkt kondenzace, případně únikem z chladícího systému. Přítomnost vody v oleji podporuje korozi součástí, dále způsobuje pěnění oleje a tvorbu emulze. Kvalitu oleje zhoršují také mechanické nečistoty, jejich přítomnost je způsobena opotřebením třecích povrchů, korozí nebo vniknutím z okolí. Pevné částice obsažené v oleji zvyšují abrazivní a erozivní opotřebení třecích povrchů a také může dojít k jejich zadření, z důvodu porušení mazacího filmu. [2], [19]

Mazací oleje v průběhu provozu ztrácejí své vlastnosti a z důvodů prodloužení životnosti zařízení jsou důležité regenerační procesy, jejich podstatou je obnova původních vlastností maziva. Obnova vlastností probíhá:

- Čištěním olejové náplně
- Doplňováním oleje v průběhu provozu
- Výměnou celé olejové náplně

1.4.2.4 Plastická maziva

Plastická maziva se vyrábí smícháním mazacího oleje, zahušťovadla a aditiva. Olejová složka se skládá z minerálních nebo syntetických olejů a jako zahušťovadla jsou přidávána mýdla, anorganické látky nebo organické polymery. Pro dosažení některých specifických vlastností mohou obsahovat další přísady např. grafit. Použití plastických maziv má výhodu, pokud má aplikované mazivo zůstat na stykových plochách po dlouhou dobu, ale také chrání třecí místo před vnějšími vlivy jako je vlhkost, znečištění koroze atd. Dále jsou plastická maziva používaná v případech, kde by použití mazacího oleje značně zkomplikovalo konstrukci nebo zvýšilo provozní náklady.

Příklady použití:

- U špatně přístupných ložisek, kde je třeba zajistit mazání na dlouhou dobu
- Ve vlhkém a prašném prostředí, kde mazivo utěsní ložisko proti látkám z okolí
- Při malých rychlostech pohybu funkčních ploch,
- Při velkých tlacích a teplotách aplikace
- Tam kde je nutné zabránit odstřikování oleje

Důležitou vlastností pro typ použití plastického maziva je penetrace. To je definováno jako hloubka vniku kovového kužele působením jeho vlastní hmotnosti do maziva při teplotě 25 °C po dobu 5s a souvisí s odporem, který klade plastické mazivo proti vytlačení z daného prostoru. Pro vyjádření penetrace se používá stupeň konzistence. Další důležité vlastnosti jsou odolnost proti vodě, minimální a maximální pracovní teplota. [2], [15]

1.4.2.1 Tuhá maziva

Tuhá maziva jsou pevné látky, které jsou schopné oddělit od sebe povrchy, jež po sobě kloužou. Výhoda tuhých maziv spočívá v odolnosti za vyšších teplot a tlaku. Proto jsou s kluznými laky vhodným mazivem například i pro šroubové spoje. Používaným mazivem je grafit, který odolává teplotám okolo 600° C. [35] Mezi další používaná maziva patří sulfid molybdeničitý, měď, hliník, olovo a nikl. Suchá maziva jsou využívaná tam, kde není vhodné použití olejů nebo plastických maziv.

Takové případy nastávají při velkých zatíženích kluzných kontaktů za vysokých teplot, ve velmi prašném prostředí, při minimální ochraně proti atmosférickým vlivům. Tuhá maziva mají velkou tvrdost, smykovou pevnost a vysokou afinitu ke kovům. Mezi nejpoužívanější tuhá maziva patří grafit, sulfid molybdeničitý a polytetrafluoretylen. Vedle těchto maziv nabírají na významu anorganické fosfáty a oxidy např. pyrofosforečnan zinečnatý, calciumfosfát. [49]

Tyto maziva při kluzném kontaktu reagují fyzikálně a působí jako distanční tělíska, takže se povrchy kovů nedotýkají a nevytváří žádný film. Tuhá maziva se také používají v suspenzích s kapalným mazivem a jako příměsi v plastických mazivech. [35], [47], [48]

1.4.2.2 Plynná maziva

Plynná maziva se používají v uložení hřídelů a v plynových ložiskách s velmi vysokou rychlostí otáčení a malým zatížením. Pro podobné podmínky se také využívají za vysokých teplot, v podmínkách chemické agresivity nebo nebezpečného záření. Plynná maziva mají malou viskozitu, která se s rostoucí teplotou zvyšuje. Výhoda plynného maziva je v nízkém součiniteli tření, dále je to nepatrné třecí teplo a všudypřítomnost maziva ale použití je limitováno menší schopností snášet zatížení.

Mezi nevýhody těchto maziv patří sklon k nestabilitě a turbulenci dále sklon k vysokému frekvenčnímu chvění, nebo k bezprostřednímu styku povrchů. Při použití plynných maziv se klade důraz na těsnost mechanismů, přesnou montáž a hladké třecí plochy. Mezi nejčastěji používané plyny patří vzduch a CO_2 do 650 °C, helium, dusík do 800 °C. [3], [49]

1.4.2.3 Intervaly výměny olejů

Intervaly výměny olejů u spalovacích motorů určuje výrobce motorů (automobilů), nikoli výrobce olejů. Tyto intervaly jsou stanovovány jako maximální, takže by nemělo dojít k jejich překročení. Současní výrobci automobilů se snaží intervaly výměn olejů co nejvíce prodloužit. [50]

Za tímto účelem jsou vyvíjeny nové typy olejů, s označením „Long Life“. Dochází k tomu například u koncernu Volkswagen, pod který spadá i český výrobce vozů Škoda auto, přičemž prodlouženými intervaly výměn se podle literatury [50] Škoda zabývá už od roku 1997. Intervaly výměn u těchto výrobců automobilů jsou [50], běžně u všech vozidel po ujetí 15 000 km nebo po 1 roce, při použití Long Life olejů po ujetí 30 000 km nebo po 2 letech. Intervaly výměn olejů však v praxi při provozu mohou být ovlivňovány různými aspekty, jako jsou [51]:

- Technický stav motoru, kde vlivem špatného stavu může dojít například k pronikání paliva do oleje,
- filtrace vzduchu a oleje, na nichž závisí množství a velikosti cizích částic v oleji,
- režim provozu, kde provoz na krátké vzdálenosti je mnohem náročnější, než provoz na dlouhé vzdálenosti, a to vlivem častých studených startů.

V současné době je snaha používat oleje s nižší viskozitou, jelikož se rychleji promaže motor a snižuje se spotřeba paliva. Uplatnění těchto olejů se projeví hlavně u vozidel s častými starty a krátkým režimem provozu.

Všechny výše uvedené aspekty mohou snižovat interval výměny olejů u konkrétního motoru, proto by bylo ideální provádět pravidelné zkoušky a testování motorových olejů pomocí metod tribotechnické diagnostiky. Následně by bylo možné jednoznačně rozhodnout o možnosti dalšího použití oleje a tím docílit ideálních či prodloužených intervalů výměn oleje. [52]

1.4.2.4 Nové typy maziv a aditiv

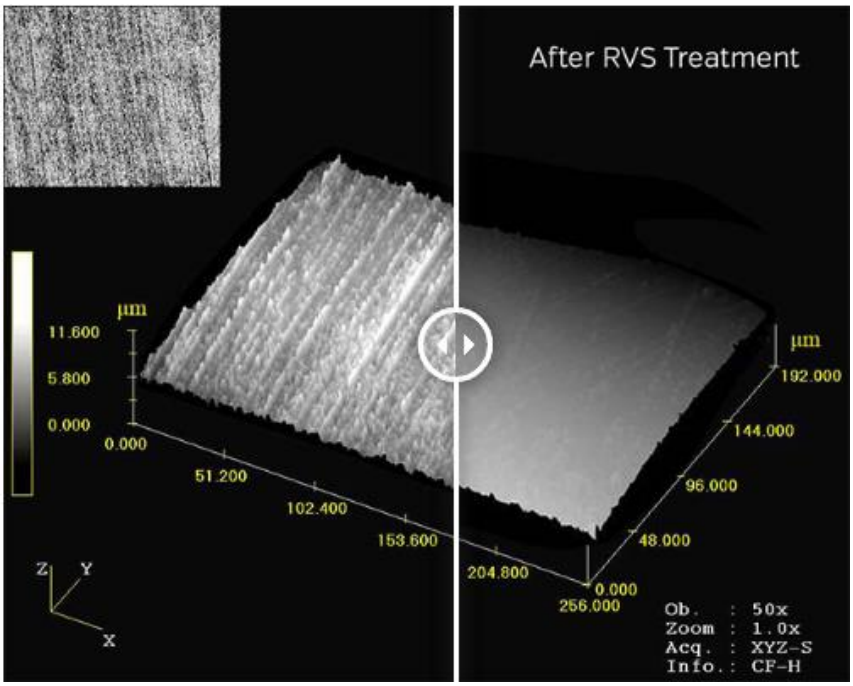
- Maziva a prostředky technologie SVS (samovosstanoleniva sistema)

Renovační technologie SVS povrchů na principu difúze a atomové výměnné reakce způsobené energií tření a přeměnnou kinetické energie. Umožňuje vznik kovo-keramické vrstvy u povrchů namáhaných třením. Vzniklá struktura má velmi vhodné tribologické vlastnosti na povrchu funkčních dvojic a je pevně spojena s upravovaným povrchem.

SVS prostředky jsou jemně disperzní mnohasložkové směsi minerálů, přísad a katalyzátorů. Základní surovinou pro její výrobu je šungit, serpentinit a nefrit. Velikost částic je přibližně 1-10 μm. SVS se nerozpouští v mazadlech, nevstupuje s nimi v chemickou reakci. Nemění viskozitu (kvůli velice malé koncentraci SVS v oleji). Je ekologicky nezávadná jak v prášku, tak i v procesu jejího zabíhávání.

Prostředky SVS se obvykle aplikují do olejů a maziv. Třecí a kluzné povrchy spojených strojních částí jsou ve svém původním stavu tvořeny výstupky a prohlubněmi plnými maziva a odřených částí. Termínem SVS je označované mazivo, technologie, která umí ošetřit a částečně renovovat třecí dvojice kovových ploch mechanismů, jako jsou motory, převodovky a ložiska. Dodává se ve formě oleje, plastického maziva nebo spreje. Při vzájemném pohybu funkčních dvojic dochází ke kontaktu povrchů a výstupky se odírají do mazacího filmu.

V místech kontaktu vznikají vysoké lokální teploty, které podporují výměnné reakce mezi základním materiálem a SVS směsí a vznikají nové kovokeramické vrstvy. Vzniklé kovokeramické částice jsou několikanásobně větší, než je úbytek základního materiálu. Dochází tedy k rozměrovému nárůstu povrchové vrstvy od desetin až po desítky mikrometrů. Což je možné pozorovat na obr. 10. [53]



Obr. 10: Zobrazení povrchu na konfokálním mikroskopu, závislost změn profilu povrchu před (vlevo) a po renovaci(vpravo). [54]

Růst tloušťky se zastaví na optimální hodnotě z důvodu snížení koeficientu tření a tím i energie podporující tvorbu vrstvy. Díky vzniklé kovokeramické vrstvě na povrchu materiálu se podstatně zvýší ochrana proti opotřebení než při použití běžných mazacích prostředků. Z testů společnosti TÜV [54], je patrné, že dochází opravdu i k renovačním procesům, jelikož v průběhu testu docházelo k nárůstu kompresních tlaků. Tato povrchová vrstva dosahuje tvrdosti až 70 HRC a má nízkou hodnotu koeficientu tření. Také má vysokou teplotní odolnost, a korozní odolnost. Těmito prostředky lze dosáhnout ekonomických a ekologických úspor a to z důvodů prodloužení životnosti a maziv na základě snížení koeficientu tření, snížení hodnot drsnosti a snížení provozních teplot. [53], [55]

- Aerotec

Aerotec Metal Conditioner je syntetická kapalina, která po přidání do provozních kapalin vytváří vysoce účinnou směs obsahující deriváty uhlovodíků. Tyto látky poté reagují s uvolňujícími oxidy a vzniká ochranný mikrofilm, který vyhlazuje a ošetřuje povrchy kovů. Vazbou na uvolňující oxidy je zajištěna dlouhodobá stálost této ochranné vrstvy. Tato vrstva chrání kovy před korozí a je odolná proti vysokým teplotám a tlakům a její účinky přetrvávají i po výměně provozních kapalin. [56]

- Militec

Militec je syntetická tekutina, která neobsahuje žádná pevná tělesa. Tato směs působí na bázi syntetických derivátů uhlovodíků a chrání kovy molekulární vazbou s inhibitory koroze. Účinná složka látky působí přímo na kov prostřednictvím chemické reakce. Molekulárně se váže na kov a díky vysokým teplotám a tlakům na povrchu třecích dvojic vytváří tenkou povrchovou vrstvu odlišné struktury. Vzniklá vrstva má velmi hladký a pevný povrch s nízkým koeficientem tření a nedá se mechanicky setřít. [57]

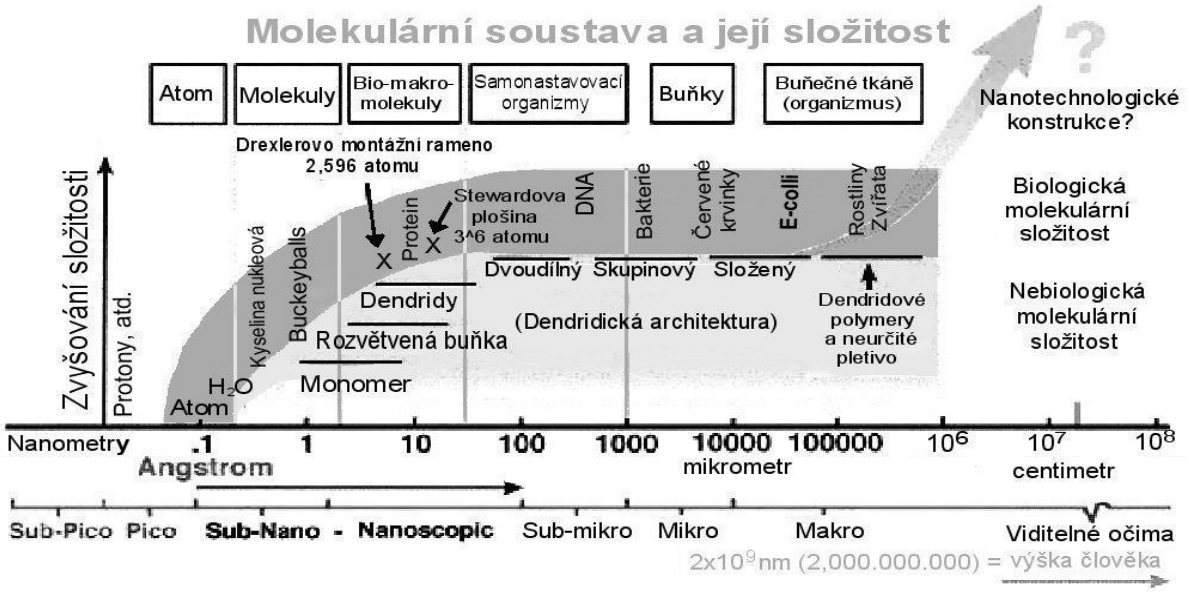
- Maziva s nanočásticemi

Určení nebo vymezení pro všeobecné a opakované použití v oboru nanotechnologie předpokládá v prvé řadě stanovení obsahové náplně tohoto pojmu i oboru. [91] Nano stanovuje miliardtinu základní fyzikální jednotky délky, tedy 10^{-9} a technologie je vědní obor zabývající se uplatňováním přírodovědeckých, zvláště fyzikálních, chemických či biologických poznatků při zavádění, zdokonalování a využívání výrobních postupů.

Složení obou výrazů tedy vymezuje technologii v oboru 10^{-9} základní délkové fyzikální jednotky. Charakteristická veličina pro nanotechnologii je délka jejíž základní

jednotkou v soustavě SI je metr (m). Rozměr nanometr (nm) (1 nm = 10^{-9} m) má praktické využití ve světě atomů a molekul, kde je využívána vedle nanometru i jednotka angström (A) (1 A = 10^{-10} m). Nanotechnologie se tedy zabývá zdokonalováním a využíváním výrobních postupů v oblasti atomů a molekul.

Následující diagram „Molekulární soustava a její složitost“ na obr. 11, udává závislosti přiřazení délkových rozměrů (nanometrů) úrovni složitosti atomárních a molekulárních soustav s vymezením úseku charakteristického pro nanotechnologii. [94]



Obr. 11: Postavení nanočástic z hlediska rozměrů. [94]

Na základě inovací a vývoje nových typů maziv a olejů, dochází často z důvodu vysokých nároku na mazací parametry, k aplikaci nanočástic, a to zejména do olejů. [58] Jak popisuje zdroj [58], nejčastěji se jedná o nanoaditivní prvky z hlediska jejich vhodného složení a struktury.

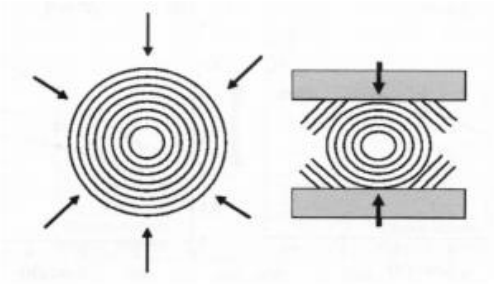
Nanočástice lze z hlediska jejich struktury dělit na:

- Nanovláknovité,
- S cibulovou strukturou,
- S micelární strukturou.

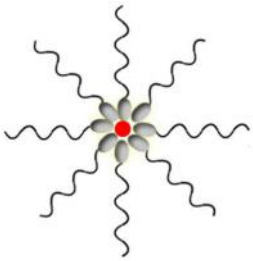
Dělení nanočástic z pohledu chemického složení pro použití v nanomazivech [56]:

- Uhlíkové struktury,
- Elementární částice měkkých kovů
- Sulfidy kovů
- Selenidy kovů

Odborné články [59] a [60] upozorňují na možnosti použití nanomaziv se selenidy na bázi tantalu niobu a wolframu pro aplikace s vysokými nároky na snižování koeficientu tření. Jelikož díky efektu “rozbalování cibulových struktur” za vysokých teplot a kontaktních tlaků, dochází ke snížení kontaktního tlaku rozprostřením nanočástice a tím snížení koeficientu tření.



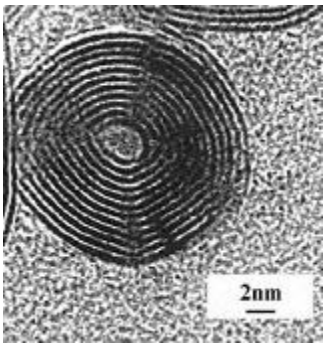
Obr. 12: Schématické zobrazení nanočástic cibulových nanostruktur při rozbalování. [58]



Obr. 13: Schématické zobrazení nanočástic s micelární nanostrukturou. [58]

V tribologie mají nově velký význam vícevrstvé sférické fullereny disulfidu wolframu IF-WS_2. Wolfram má vynikající vlastnosti z hlediska tření a neaktivní síra drží strukturu těchto nových molekul pohromadě.

Fungují jako miniaturní ložiska a zlepšují kvalitu třecích ploch. Pod elektronovým mikroskopem vypadá taková částice, tak jak je vyobrazeno na obrázku 14. Skládá se z několika desítek vrstev a má duté jádro. Při zvýšeném kontaktním tlaku dochází nejprve k deformaci nanočástice a následně k oddělení vrchní vrstvy a jejímu navázání na kluznou plochu. [58]



Obr. 14: Částice IF-WS_2 zobrazená pomocí elektronového mikroskopu. [58]

1.5 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. [23], [24]

1.5.1 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 časovaní 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. [28, 34]

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

Kde:

F_k [N] síla působící v místě kontaktu,

S_s [mm^2] styková plocha funkčních dvojic.

1.5.2 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). [34]

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. [30], [31]

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. [53] 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.

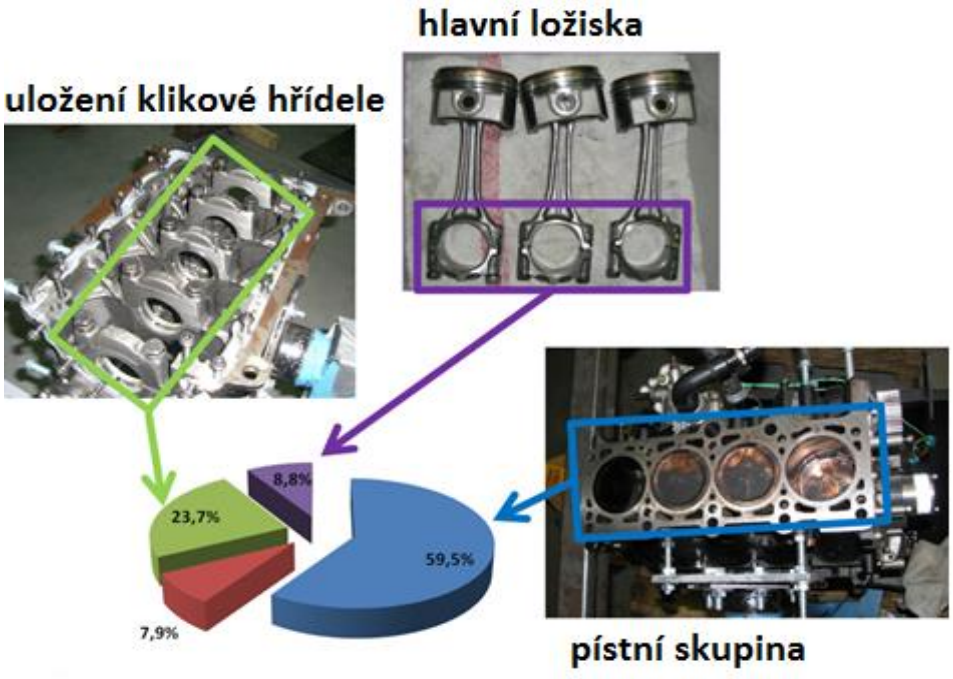
1.5.3 Důvody a principy omezování pasivních odporů

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 opotřebení součástek.

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. [22, 23]

Z následujícího obrázku 15 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. [37] 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. [24], [25]

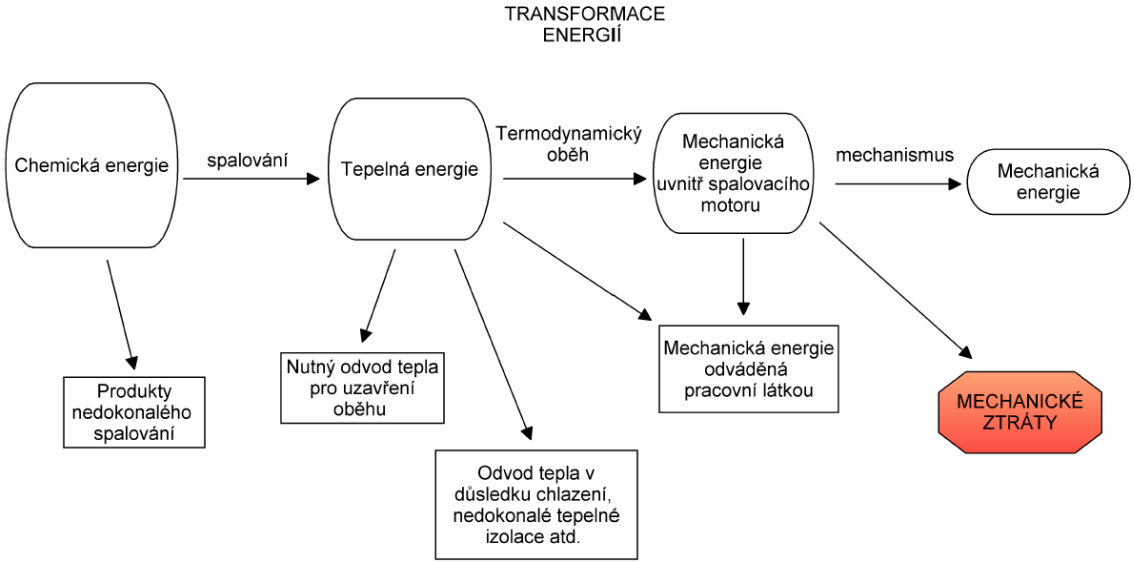


Obr. 15: Schematické rozložení třecích ztrát v motoru [24]

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 [25]:

- pístních kroužků a vložek válců,
- vačkového hřídele a vahadel,
- pláště pístů a vložek válců,
- malého ojničního oka a pístního čepu,
- velkého ojničního 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 16.



Obr. 16: Energie a její transformace ve spalovacím motoru [28]

1.5.3.1 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 [25].

Z tohoto vyplývá, že pístní kroužky, musí být dimenzovány na vysokou únavovou životnost a očekává se od nich tepelná stálost. K nejškodlivějším 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. [26, 27]

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. [39]

1.5.3.2 Technologie funkčních úprav povrchu

Technologií povrchových úprav v automobilovém průmyslu tvoří široké spektrum speciálních technologie, které jsou produktem aktuálního vývoje v této oblasti s tribologickými aplikacemi.

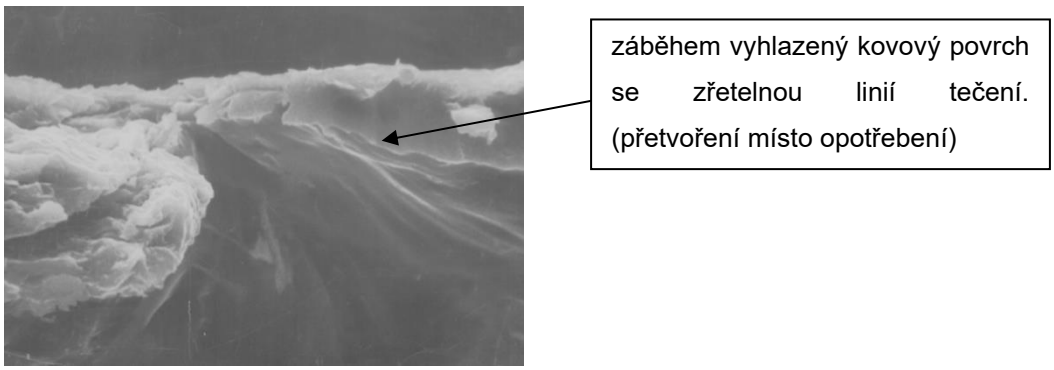
Keramické povlaky

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.[29],[45]

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. [35]

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 (sirník 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. [35]



Obr. 17: Zvětšený pohled (10 000krát) na kluzný lak zakotvený v základním materiálu. [35]

Diamantové povlaky DLC

V poslední době je použití diamantu v autoprůmyslu je stále častější, a to hlavně na základě jeho funkčních vlastností [36]. Diamant disponuje funkčními vlastnostmi, z pohledu tribologie zásadně mechanickými a tepelnými. Povlaky či vrstvy obohacené diamantem vykazují vysokou tvrdost a odolnost proti otěru [32]. 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 [38] bylo dokázáno, že s rostoucí tloušťkou tohoto typu povlaků klesá jeho životnost.

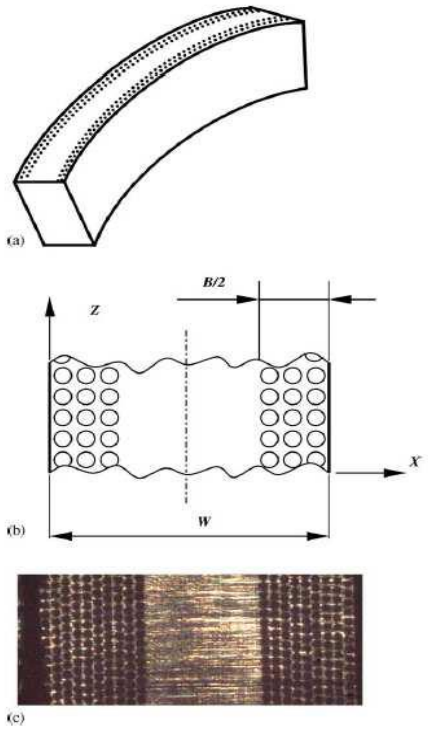
Laser structure texture

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 mikrodůlků, jejichž hloubka se pohybuje okolo 5 až 6 μm. Experimentálně byl získán nejvhodnější poměr mezi průměrem a hloubkou mikrodůlků. Mazivo usazené v takto upraveném povrchu mělo, poskytnou dostatečnou ochranu navzájem se pohybujících součástí. [38],[40]

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 [36] 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. [34, 35, 36]

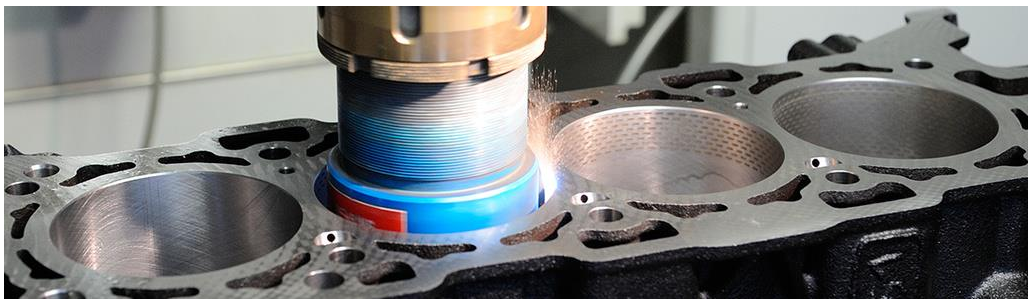
Systém částečného LST je zobrazen na obrázku 18, jenž pochází z článku [36]. Průměrný součinitel tření závisí na rozdílném normálovém zatížení pro různé čepy, neboť soudečkově tvarované kroužky poskytují dobrý hydrodynamický efekt. [40], [41]



Obr. 18: Pístní kroužek upravený technologií LST: (a) prostorový pohled na kroužek, (b) schematické zobrazení sítě LST, (c) fotografie částečného LST [41]

Gehring Laser honing

V podstatě se jedná o využití principu technologie LST popsanou v odborné literatuře[42] 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 zkušeností s dokončováním kvality povrchu. [43]



Obr. 19: Gehring, Laser honing [43]

Během tohoto procesu blok motoru nejprve projde technologii vícestupňového honování, aby se dosáhlo požadovaného základních profilů pro laserové strukturování. Následně jsou pomocí laserové hlavice, která se otáčí a posouvá osou vývrtu vytvářeny mikroskopické prohlubně pomocí laserového paprsku. Dále je nutné odstranit valy vytvořené laserem nataveným kovem, čímž dostane povrch výslednou kvalitu.[43], [44]

Obr. 20: Struktura povrchu válce se stopou bez valu, vytvořenou laserovým honováním [44]

Obr. 21: Úprava povrchu vyhonovaných vývrtů válců - Laser honing [44]

1.6 Omezení rizik šroubových spojů

Tato 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 pro 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. [47] 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. [63]

Montáž – spojování se provádí nejčastěji roboticky, nebo lidská obsluha, která používá automatický utahovací nástroj, který je nastaven na utahovací moment.[69] Zaručit potřebné parametry předepnutí šroubového spoje lze, jen pokud známe závislost utahovacího momentu na osové síle. Tato síla a předepnutí je závislé na hodnotách koeficientu tření v závitu a plochách styku matice či hlavy šroubu se spojovaným materiálem nebo součástkou. [61], [71] Proto je zásadní znát vždy potřebné, ale i skutečné hodnoty koeficientu tření.

Obr. 22: Šrouby s různou úpravou povrchů.

1.6.1 Šroubové spoje

Tento druh rozebíratelného spoje, lze též pojmenovat jako funkční dvojici. Zde se tření projevuje ve stykových plochách závitu a také v dosedací ploše hlavy šroubu/matice. Při použití maziv se hodnoty koeficientu tření výrazně snižují, ale v automobilovém průmyslu se maziv při montáži šroubových spojů téměř nepoužívá. [63]

1.6.2 Výroba vnitřních a vnějších závitů

Obecně se závity dělí na vnitřní - maticové a vnější - šroubové. Oba druhy závitů se vyrábějí obráběním – řezáním závitů pomocí závitníků, závitových čelistí, soustružením, frézováním a v neposlední řadě elektoerozí. Druhý způsob výroby je pomocí tváření – válcováním kladkami či rolováním mezi plochými čelistmi.
Spojovací součásti vyráběné válcováním se vyznačují větší únosnosti závitu, jelikož při obrábění profilu závitu dochází k přerušení vláken materiálu. [26], [61], 63]

Funkčnost závitové dvojice je závislá na mnoha faktorech, jsou jimi zejména na přesnosti a jakosti povrchu profilu závitu. Zvýšené jakosti závitu se dosahuje nastavením vhodných obráběcích parametrů či volbou dokončovacích operací. [61]

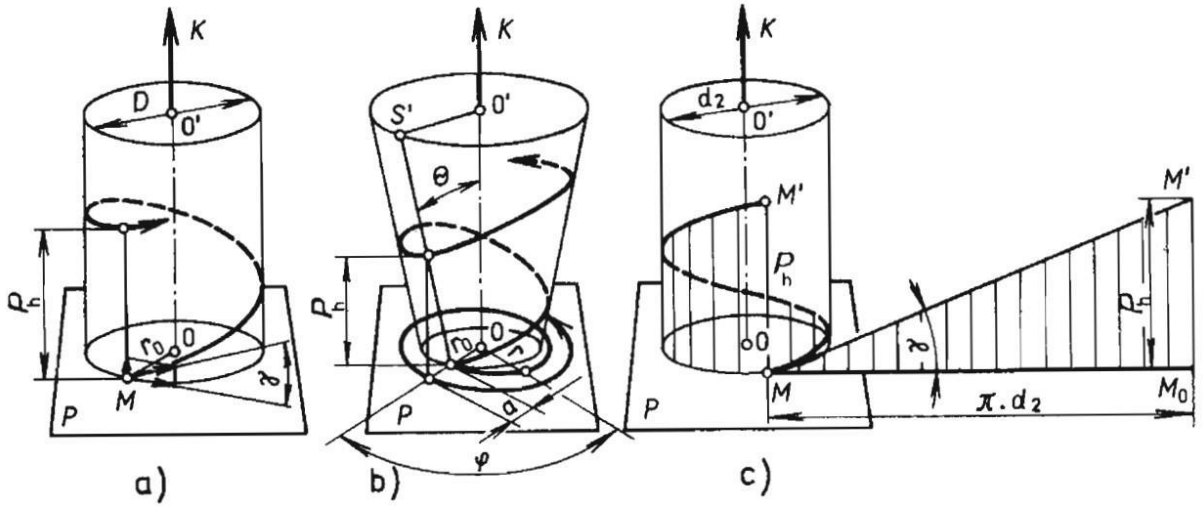
Šrouby a matice se dělí podle pevnosti do jednotlivých tříd. Třídy pevnosti šroubů jsou značeny dvěma čísly oddělenými tečkou. První číslo značí 1/100 pevnosti v tahu Rm a druhé číslo udává desetinný poměr meze kluzu (dolní mez kluzu R_{eL}, resp. smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$) vůči pevnosti v tahu Rm. Pevnostní třídy matic jsou značeny jedním číslem, které odpovídá vhodné třídě šroubu, se kterým mohou být smontovány. [64]

Tab. 3: Přehled materiálů a tříd pevnosti šroubů. [64]

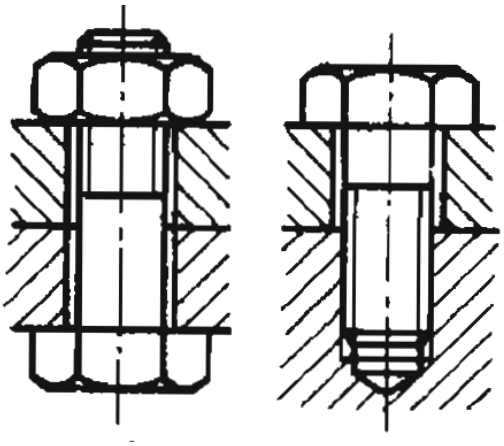
Třída pevnosti šroubů	Materiál
4.6 4.8 5.6 5.8 6.8	Uhlíková ocel
8.8 9.8 10.9	Uhlíková ocel s přísadami (B, Mn, Cr) kalená a popuštěná Uhlíková ocel kalená a popuštěná Legovaná ocel kalená a popuštěná
12.9	Legovaná ocel kalená a popuštěná
12.9	Uhlíková ocel s přísadami (B, Mn, Cr, Mo) kalená a popuštěná

1.6.3 Geometrie závitu

Každý bod závitu opisuje šroubovici tvořenou bodem M, který se konstantní úhlovou rychlostí otáčí kolem osy K, a přitom se rovnoměrně posouvá ve směru této osy (obr. 20a). Šroubovice vzniká také navinutím trojúhelníku na válec. V případě, kdy má vodorovná odvěsna délku rovnou obvodu středního průměru závitu, pak se druhá odvěsna rovná stoupání šroubovice P_h (obr. 20c). Jestliže bude bod M opisovat na základně P Archimedovu spirálu, pak vzniká šroubovice na kuželu (obr. 20b). Podle smyslu otáčení je rozlišována šroubovice pravá nebo levá – pravotočivý nebo levotočivý závit. [63]



Obr. 23: Geometrie závitu [63]



Obr. 24: Dva základní případ šroubových spojení [66]

Šroubové spoje lze rozdělit z konstrukčního hlediska na spoje:

➢ bez předpětí

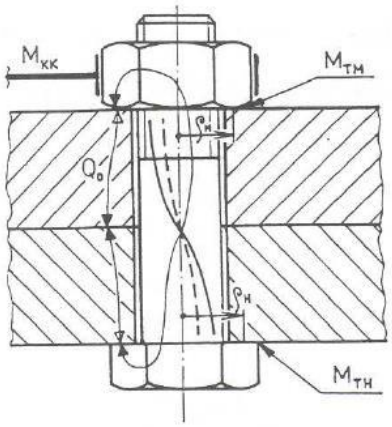
Šroubové spoje bez předpětí nejsou příliš časté a používají se zřídka. [67]

➢ s předpětím - předepjaté

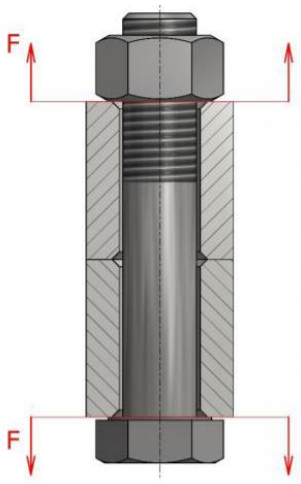
1.6.4 Předepjaté šroubové spoje

Větší část všech používaných šroubových spojů je předepjatá. Při montáži je vyvozen potřebný utahovací moment, na základě rozkladu sil na geometrii šroubovice dojde ke vzniku osové síly (montážního předpětí Q_0). Vlivem osové síly se dosáhne potřebné silové vazby kontaktních ploch a pevnosti šroubového spoje jako celku. [63]

1.6.5 Silové poměry a samosvornost závitové dvojice



Obr. 25: Rozložení silových poměru ve šroubovém spoji. [63]



Obr. 26: Předepjatý spoj zatížený osovou silou. [31]

1.6.6 Samosvornost závitu

Je vlastnost, při které působením osové síly na šroub nedochází k samovolnému uvolnění spoje. Závity běžných šroubů jsou samosvorné, aby za provozu nedošlo k jeho povolení. Podmínka vychází z geometrických poměrů, které popisuje obrázek 22. Definice samosvornosti zní: „ úhel stoupání šroubovice musí být menší, nebo maximálně roven úhlu tření. [63]

$$\gamma \leq \varphi' \qquad (10)$$

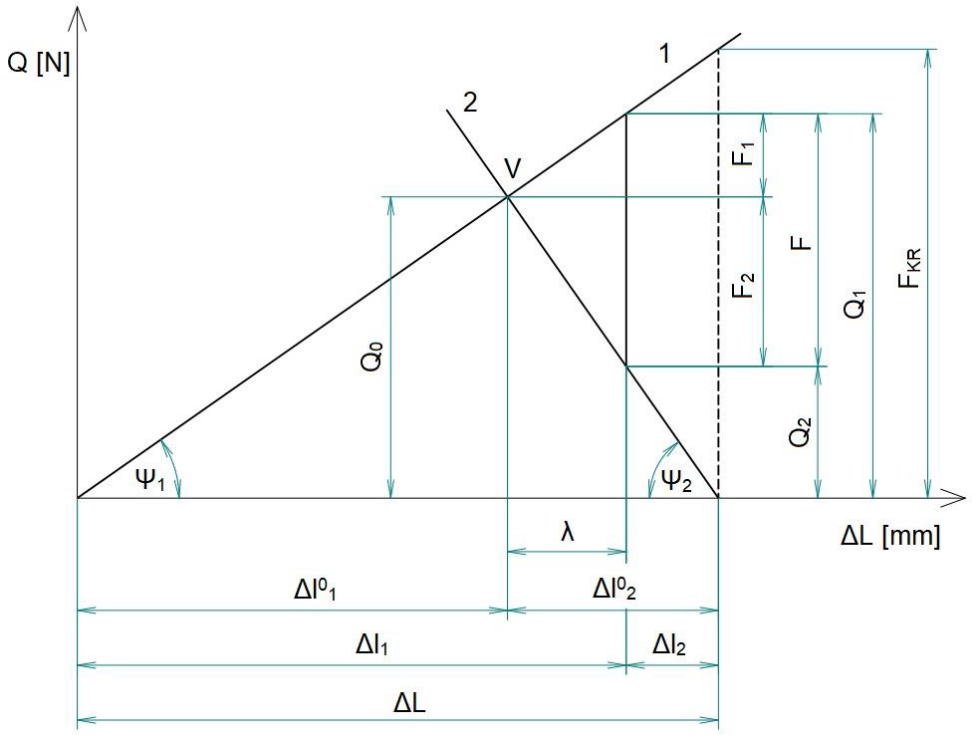
Kde:

γ [°] - úhel stoupání šroubovice

φ' [°] - redukovaný úhel tření

1.6.6.1 Princip a využití předepjatých šroubových spojení

Předepjaté šroubové spojení se používá hlavně v oblastech průmyslu kde je kladen důraz na zvýšení únavové pevnosti spojovacích součástí. Dále pro zajištění těsnosti spoje. [63]



Obr. 27: Montážní diagram předepjatého šroubového spoje- Rötscherův diagram. [68]

Kde:

Q_0 [N] - montážní předpětí spoje

ΔL_1 [mm] - deformace (prodloužení) šroubu od montážního předpětí

ΔL_2 [mm] - deformace (stlačení) sevřených částí od montážního předpětí

$c_1 = tg\ \Psi_1$ [N/mm] - konstanta tuhosti šroubu

$c_2 = tg\ \Psi_2$ [N/mm] - konstanta tuhosti sevřených částí

F [N] - maximální provozní osová síla zatěžující spoj

ΔF_1[N] - část osové složky provozní síly přitěžující šroub

ΔF_2[N] - část osové složky provozní síly odlehčující sevřené části

F_{KR} [N] - maximální vnitřní osová síla ve šroubu

Q_2 [N] - zbytkové předpětí sevřených částí spoje

Proces utahování šroubového spoje:

Při utahování dochází k otáčení matice nebo šroubu. Tím se šroub posouvá, až dojde ke styku s plochou spojovaného dílů a tím začne narůstat točivý momentu a vzniká osové předpětí Na modelu je znázorněn utahovací moment v závislosti na úhlu natočení. [61]

Na obrázku 25 je popsán proces utažení a to ve 4 silových zónách[61]:

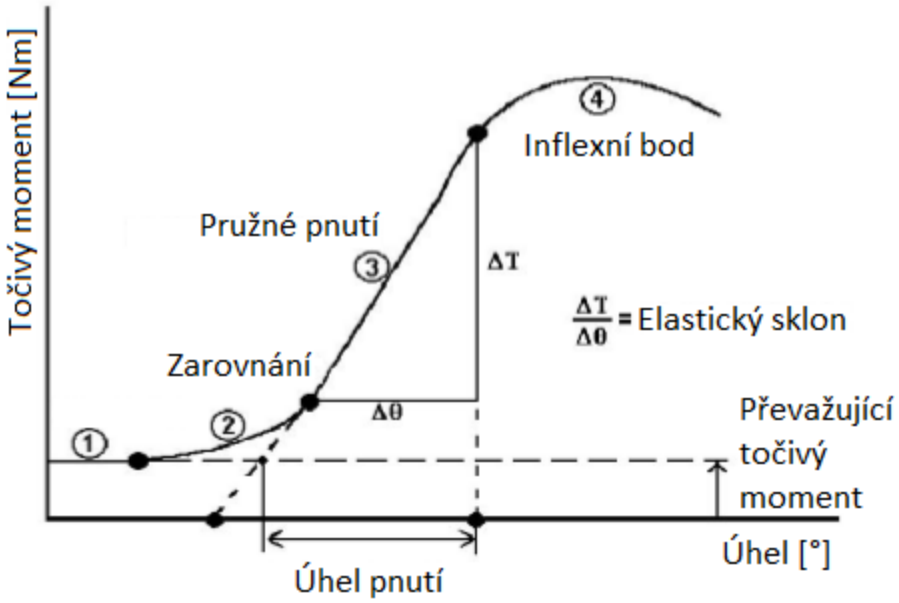
1) Dochází k zabíhání, u kterého převládá utahovací moment. První trvá do doby, kdy dojde ke styku funkčních ploch šroubu nebo matice v závitu.

2) Dojde k zarovnání. Vznikne stykem spojovacího dílce a dosedací plochy za vzniku těsného spojení.

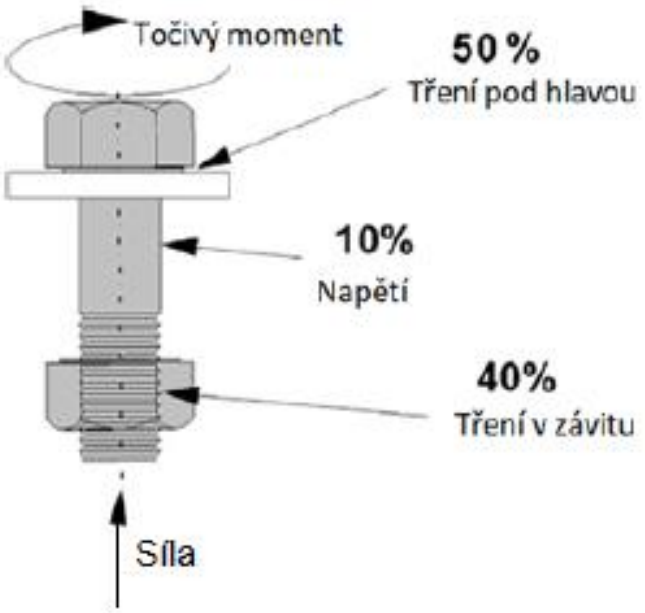
3) Tzv. pružná upínací zóna, kde sklon křivky je závislostí utahovacího momentu na úhlu otočení konstantní. [10]

4) Poslední je oblast za mezí kluzu. Na konci elastické zóny začíná inflexním bodem.

Následně uvedená charakteristika graficky popisuje proces utahování předepjatého spoje.[61]



Obr. 28: Charakteristika utahování šroubového spoje. [62]



Obr. 29: Převod utahovacího momentu na osovou sílu. [68]

1.6.7 Tření v závitech

Hodnoty součinitele tření v závitech, ve stykové ploše matice a hlavy šroubu jsou ovlivněny několika faktory [63]:

- použitým materiálem,
- drsností dotýkajících se ploch,
- povrchovou úpravou,
- případnou aplikací maziva,
- velikostí vznikající osové síly.

Tab. 4: Hodnoty vybraných součinitelů tření v závitu. [63]

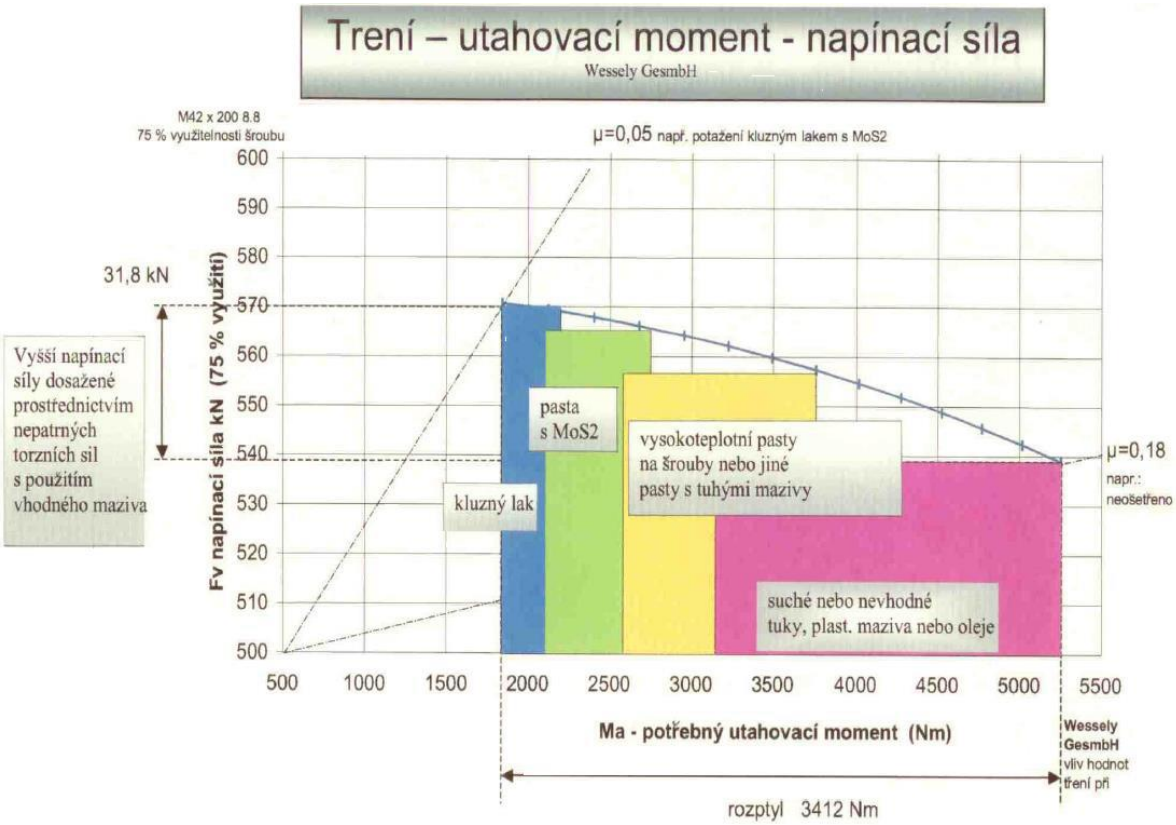
Povrch závitu šroubu	Nemazaný	Mazaný
Neupravený (kovově lesklý)	0,20 – 0,35	0,16 – 0,24
Fosfátovaný	0,28 – 0,40	0,17 – 0,30
Pozinkovaný	0,15 – 0,35	0,14 – 0,18
Kadmiovaný	0,10 – 0,18	0,10 – 0,17

Jedním z hlavního faktoru je velikost osové síly. Průměrné hodnoty součinitele tření ve stykové ploše matice a spojovaných dílů (f_m) jsou 0,15 – 0,22. Již z tabulky jsou patrné vlivy mazání na koeficient tření a použití povrchových úprav spojovacího materiálu. [63]

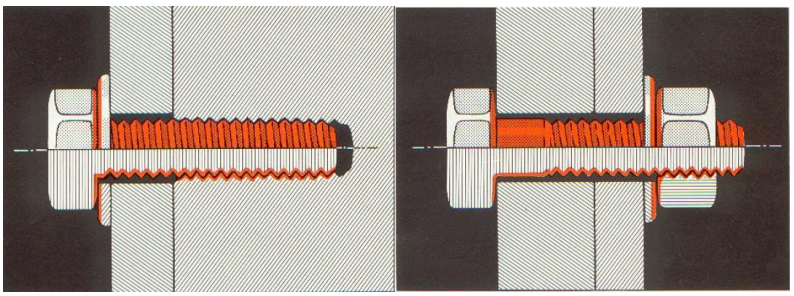
1.6.7.1 Mazání šroubových spojů

Shrnuti působení maziv na tření je popsáno v kapitole 1.3.2. Avšak je nutné podotknout, že výběr vhodného maziva závitů ve šroubových spojů má významný vliv na dosažení napínací síly. Podstatně prodlužuje životnost spoje, neboť vrstva maziva snižuje pnutí v závitu, dřík šroubu je méně namáhán na krut a mnohem snáze po sobě funkční ploch pohybují. V případě absence maziva může obecně při utahování šroubu docházet ke vzniku povrchových kapilár, případně může nastat zadření (svaření za studena). [69]

K tomuto nepříjemnému jevu dochází nejčastěji u šroubů vyrobených z vysoce legovaných materiálů, nejčastěji z austenitické oceli. Tento typ oceli nemá na svém povrchu tenkou vrstvu oxidů, která by snížila tření. Součinitel tření mezi ocelí je větší než 0,3 a pro dosažení větších předepínacích sil se použije mazivo s malým součinitelem tření. [71]



Obr. 30: Vliv druhu maziva a povrchové úpravy na koeficient tření a utahovací moment a napínací sílu[65]



Obr. 31: Příklady správné aplikace maziva [66]

1.6.8 Povrchové úpravy šroubů

Povrchové úpravy spojovacího materiálu mají vliv nejen na ochranu proti reakci základního materiálu s aplikačním prostředím, ale z pohledu tribologie hlavně na jakost stykových ploch závitu. [61] Ovlivňují hlavní parametry jako je koeficient tření, rozebíratelných spojů ovlivňují tření, životnost a bezpečnost.

Podle určení a způsobu namáhání je nezbytné šrouby chránit různými úpravami povrchu. Technologie povrchových úprav nesmí negativně ovlivnit vlastnosti materiálu (vodíková křehkost), rozměry a definovaný koeficient tření.

Nejrozšířenější povrchovou úpravou šroubů jsou bezesporu povlaky ze zinku a jeho slitin. Důvodem je fakt, že zinek chrání železné kovy na principu jejich katodické ochrany. Zinek vzhledem ke svému elektrochemickému postavení vůči železu reaguje s korozním prostředím přednostně před železem, což je výhodné především u místních poškození hran a pozinkovaných závitů. [62]

V oblasti protikorozních povlaků na oceli se kromě čistého zinku a stále silně omezovaného kadmia rozšířilo používání slitinových povlaků zinku. Zinek legovaný především niklem v kombinaci s následnou vrstvou případně utěsněním vykazují zvýšenou korozní odolnost i za extrémních podmínek a namáhání. V následující tabulce 5, jsou uváděny nejčastější povrchové úpravy šroubů. [70]

Tab. 5: Přehled nejčastějších povrchových úprav šroubů

Druh povrchové úpravy	Typ technologie	Povlaky
Kovové	Galvanické pokovení	zinkování, kadmiování, niklování, chromování, cínování
	Žárové pokovení-ponorem	zinkování
	Chemcké pokovení	niklování
	Termodifuzní pokovení	zinkování (scheradizování), chromování (inchromování)
Nekovové	Organické a anorganické povlaky	Geomet, Dacromet, Delta seal
	Organické povlaky	Termoplasty (polyamid), kluzné laky (PTFE, grafit, MoS_2)
	Konverzní vrstvy	černění (brynýrování), chromátování, fosfátování

Stejně jako maziva mají povrchové úpravy vliv na napínací síly. Protikorozní odolnost, otěruvzdornost a snadná montáž/demontáž spoje závisí na vhodně zvolené povrchové úpravě. Povrchové úpravy spojů pomáhají odolávat vysokým teplotám, agresivnímu prostředí a velkému zatěžování. [70]

1.6.8.1 Zinkování

Nejčastěji používanou povrchovou úpravou jsou povlaky na bázi zinku a jeho slitin. Tato technologie povrchových úprav se využívá zejména z důvodu katodické ochrany, která zajišťuje ochranu základního materiálu, hran i závitů rozebíratelných spojení při poškození zinkové vrstvy. [73] Zinek je elektrochemicky méně ušlechtilý než ocelový základní materiál šroubového spoje. Proces katodické ochrany se opakuje až do spotřebování veškeré tloušťky zinkového povlaku. Výhodou je dobrá korozní odolnost, odolnost proti mechanickému poškození, dlouhá životnost (i 40 a více let) a nízké výrobní náklady. [74]

Žárové zinkování není zcela častou povrchovou úpravou ocelových spojovacích součástí, ale pokud se jedná o spoje velkých konstrukcí a dílů, tak právě zde nachází své uplatnění. Zajišťuje dobrou a trvanlivou korozní ochranu. Takto ošetřené spojovací součásti jsou po provedení předúpravy povrchu ponořeny do lázně roztaveného zinku s teplotou okolo 460°C a vysokou teplotou mezi 530 a 560°C. Dále jsou spojovací součásti odstředěny, aby došlo k odstranění přebytečného zinku. [75] Výsledkem je zinkový povlak, která je v porovnání s galvanickým zinkováním relativně silná (až 70 μm). Výsledný povlak zinku tvoří na povrchu oceli slitinové fáze železa a zinku a je uzavřen povlakem čistého zinku. Slitina železa a zinku je tvrdší než základní materiál. [76]

1.6.8.2 Fosfátování

Principem fosfátování je vytvoření nerozpustné vrstvy fosforečnanů na povrchu dílu. Ve fosfátovací lázni dochází k rozpouštění povrchové vrstvy materiálu železa nebo zinku a u povrchu dochází k vylučování nerozpustného fosforečnanu příslušného kovu. Podle toho se jedná o fosfátování železnaté nebo zinečnaté. Procesem fosfátování je vytvořena nevodivá, nerozpustná konverzní vrstva, která vylepšuje přilnavost nátěrů a tím korozní odolnost a odolnost proti

podkorodování. Samotný povlak z důvodu porezity neposkytuje dostatečnou ochranu základního materiálu. Pro dosažení korozní odolnosti se povrch impregnuje olejem. Tento povlak vytváří adhezní vrstvu, která je dobrým nosičem lubrikantů, což je využíváno ke snížení tření. [76]

1.6.8.3 Kadmiování

Tato povrchová úprava spojovacího materiálu se nejčastěji se využívá v letectví, námořnictví, jelikož je její použití z pohledu ekologie značně omezeno. Tyto povlaky mají celou řadu pozitivních vlastností, pro svoji dobrou tepelnou vodivost, pájitelnost, vynikající samomazné vlastnosti a mimo to mají nesrovnatelnou korozní odolnost v agresivním prostředí. Užívají se zejména alkalické kyanidové a kyselé lázně. Kyanidové jsou typické pro hromadné pokovování, vyloučené povlaky jsou, bez užití leskutvorných přísad, matné. Pomocí vhodných aditiv lázně lze přiblížit i funkční parametry povlaků kadmia a vyrovnat se těm vyrobeným v lázních kyanidovým. [76]

1.6.8.4 Kompozitní galvanické povlaky

Kompozitní galvanické povlaky jsou typem povrchových úprav, které mají kovovou galvanicky vyloučenou základní matrici. Ta obsahuje tzv. dispersní částice. Matrice významně ovlivňuje výsledné vlastnosti kompozitního povlaku a je jednou z hlavních částí povlaku. Disperzní částice, mají zásadní vliv na funkční vlastnosti kompozitního povlaku a jeho aplikaci. Disperzní části lze rozdělit na částice tvořené prvky a částice tvořené sloučeninami a nekovy. Využitím vlastností kompozitních povlaků a možnosti tepelného zpracování (u slitinných povlaků) vznikají další možné aplikace Lázně tohoto typu mohou vylučovat tvrdé povlaky, otěruvzdorné, kluzné, s nízkým koeficientem tření, , tepelně odolné a případné kombinace těchto vlastností. [73]

Například pro aplikace šroubových spojů se kompozitní povlak Zn-PTFE velmi hodí. Skládá se ze zinkové, galvanicky vyloučené matrice a z disperzních částic polytetrafluoretylenu. Částice PTFE jsou obvykle menší než 0,5 μm a jsou rovnoměrně rozptýleny v povlaku. Při otěru částice ulpívají na povrchu funkční dvojice a tím snižují funkční součinitel tření, ten nabývá hodnot okolo 0,2. [73]

1.6.9 Selhání šroubových spojení

Příčinou selhání šroubových spojů je většinou nedostatečné předepnutí šroubu-nedostatečně vytvořené osové předepnutí šroubového spoje, či zadření závitových funkčních ploch v důsledku vzniku vysokých kontaktních tlaků, či na základě špatné volby-nesprávných utahovacích momentů [72]

Obr. 32: Příklad z praxe-selhání závitu šroubového spoje.

Obě příčiny lze ovlivnit použitím vhodné povrchové úpravy, či vhodným mazivem. Napínací síla šroubu F_M je závislá na hodnotách součinitelů tření μ_k a μ_G na rozměrové přesnosti. [61], [66]

$$M_A = F_M.(0{,}16P + 0{,}58.d_2.\mu_G + \frac{D_{km}}{2}.\mu_K) \qquad (11)$$

Kde:

M_A [Nm] - utahovací moment

F_M [N] - napínací síla

P [mm] - stoupání závitu

d_2 [mm] - střední průměr šroubovice závitu

μ_G [-] - součinitel tření v závitu

D_{km2} [°] - účinný třecí rádius hlavy

μ_K[-] - součinitel tření dosednutí hlavy

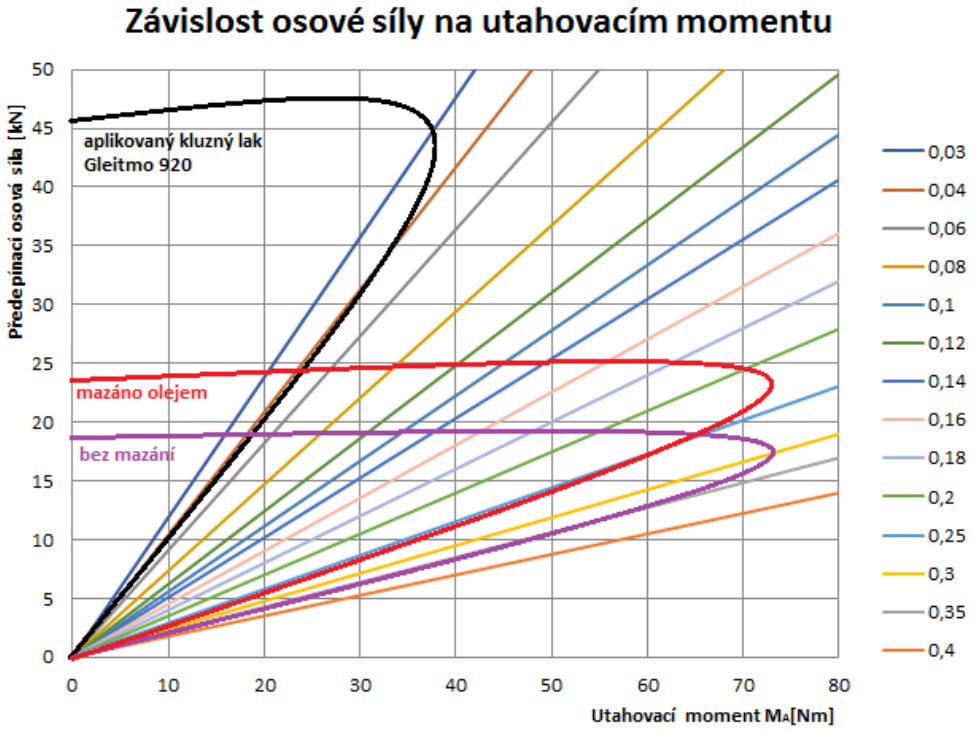
Při konstantním utahovacím momentu M_A bude tedy při nízkém μ_k a μ_G napínací síla F_M vysoká a naopak. Z vynaložené utahovací síly se ztrácí až 50% jako tření hlavy a 40% jako tření v závitech a zůstává jen 10% na vytvoření síly pro předepnutí šroubového spoje. Zadírání je též problém související s koeficienty tření. Příčinou tohoto jevu jsou: mikrosvary, vyhřátí, koroze, a tribokoroze.

Zejména u vysoce legovaných ocelí (austenitické materiály), lehce dochází ke svaření za studena. Tyto ocele nemají silnou přirozenou vrstvu oxidu, která by účinně oddělila spojovací součásti. Chybí-li vhodná povrchová ochrana nebo vrstva vhodného maziva, dochází často již při utahování matice k poškození povrchů.

Jsou-li šroubové spoje vystavovány vyšším teplotám, vznikají dodatečná namáhání. V závislosti na druhu materiálu, z něhož jsou šrouby vyrobeny, vznikají tvrdé a křehké vrstvy okují, které blokují závit a znemožňují povolit šroubový spoj.

Každý závit má boční vůli. Při utahování šroubu táhne jenom jeden bok závitu, vytvářejí se kapiláry, do nichž může lehce vniknout vlhkost nebo plyny, jež mohou způsobit korozi zejména u nelegovaných, ke korozi náchylných ocelí.

Na obr. 33, jsou vyobrazeny závislosti napínacích sil na utahovacím momentu při různých hodnotách koeficientu tření. [65]



Obr. 33: Graf závislosti osové napínací síly na utahovacím momentu a koeficientech tření. [65]

Zobrazení závislosti síly předepnutí šroubového spoje na utahovacím momentu s rozdílnými hodnotami koeficientů tření je zcela vypovídající a jako zásadní pro bezpečnost šroubového spoje.

Je tedy nutné znát vždy přesnou hodnotu koeficientu tření, abychom mohli daným krouticím momentem vyvodit potřebnou přepínací sílu. [66]

Některé dosavadní prostředky na mazání šroubů, především vystaveným vysokým teplotám, mohou mít na spojovací materiál i negativní vliv. Je nutné používat vždy vhodné mazací prostředky, které spojovací materiál nenapadají, tj. nevedou k žádným jeho materiálovým změnám.

Tab. 6: Charakteristické vlastnosti tuhých maziv.

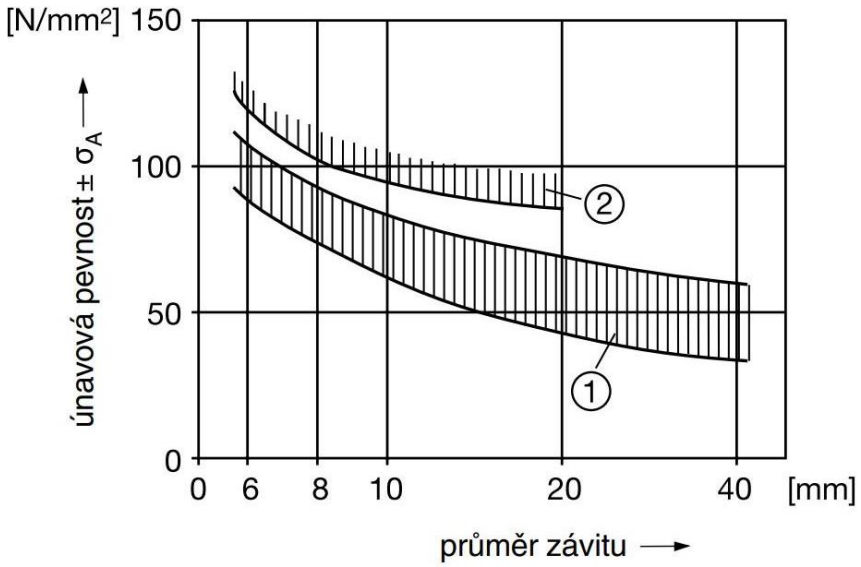
Vlastnosti tuhých maziv	***Sirník molybdeničitý***	***Grafit***	***Teflon (PTFE)***
Přilnavost	dobrá	přiměřená	malá
Mazací schopnost při malém zatížení	dobrá	dobrá	vynikající
Mazací schopnost při velkém zatížení	velmi dobrá	přiměřená	malá
Mazací schopnost ve vákuu	velmi dobrá	malá	dobrá
Měrná hmotnost g/cm3	4,8	2,1…2,3	2
Barva	černá	černá	bezbarvý/bílý
Odolnost proti záření	dobrá	dobrá	malá
Kystalická struktura	vrstevnatá mřížka	vrstevnatá mřížka	polymerní řetězec molekul
Rozpustnost	nerozpustný	nerozpustný	nerozpustný
Max. provozní teplota	300°C	600°C	260 – 300°C
Produkty rozpadu při oxidaci	MoO_3 SO_2	CO CO_2	C_2F_4
Chemická stálost	dobrá	velmi dobrá	velmi dobrá
Antikorozní vlastnosti	přiměřené	dobré	dobré
Koeficient tření (μ) [-]	0,03…0,1	0,1	0,01

Povrchová úprava šroubových spojů vyžaduje pozornost nejen z hlediska ochrany proti korozi a ostatních vlivů prostředí, ale především z důvodu jisté a bezpečné montáže (především na automatizované montáži). Vysoké hodnoty utahovacích momentů nejsou ještě zárukou potřebného předepnutí spoje.

Vhodná povrchová úprava kombinovaná s vhodnými mazivy zajišťuje optimální montáž, zvyšuje životnost a zajišťuje i bezpečnou demontáž šroubových spojů.

1.6.10 Únava a pevnost součástek šroubových spojů

Z pohledu pevnosti a únavy lze na základě tvaru závitu šrouby definovat konstrukční díly s vruby. Při cyklickém, míjivém či proměnlivém zatížení může dojít k únavovému lomu, který v 90 % případů vzniká v oblosti první nosné části závitu na vstupu závitu do matice. Při návrhu spoje musí být zohledněna únavová pevnost, která je nezávislá na statickém zatěžování a činí pouze zlomek pevnosti v tahu. U žárově zinkovaných šroubů je odolnost proti únavě o cca 20 % nižší než u šroubů s konečnou operací kalení a popuštění. [70]



Obr. 34: Charakteristiky únavové pevnosti pro, 1. Válcované závity, 2. Kaleno-popuštěno s následným válcováním závitu [62]

1.7 Zvyšování výkonu třecích uzlů

Stále stoupající nároky na požadavky na výkon třecích uzlů především u brzd a spojek nejrůznější strojních zařízení a dopravních prostředků vyvolaly potřebu podstatného zdokonalování třecích materiálů pro tyto aplikace. Se zvyšujícími se rychlostmi a velikostmi přítlačných sil v uzlech tření přináší v mnohých případech takové zvýšení pracovních a aplikačních teplot vznikajících třením, že jim dnes již doposud používaní 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.[77]

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. [82], [83] Na základě rozhodnutí Evropské komise v roce 1991 (Směrnice komise 659. EC 1991), [78] 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 [79]

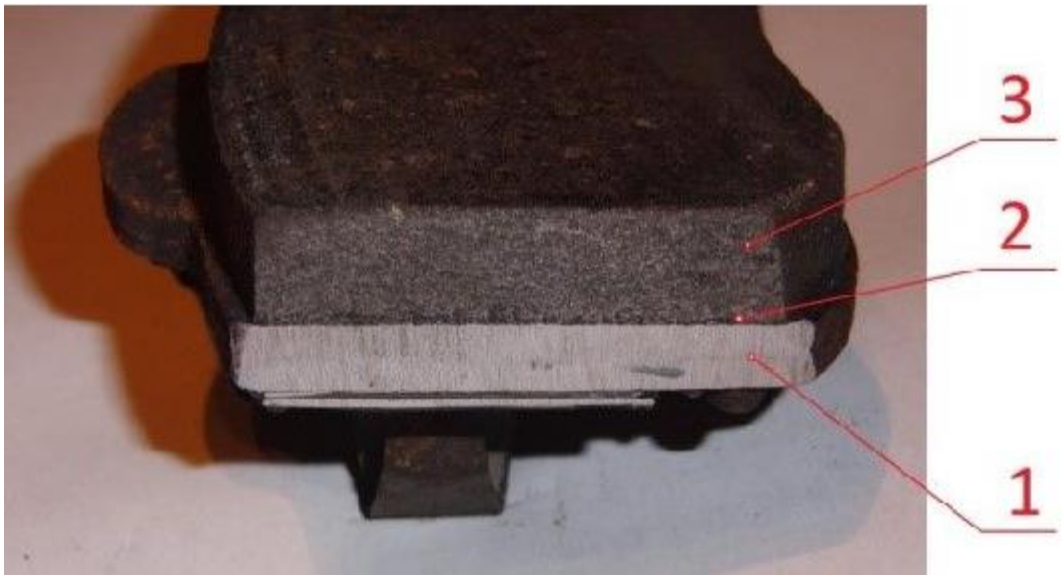
Vzhledem k tomuto zásahu má mnoho nových frikčních materiálů (bez azbestu) značně zhoršené fyzikální technické charakteristiky a to i navzdory vysokým výrobním nákladům. Frikční materiály na bázi náhražkových vláken způsobují problémy především u typů vozidel s vysokou hmotností. Kupříkladu u brzd těžkých nákladních automobilů. [81]

1.7.1 Provozní a technologické parametry frikčních materiálů

Pro správnou funkci třecích uzlu spojek a brzd je nutné, aby použité materiály poskytovaly vysoké hodnoty jako je koeficientů tření, co nejmenší otěr, úzkou tepelnou vodivost. Dále je velmi důležité aby vykazovaly tyto materiály stabilní hodnoty popsaných parametrů pro zajištění stabilní funkce v daných zařízeních i při vysokých teplotách. [88]

Dynamický koeficient tření za sucha ve dvojici s ocelí či ocelolitinou musí dosahovat zpravidla hodnot v intervalu 0,25až 0,5. Při práci ve vlhkém či kapalném prostředí mají tyto materiály dosahovat hodnoty alespoň 0,15. [84]

Součinitel tření a otěr materiálu spolu souvisí a označují se jako hlavní třecí vlastnosti. Schopnost materiálu zachovat si i za vysokých teplot stále hodnoty koeficientu tření a nízký otěr nazýváme tepelnou stálostí při tření. Provozní teplota třecích materiálů má prvořadý význam, což zdůrazňuje většina výrobců frikčních materiálů a komponent. [84], [85]



Obr. 35: Řez brzdovou deskou-1.zakladni ocelová deska, 2. Přechodová adhezní vrstva, 3. třecí materiál. [90]

1.7.2 Volba materiálu funkčních třecích dvojic

Výběr vhodné dvojice materiálů, který by zabezpečil spolehlivou funkci konstrukčního třecího uzlu při proměnných provozních podmínkách, je složitý problém pro konstruktéra i výrobce. Pro dosažení dostatečné odolnosti proti adhezivnímu opotřebení při tření bez maziva jsou možné dva základní přístupy:

a) Použít dva materiály s vysokou povrchovou tvrdostí.
b) Použít dva materiály s malou interakcí – např. kov/keramika [80]

Nejčastěji se však používá způsob, kdy se pro výrobně dražší součást použije materiál s vyšší tvrdostí a druhý člen z materiálu s nižší povrchovou tvrdostí. Často využívané materiály pro třecí členy (stanovené výpočtem) uvádí tabulka 5. [80]

Tab. 5: Základní frikční materiály a jejich koeficienty tření nebo uvedené v literatuře [80]

Frikční dvojice materiálů		Koeficient tření	
		Statický	Dynamický
Ocel	Hliník 99%	0,35	0,25
Ocel	Hliníková slitina EN AW 7075	0,5	0,4
Ocel (měkká)	Ocel (měkká)	0,50	0,4
Ocel (tvrdá)	Ocel (tvrdá)	0,48	0,45
Ocel	Bronz	0,18	0,16
Ocel	Měď	0,5	0,36
Ocel	Mosaz	0,5	0,44
Ocel	Litina	0,4	0,23

1.7.3 Rozdělení aktuálně využívaných materiálů

- **kovový** - hlavním třecím materiálem je ocel, měď nebo jiný kov; podložka se vyznačuje vysokou odolností a tepelnou vodivostí; spolupráce s litinovým kotoučem má za následek hluboké škrábance a dutiny v materiálu (kvůli adhezi) a může vést k nežádoucímu hluku a rychlému postupu koroze; [86],[88]
- **polokovový** – třecí materiál je tvořen směsí kovu a organických materiálů, který má vysokou tepelnou vodivost; podobně jako u kovových podložek může být opotřebení rychlejší, například také hluk při brzdění a korozi;
- **keramické** (bez azbestové) – hlavní složkou je v tomto případě organický materiál obvykle vyztužený aramidovým, skleněným nebo keramickými vlákny; tato konstrukce zajišťuje vysokou životnost, odolnost vůči vysokým teplotám, nízkou míru opotřebení, nízkou hmotností a tichý provoz; vzhledem ke složitosti výrobního procesu však může být tento typ materiálů velmi drahý a kvůli vysoké tvrdosti může být materiál křehký; [86],[87]
- **uhlík-uhlík** – struktura je podobná keramickému materiálu, přesto tento materiál vykazuje vysoký koeficient tření, odolnost proti zvýšeným teplotám a opotřebení, malou hmotnost. Tento typ brzdových destiček funguje nejlépe při zvýšených teplotách, proto se často používá pro sportovní automobily; výrobní náklady ve srovnání s konvenčními brzdovými destičkami jsou velmi vysoké;
- **EKO materiály šetrné k životnímu prostředí** – jedna z hlavních složek (aditiv) v tomto typu materiálu je rostlinného původu. Brzdové destičky s tímto typem materiálu vykazují dobré vlastnosti (nízká hmotnost, nízké náklady, ekologicky neutrální, vysoká životnost).
  [86], [88], [89]

Při rešerši ekologických problémů v souvislostech s třecími materiály je třeba uvést některé články popisující výhody možných materiálů a posuzující jejich použitelnost. Příkladem jsou kompozitní třecí materiály na bázi pryže. Jejichž hlavní použití je pro železniční brzdy. S tím je spojený vliv přísad na bázi kaučuku na tepelnou vodivost finálního třecího materiálu. Cest vývoje za různými účely a aplikacemi je mnoho.

Z pohledu ekologie a emisních produktů je důležité omezit otěr a použití prvku, které mají negativní dopad na ekologii. Proto se aktivně pracuje na náhradách například již zmiňovaného azbestu. Jednou z cest je použití polymerních vláken pro aplikace v moderních vozidlech, které recenzuje například zdroj Bijwe [87]. Tento článek představuje nové úspěchy ve vyztužení třecích materiálů neazbestovými vlákny.

Většina prvků v koloidním stavu je pro lidský organizmus a přírodu závadná (například koloidní měď), jak uvádí odborný článek [82], a také koloidní hliník [88].

Dále pak je důležité zmínit, že při procesu brždění se některé prvky a slitiny na základě vysokých tlaků a teplot modifikuji ve sloučeniny, oxidy aj. Ekologické snahy proto již míří k povinnosti zachytávat tyto látky průběžně při provozu automobilů.

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

Snížení pasivních odporů a emisí CO_2 spalovacích motorů netradičními způsoby na principu kompozitních nanočástic v mazivech.

Literární prameny [43], [44], [45] 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 [65] upozorňuje na pozitivní ovlivnění tření ve šroubovém spoji pomocí kluzných laků, další z řady zdrojů [70], [71], [72] 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 koeficientů tření a jejich vlivu na předepnutí šroubu.

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 [82], [83] 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 [75], [76] 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 brzdových systémů optimalizací složení materiálů funkčních třecích ploch na základě přesně zjištěných tribologických parametrů jejich povrchů.

2 STANOVENÍ HLAVNÍCH CÍLŮ 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 CO_2 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 [53], [90], [91], [92].

3.1 Snížení emisí CO_2 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 povrch a 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 CO_2, bylo nutné uskutečnit několik měření. Pro test byl použit běžný olej se specifikací 10W 40. Motor byl zahřát provozem na měřicí stolici 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 CO_2 vždy v intervalu 5 hodin provozu. První záznam měření proběhl po 5 hodinách. Celkový čas testu byl 100 hodin. Údaj CO_2 udávaný výrobcem je 173 g / km. Jak uvádí publikace [VV3], výkonové parametry nebyly předmětem měření, jelikož hlavními parametry pozorování, byla spotřeba paliva a od ni odvislé hodnoty CO_2.

3.1.1 Měřící zařízení

Následující testování motoru za účelem posouzení možnosti snížení emisí CO_2 a snížení spotřeby paliva bylo zrealizováno díky pomoci ze strany firmy MaxPower. Měření proběhlo na měřící stolici zn. Dynostar ETB 500, následně jsou uvedeny výstupu z měřící 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, předehřev atd. [93]

Dynostar Model ETB 500 má integrovaný vzduchem chlazený retardér. Maximální výkon, který může být absorbován, je 275 kW a maximální rychlost otáčení dynamometru je 7000 ot. /min. [93]

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 škrticí klapky
- Kalibrační závaží
- Dálkové ovládání
- Operativní instrukce
- označení CE
- Univerzální spojovací příruba pro více typů motorů

Obr. 36: Sestava měřícího zařízení, pro zkoušení parametrů motoru [93]

3.1.1.1 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.

Systém zahrnuje moduly:

- BEA 055, měřicí modul 4/5 plynů (CO, CO2, HC, O2, volitelně 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).

3.1.1.2 Zkušební vzorek

Motor 1.4 MPi, 59 kW, jedná se o atmosférický zážehový benzínový motor.

Tab. 4: Parametry sledovaného motoru udávané výrobcem

Kód výrobce	**1,4 MPI**
Palivo	**benzín**

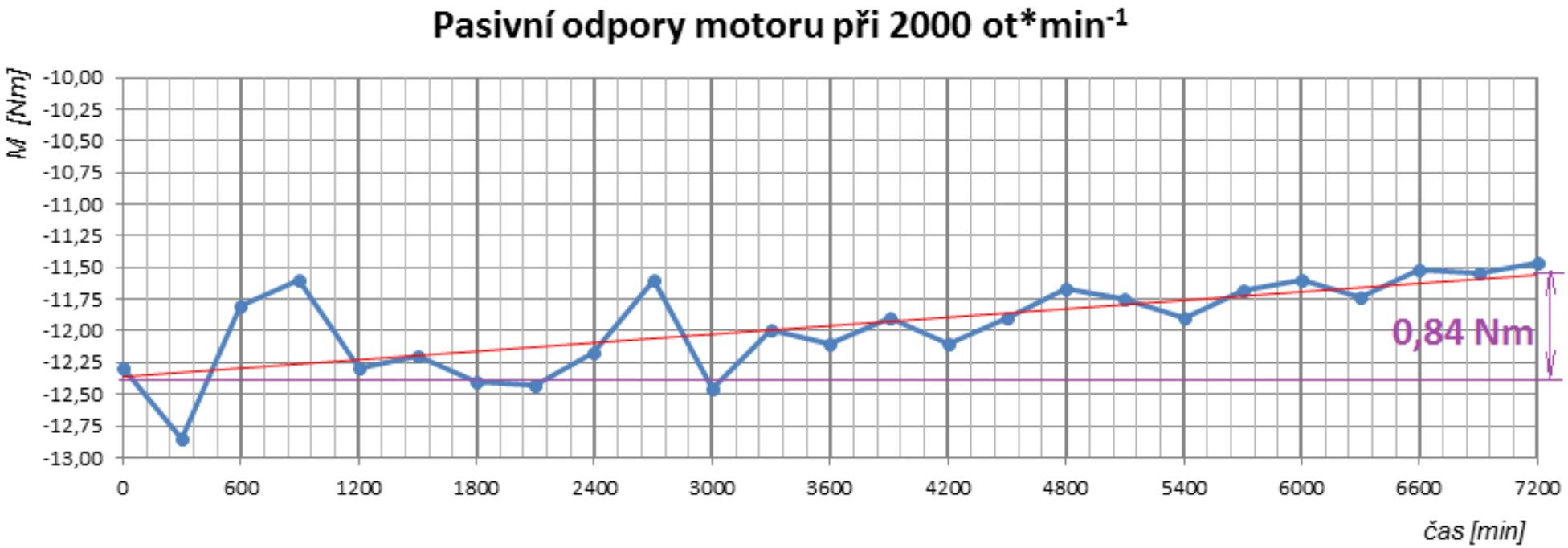
Zdvihový objem	**1 390 cm^3**
Výkon motoru	**59 kW (80 PS) @ 5000 ot/min**
Točivý moment	**132 Nm @ 3800 ot/min**
Rozvody	**OHC**
Válce	**4 / Řadový**
Počet ventilů	**16**

3.1.2 Vliv testovaných aditivních přísad do motorového oleje

V následujících tabulkách 6 až 8 a grafech 3, 4 a 5 jsou shromážděna technická data zjištěná z provedených experimentů, při použití aditivních přísad SVS. Pro lepší přehlednost byly zaznamenávány hodnosty každých 300 minut. Tato data a charakteristiky podrobně popisuje publikace [VV12].

Tab. 6: Naměřené hodnoty hmotné spotřeby paliva při volnoběhu motoru

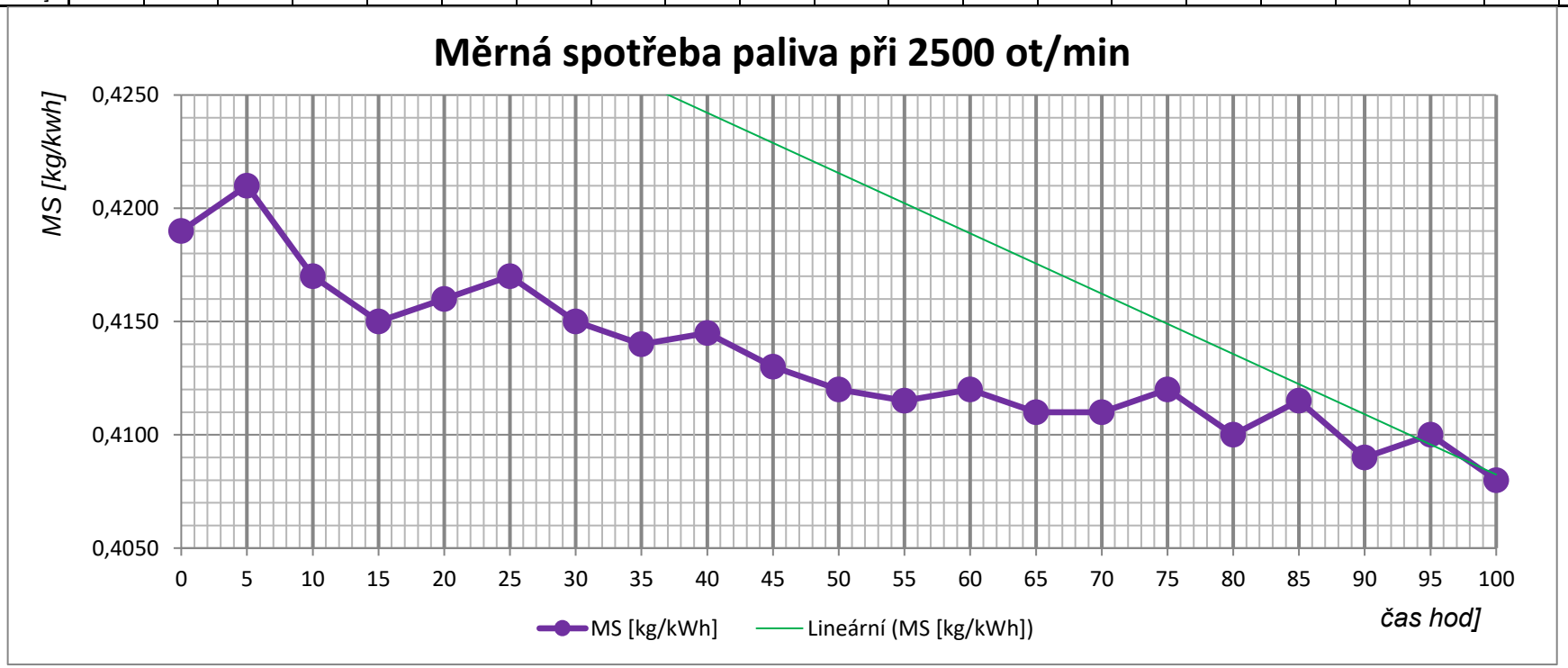
čas [min]	0	300	600	900	1200	1500	1800	2100	2400	2700	3000	3300	3600
M [Nm]	-12,30	-12,85	-11,80	-11,60	-12,30	-12,20	-12,40	-12,43	-12,17	-11,60	-12,45	-12,00	-12,10
čas [min]	3900	4200	4500	4800	5100	5400	5700	6000	6300	6600	6900	7200	
M [Nm]	-11,90	-12,10	-11,90	-11,67	-11,75	-11,90	-11,68	-11,60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



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

Tab. 7.: Naměřené hodnoty měrné spotřeby paliva (MS) při 2500 ot/min

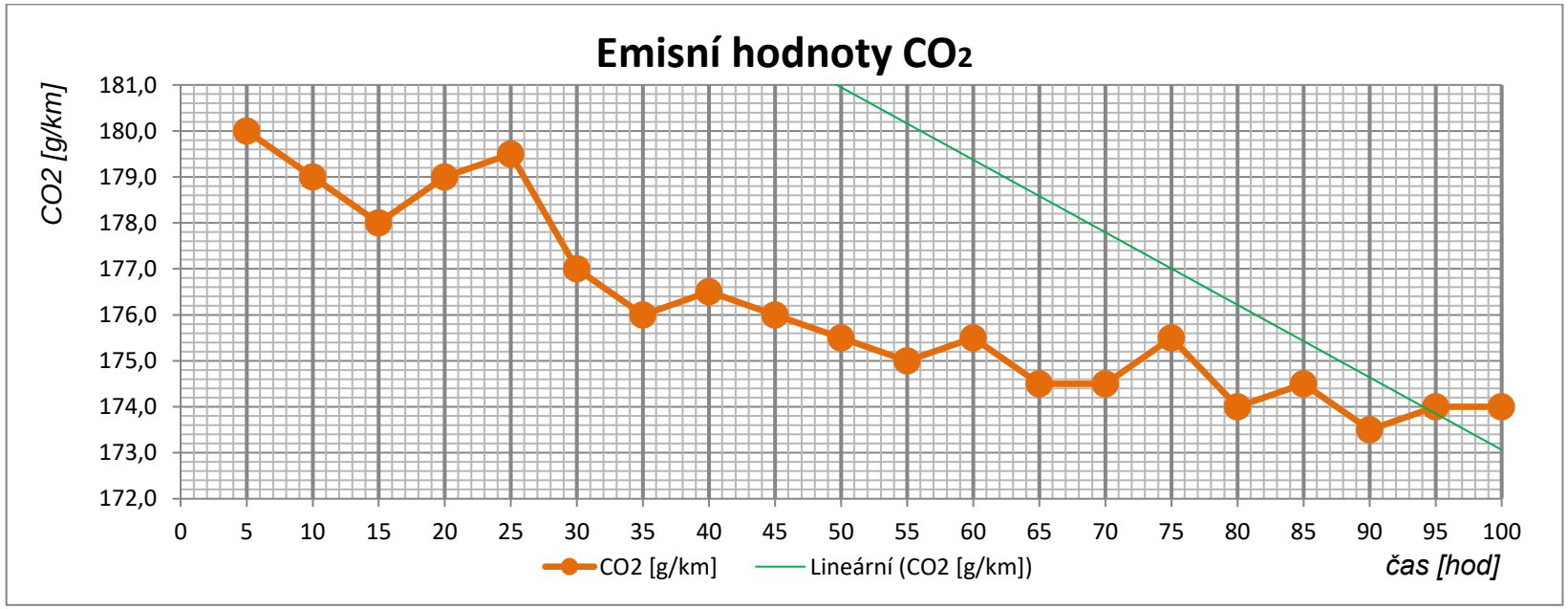
2500 ot/min	čas [hod]																			
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
MS [kg/kWh]	0,4190	0,4210	0,4170	0,4150	0,4160	0,4170	0,4150	0,4140	0,4145	0,4130	0,4120	0,4115	0,4120	0,4110	0,4110	0,4120	0,4100	0,4115	0,4090	0,4100	0,4080



Graf 4.: Hmotná spotřeba paliva s přípravkem SVS

Tab. 8: Emisní hodnoty CO_2 v závislosti na čase

	čas [hod]																			
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
CO2 [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 zkoušeným 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 CO_2 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 CO_2.

3.2 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 aditivy 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 WS_2 (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 podrobeny tribologickému testu. [VV15]

Vstupní parametry vzorků olejů:

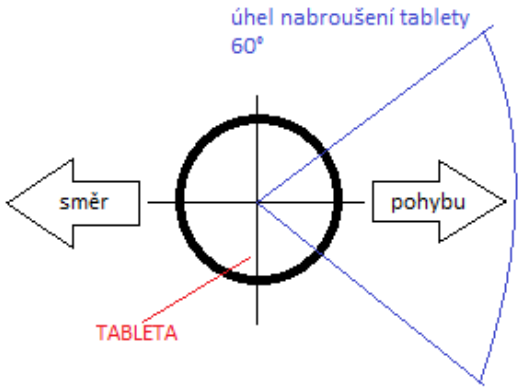
Tab. 9: Mísící poměr oleje s aditivem

Směšovací poměr suspenze IF WS_2 a oleje		
koncentrace suspenze IF WS_2	**množství oleje cm^3**	**množství suspenze WS_2 a oleje cm3**
1%	99	100

Tab. 10: Silové 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 37 je zobrazen měřící 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. 37: Schéma nabroušení tabely před měřením

Obr. 38: Popis směrů měření drsností

Následně byla každá tableta označena a byly přeměřeny parametry drsnosti podle následujícího schématu, které je vyobrazeno na obrázku 35.

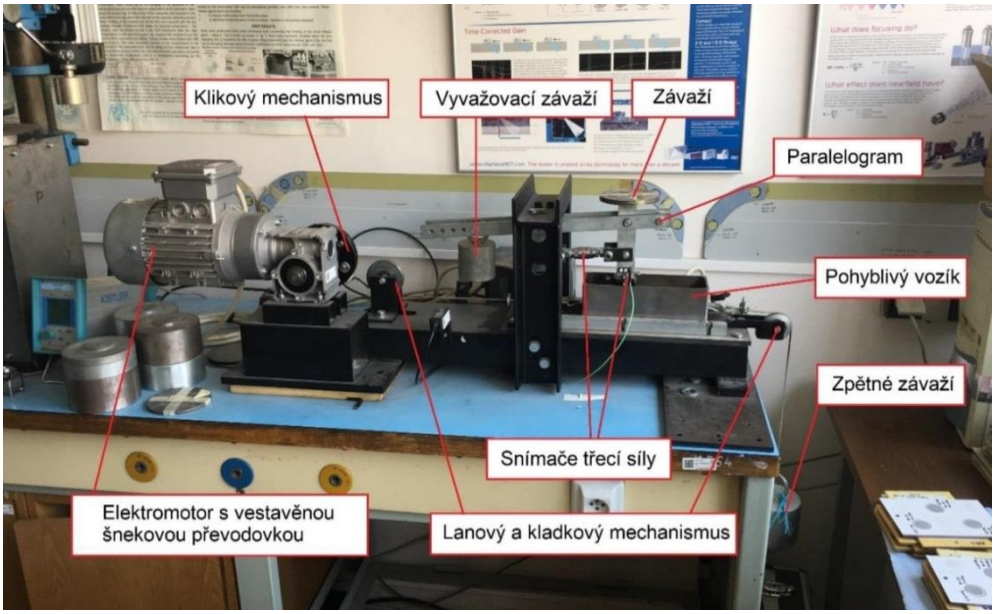
Hodnoty drsnosti byly měřeny ve dvou směrech. První směr je rovnoběžný se směrem pohybu desky vůči tabletě a druhý je na tento směr kolmý. Měření bylo provedeno před i po zkoušce na tribometru TOP 3. K měření drsnosti povrchu byl použit přístroj pro měření drsnosti Mitutoyo SJ-301. Měřeny byly parametry drsnosti Ra a Rz funkčního povrchu jak všech tablet a desek před, tak i po testech. [VV5], [VV15]

Obr. 39: Pracoviště měření drsností 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.

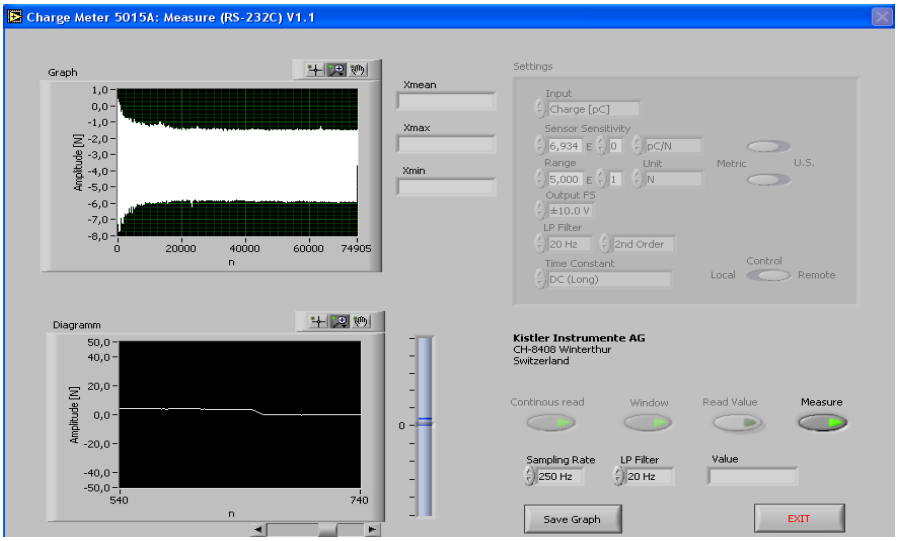
Parametr drsnosti Rz (největší výška profilu) je součet největší výšky a největší hloubky profilu v rozsahu základní délky, tento parametr je závislý i na způsobu dokončovací obráběcí technologii aplikované na zkoumaný povrch.

Následující obr. 40 schématicky popisuje jednotlivé hlavní členy tribometru TOP 3.



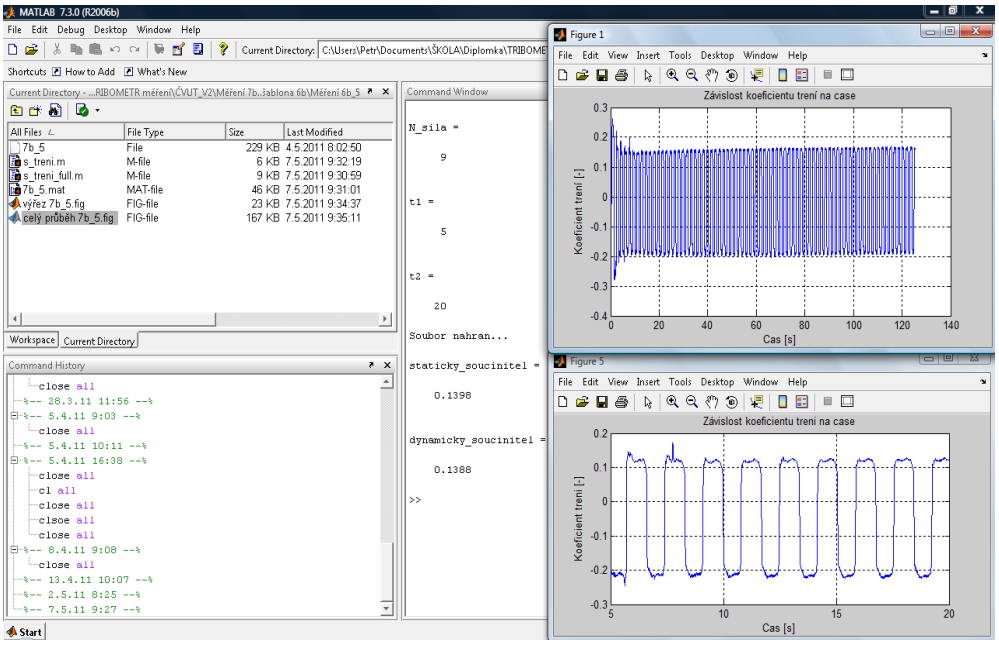
Obr. 40: Schématický popis tribometru TOP 3

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. 41: 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. 42 je vyobrazeno exemplární vyhodnocení koeficientu tření.



Obr. 42: Vzorové vyhodnocení koeficientu tření a jeho charakteristiky v programu Matlab.

3.2.1 Vliv přípravků s vhodnými nanočásticemi na hodnoty koeficientu tření

3.2.1.1 Měření koeficientu tření – nový olej 10W40

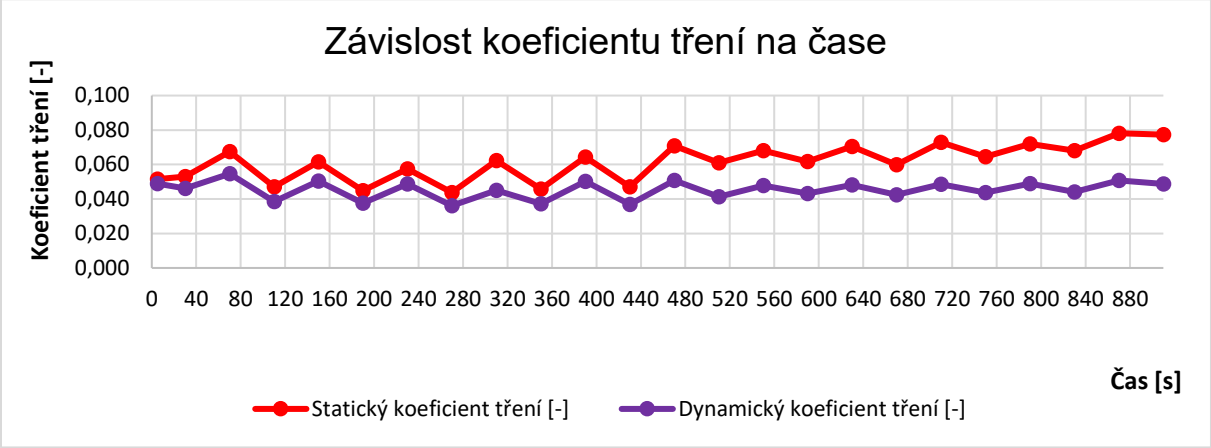
Tab. 11: Hodnoty koeficientu tření ocel – ocel, použitý olej 15 000km, tableta 60°

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

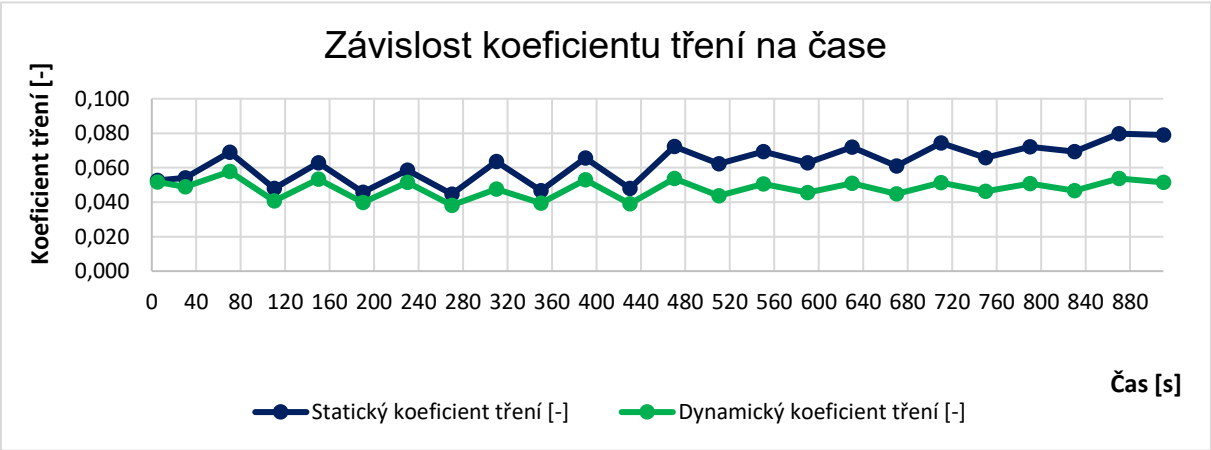
Tableta ozn.		Tpol1	Deska ozn.	***Dpo15***
interval. vyhodnocení koeficientu tření [s]			Statický koeficient tření [-]	Dynamický koeficient tření [-]
Od	Do	Pr. hodnota		
0	10	5	0,058	0,055
20	40	30	0,057	0,050
60	80	70	0,070	0,059
100	120	110	0,051	0,041
140	160	150	0,069	0,054
180	200	190	0,050	0,040
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
500	520	510	0,065	0,044
540	560	550	0,073	0,051
580	600	590	0,066	0,046
620	640	630	0,076	0,052
660	680	670	0,065	0,046
700	720	710	0,079	0,052
740	760	750	0,070	0,047
780	800	790	0,082	0,053
820	840	830	0,073	0,047
860	880	870	0,084	0,054
900	920	910	0,084	0,052
Ø hodnota koeficientu tření			***0,067***	***0,049***

3.2.1.2 Měření koeficientu tření – nový olej



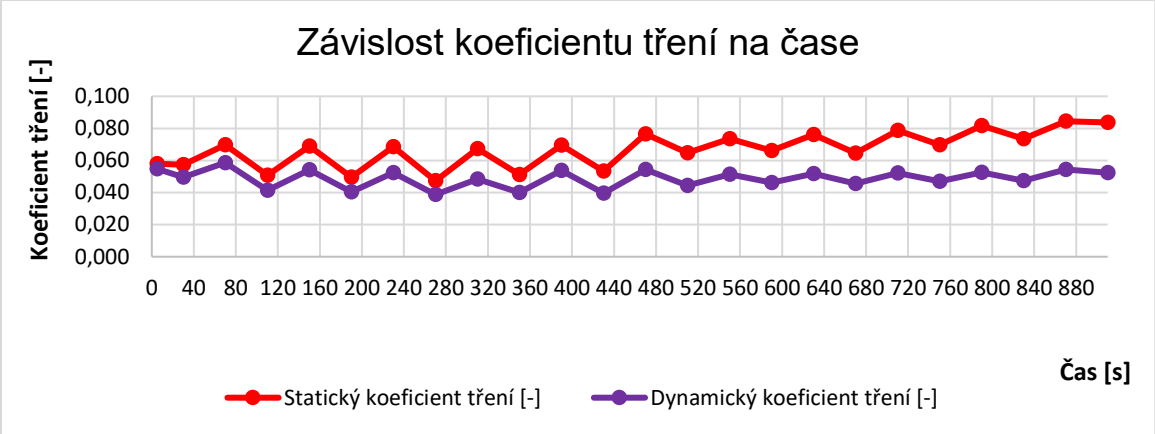
Graf 6: Závislost koeficientu tření na čase, ocelové tablety, nový olej

3.2.1.3 Měření koeficientu tření – použitý olej, nájezd 10 000km



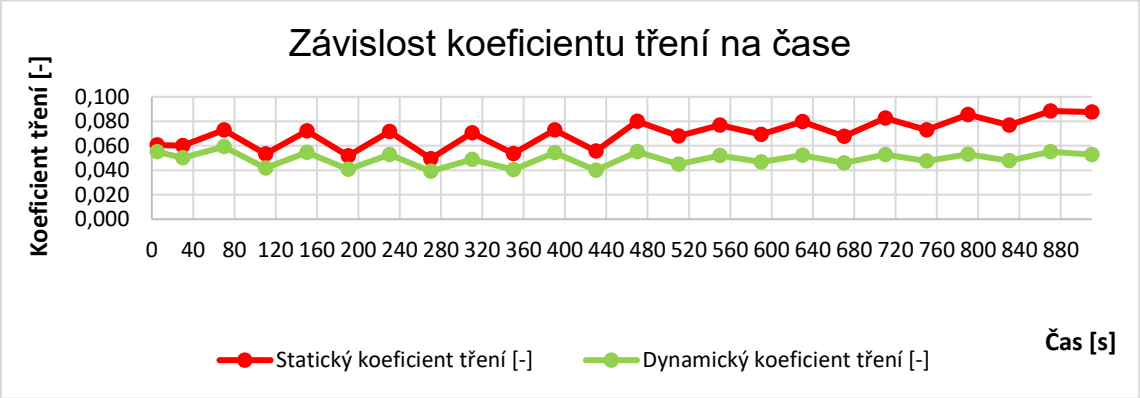
Graf 7: Závislost koeficientu tření na čase, ocelové tablety, použitý olej 10 000km.

3.2.1.4 Měření koeficientu tření – použitý olej, nájezd 15 000km



Graf 8: Závislost koeficientu tření na čase, ocelové tablety, použitý olej 15 000km.

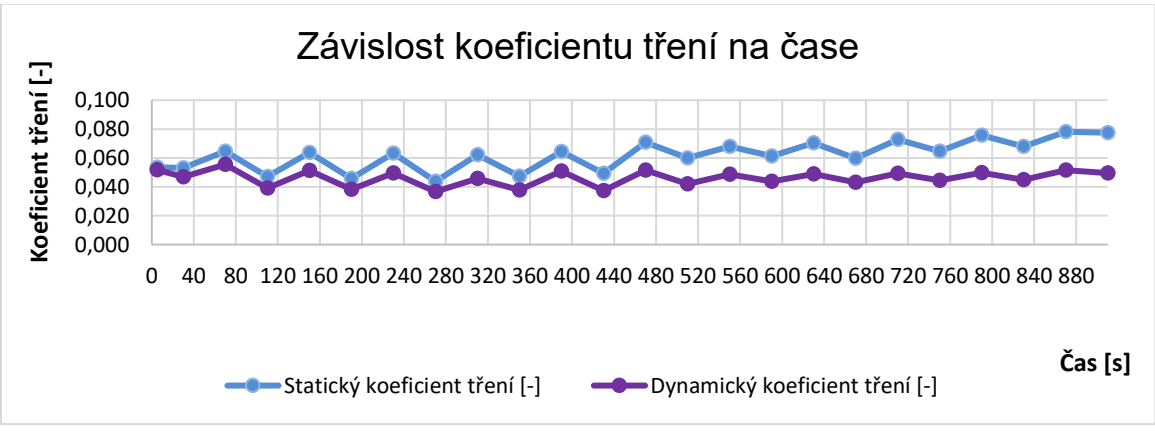
3.2.1.5 Měření koeficientu tření – použitý olej, nájezd 20 000km



Graf 9: Závislost koeficientu tření na čase, použitý olej 20 000km.

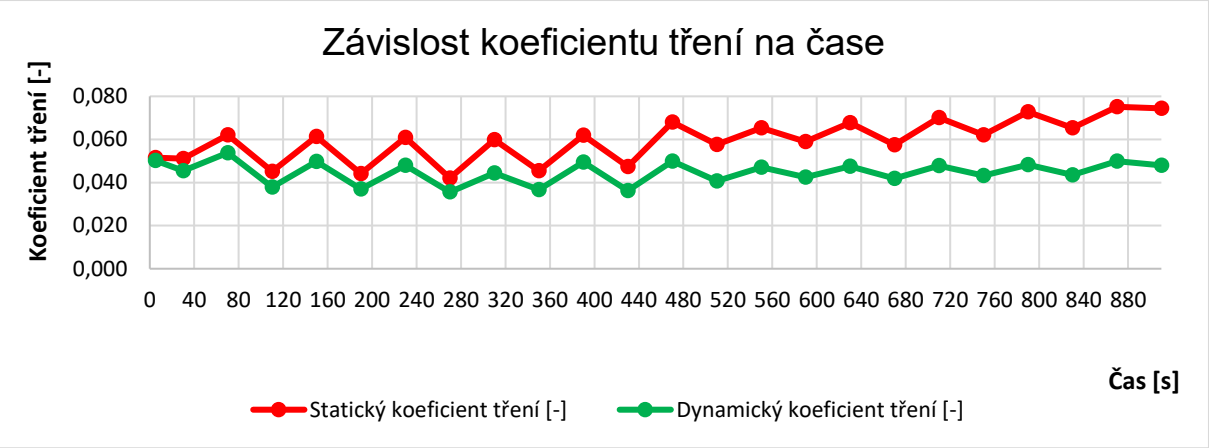
3.2.2 Vliv mazacího oleje v kombinaci aditivním přípravkem na koeficient tření

3.2.2.1 Měření koeficientu tření – použitý olej, 20 000km s aditivem IF WS_2 (3%)



Graf 10: Závislost koeficientu tření na čase, použitý olej 20 000km, aditivum IF WS_2 3%.

3.2.2.2 Měření koeficientu tření – použitý olej, 20 000km s aditivem IF WS_2 (5%)



Graf 11: Závislost koeficientu tření na čase, použitý olej 20 000km, aditivum IF WS_2 3%.

3.2.2.3 Výsledky a jejich korelace

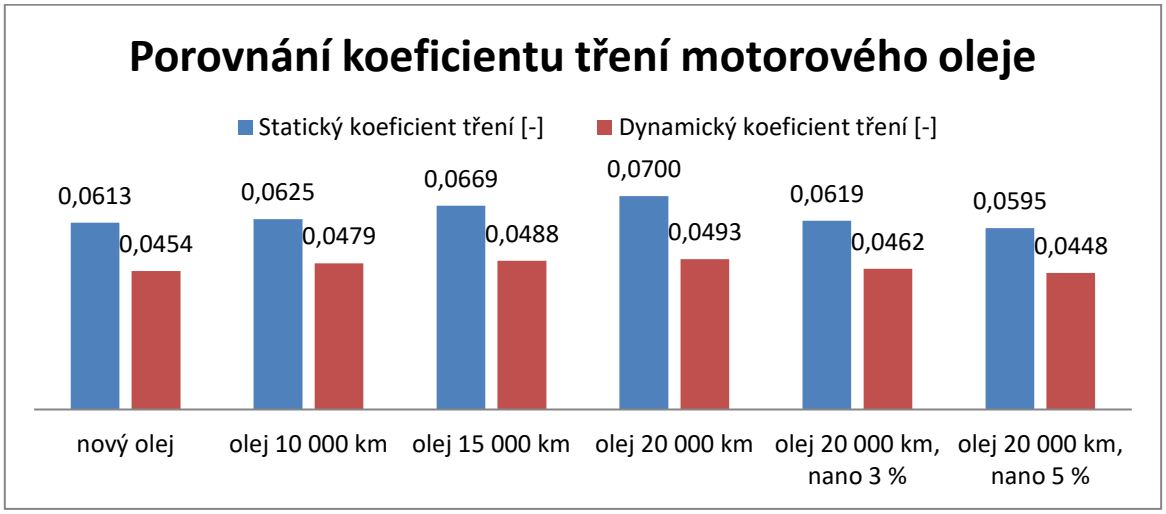
Jak je z výsledků provedených testů patrné, olej v průběhu nájezdu 20 000 km, ztrácí své kvality z pohledu mazacích vlastností respektive, vykazuje vyšší koeficienty tření.

Tab. 13: Hodnoty koeficientu tření motorového oleje – kilometrový nájezd

Mazivo	Statický koeficient tření [-]	Dynamický koeficient tření [-]
nový olej	0,0613	*0,0454*
olej 10 000 km	0,0625	*0,0479*
olej 15 000 km	*0,0669*	*0,0488*
olej 20 000 km	0,0700	0,0493
olej 20 000 km, nano 3 %	0,0619	0,0462
olej 20 000 km, nano 5 %	0,0595	0,0448

Z těchto uvedených závislosti lze vyvozovat značný přínos při aplikaci nanočástic IF-WS_2 do oleje. V podstatě po aplikaci aditiva do použitého oleje s nájezdem 20 000 km, došlo ke zlepšení hodnot koeficientů tření. Tyto hodnoty jsou velmi podobné, spíše lepší, hodnotám koeficientů tření, které vykazuje nový nepoužitý motorový olej. [VV4], [VV15]

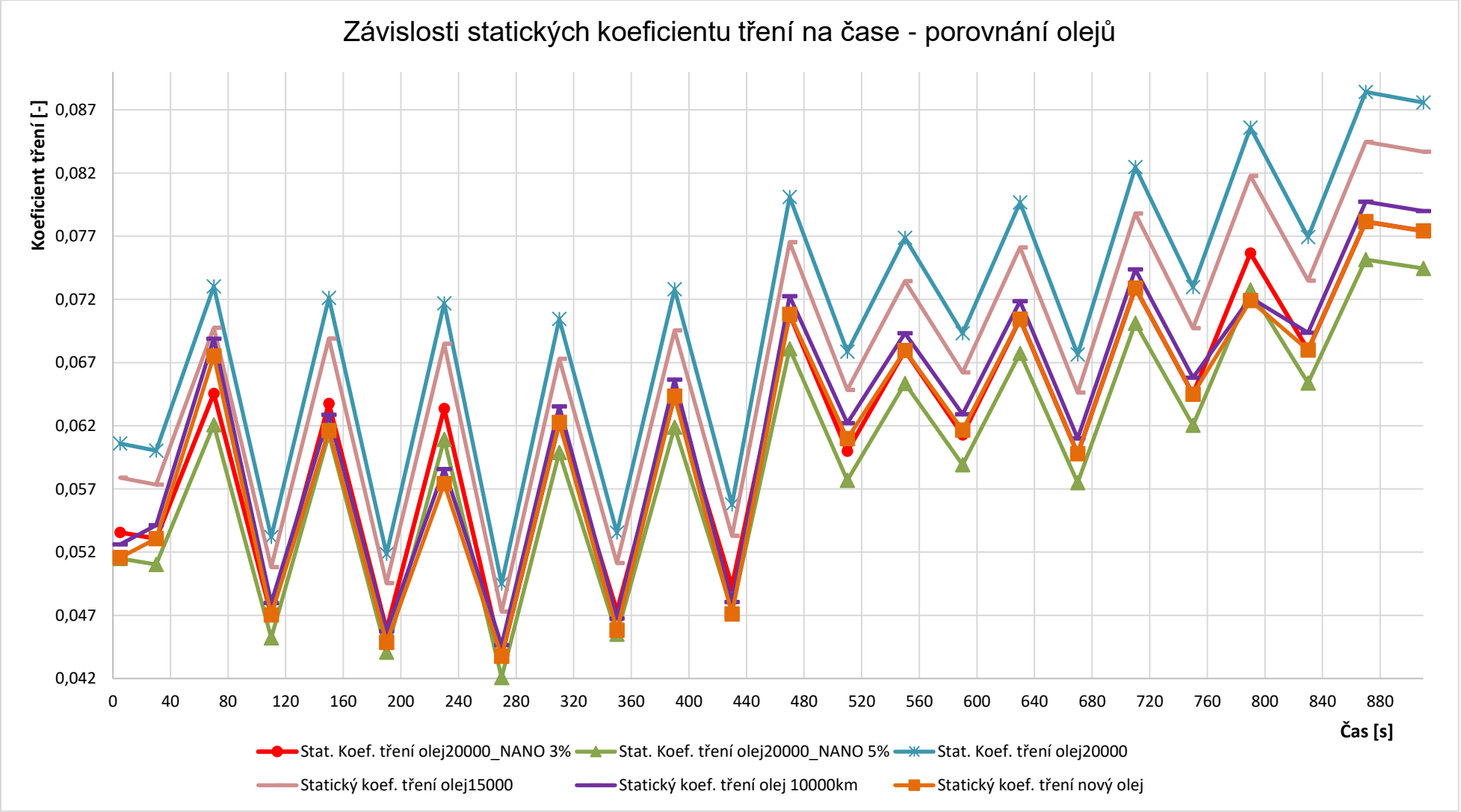
V následujícím grafu jsou uvedeny pro lepší přehlednost průměrné hodnoty koeficientů tření testovaného oleje a oleje s aditivem o koncentraci aditivních nanočástic 3 a 5 %.



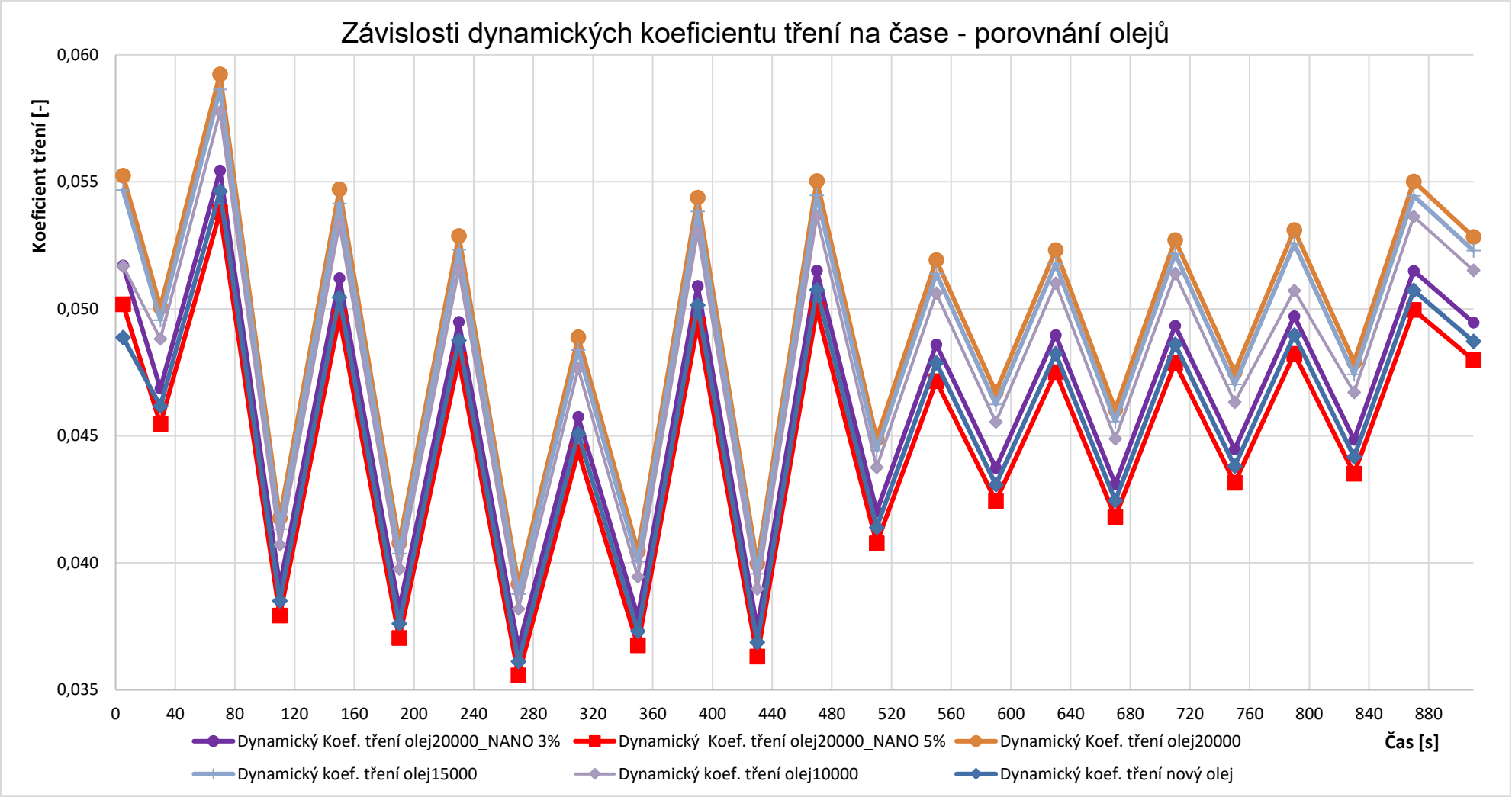
Graf 12: Porovnání koeficientů tření motorového oleje v závislosti na jeho kilometrovém opotřebení a aditivace pomocí nanočástic.

Jak je z grafu 12. Patrné po aplikaci aditiva s nanočásticemi o koncentraci 5 % do použitého oleje, došlo ke snížení dynamického koeficientu tření o 0,0045 oproti oleji se stejným nájezdem. Což je snížení koeficientu tření o 10 % a o 1,4 % oproti hodnotě dynamického koeficientu tření nového neopotřebovaného oleje. [VV5], [VV8]

Graf 13. a Graf 14. popisuje průběhy statických a dynamických koeficientů tření v závislosti na čase testu na tribometru. U mazacích olejů je důležité sledování vývoje dynamického koeficientu tření, protože tento parametr určuje mazací vlastnosti oleje právě při takto namáhajících aplikacích. [VV8]



Graf 13: Porovnání grafických závislostí statických koeficientů tření – porovnání olejů



Graf 14: Porovnání grafických závislostí dynamických koeficientů tření – porovnání olejů

3.3 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 závitu, pod hlavou šroubu nebo pod maticí.

3.3.1 Testování koeficientů tření – maziva

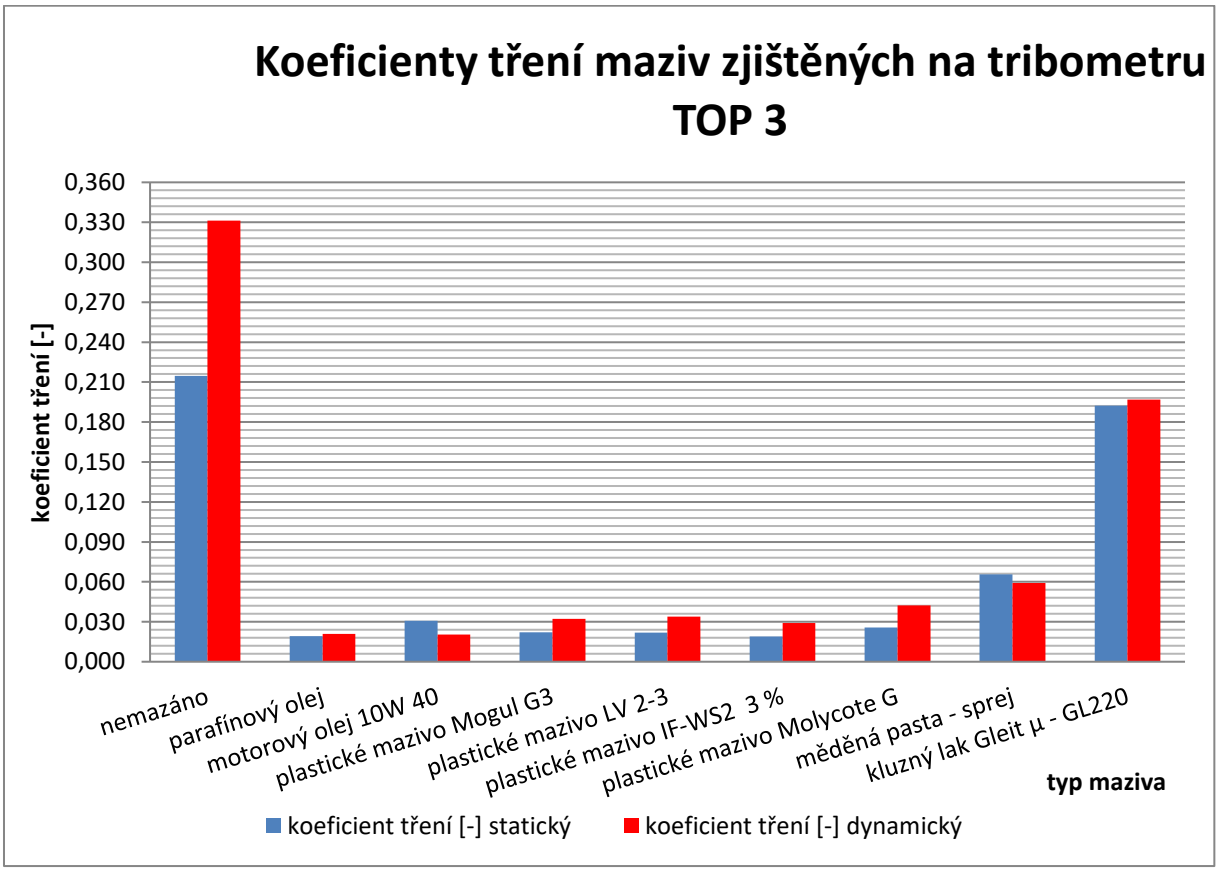
Pro porovnání a ověření vlivu maziva na velikost osového předpětí bylo nutné určit základních hodnoty koeficientů tření. Vybrané typy maziva byly podrobeny testu na tribometru. Zatížení bylo zvoleno a vytvořeno pomocí ocelového závaží 2 kg, funkční dvojice ocelová deska – tableta, délka testu 5 minut.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

Obr. 43: 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. [VV1], [VV2].

Tab. 14: 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

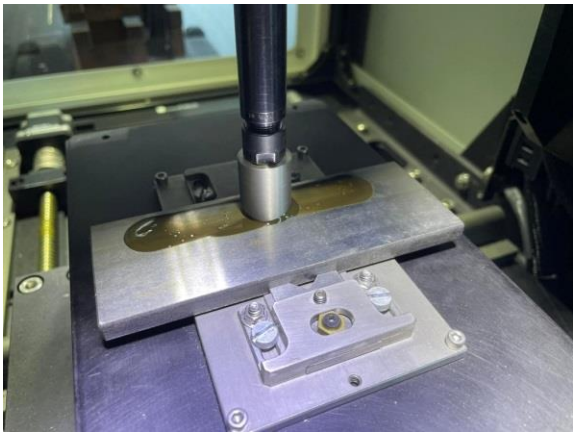


Graf 15: Grafické znázornění naměřených hodnot koeficientů tření maziv na tribometru TOP 3

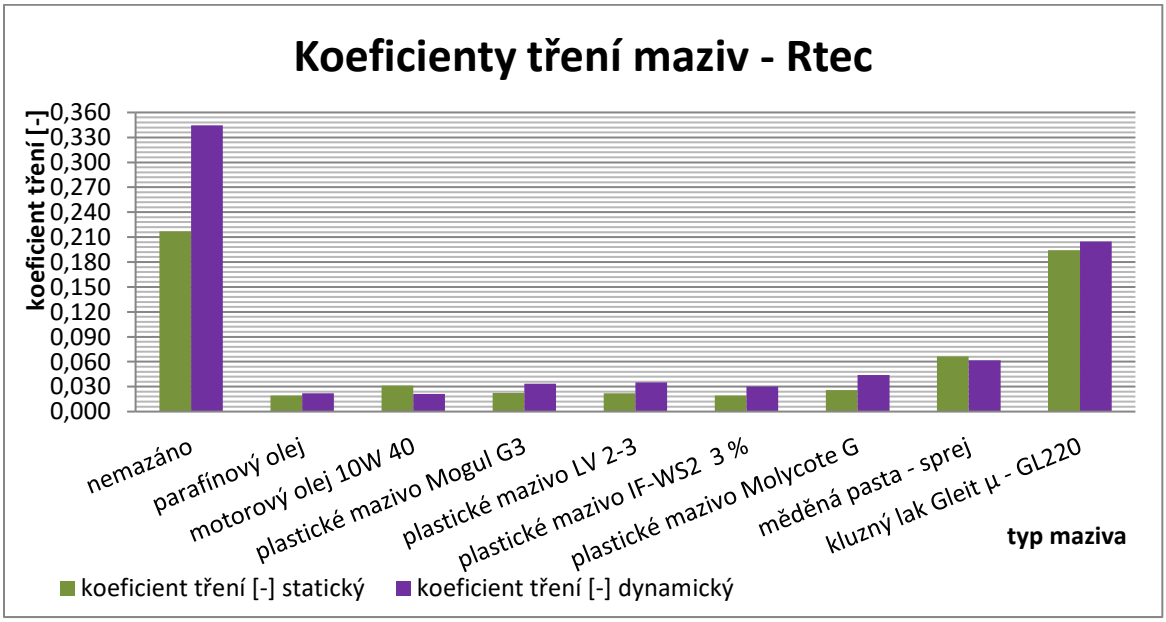
Pro ověření výše uvedených hodnot a kalibraci použité měřící techniky bylo uskutečněno kalibrační měření na tribometru Rtec. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce 14. Tento novější přístroj má řadu výhod, hlavní je možná volba zatěžování a jeho monitoring.

Tab. 15: 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
měděná pasta - sprej	0,0662	0,0616
kluzný lak Gleit µ - GL220	0,1944	0,2048



Obr. 44: Kalibrační měření na tribometru Rtec



Graf 16: 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 13 a 14, hodnoty jsou téměř identické jako hodnoty naměřené na tribometru TOP 3.

3.3.2 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.

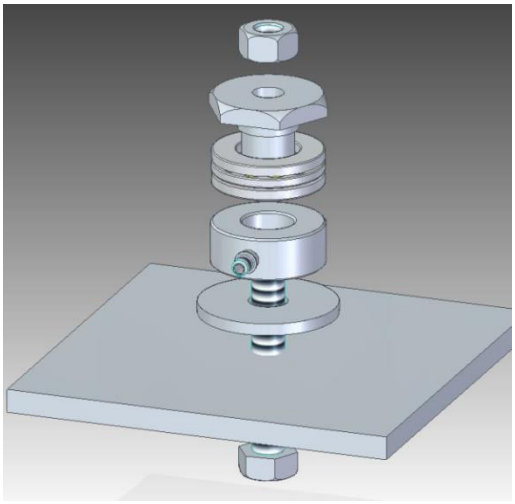
Správné stanovení hodnot jednotlivých součinitelů tření je obtížné, a to z více důvodů. Jedná se o soubor faktorů, které ovlivňují tyto parametry:

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

3.3.2.1 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 dříku šroubu.

Pro správnou funkci měřicích členů a eliminaci tření mezi matici 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 měřicího členu.

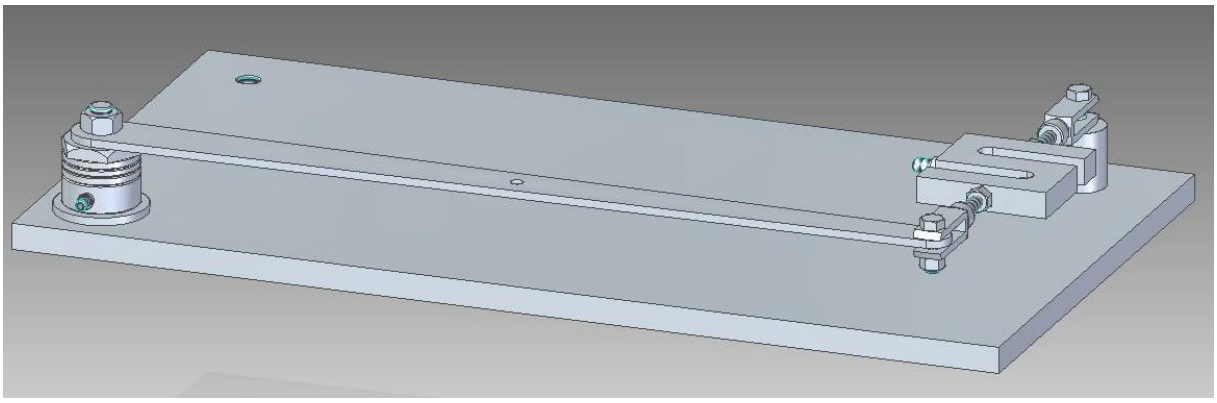


Obr. 45: Schématický model sestavy zkušebního členu

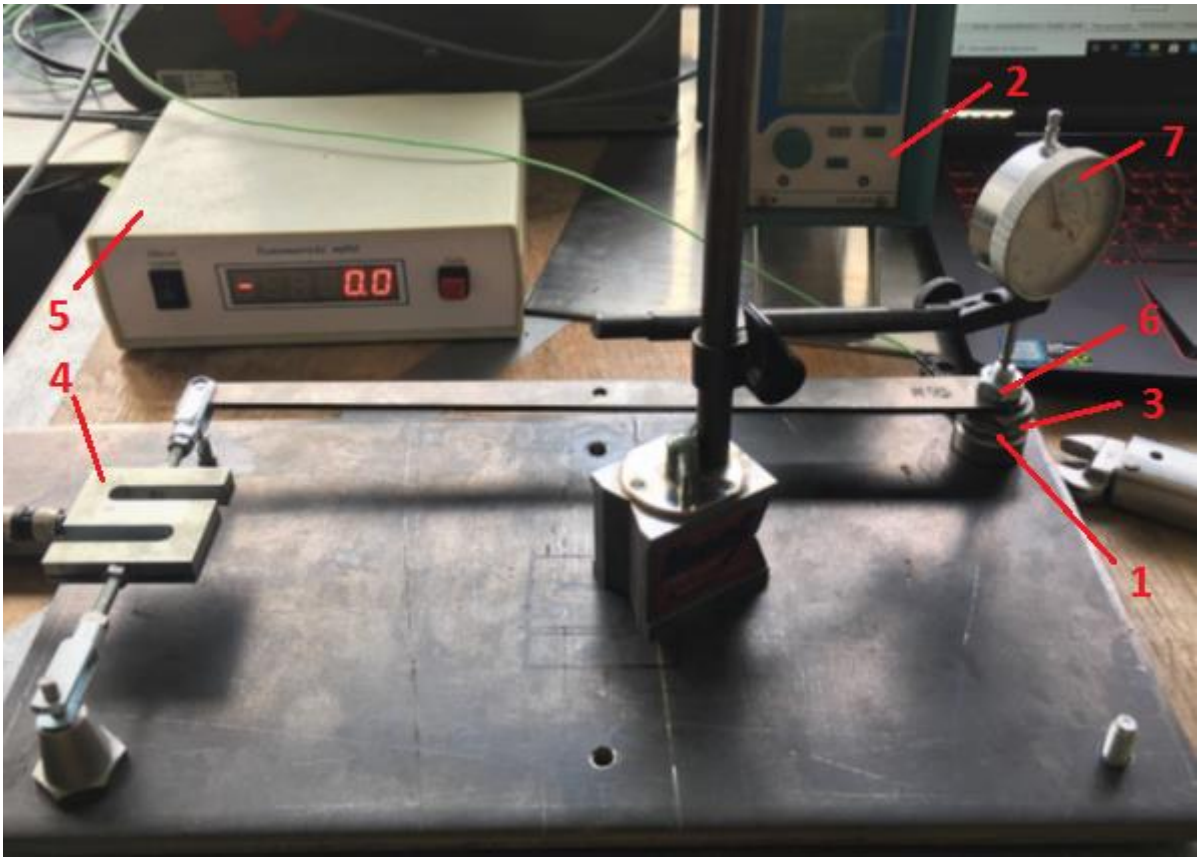
Obr. 46: Zkušební měřící člen

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. 47: 3D model navrženého měřicího zařízení pro zjišťování třecích momentů ve šroubovém spoji



Obr. 48:Sestava zrealizovaného měřícího zařízení, včetně snímání prodloužení dříku 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)

  Měřící rozsah – 0 až 100 kN

- Měřící jednotka – KISTLER Charge Meter Type 5015 (pozice 2)
- Axiální ložisko – SKF 51102 (pozice 3)
- Tenzometrický snímač – VTS, typ F181 (pozice 4)

  Měřící rozsah – 0 až 100 N

- Tenzometrické měřící zařízení – TENZ 2307C (pozice 5)
- Testované šrouby a matice – M6, M8 a M10 (pozice 6)
- Číselníkový úchylkoměr Kinex

  Měřící rozsah – 0-10 mm, 0,01mm (pozice 7)

3.3.2.2 Vzorky šroubových spojů

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

Obr. 49: Vzorky spojovacího materiálu, se závity M6, M8, M10, PÚ-galvanické zinkování

3.3.3 Experimentální měření vlivu koeficientu tření na závislost krouticího momentu a osové síly

Tab. 16: Doporučené hodnoty utahovacích momentů a vypočtené hodnoty osové síly.

Pevnost		5.8		8.8	
D	P	M_K [Nm]	Fo [N]	M_K [Nm]	Fo [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. 17: Vypočtené parametry závitů

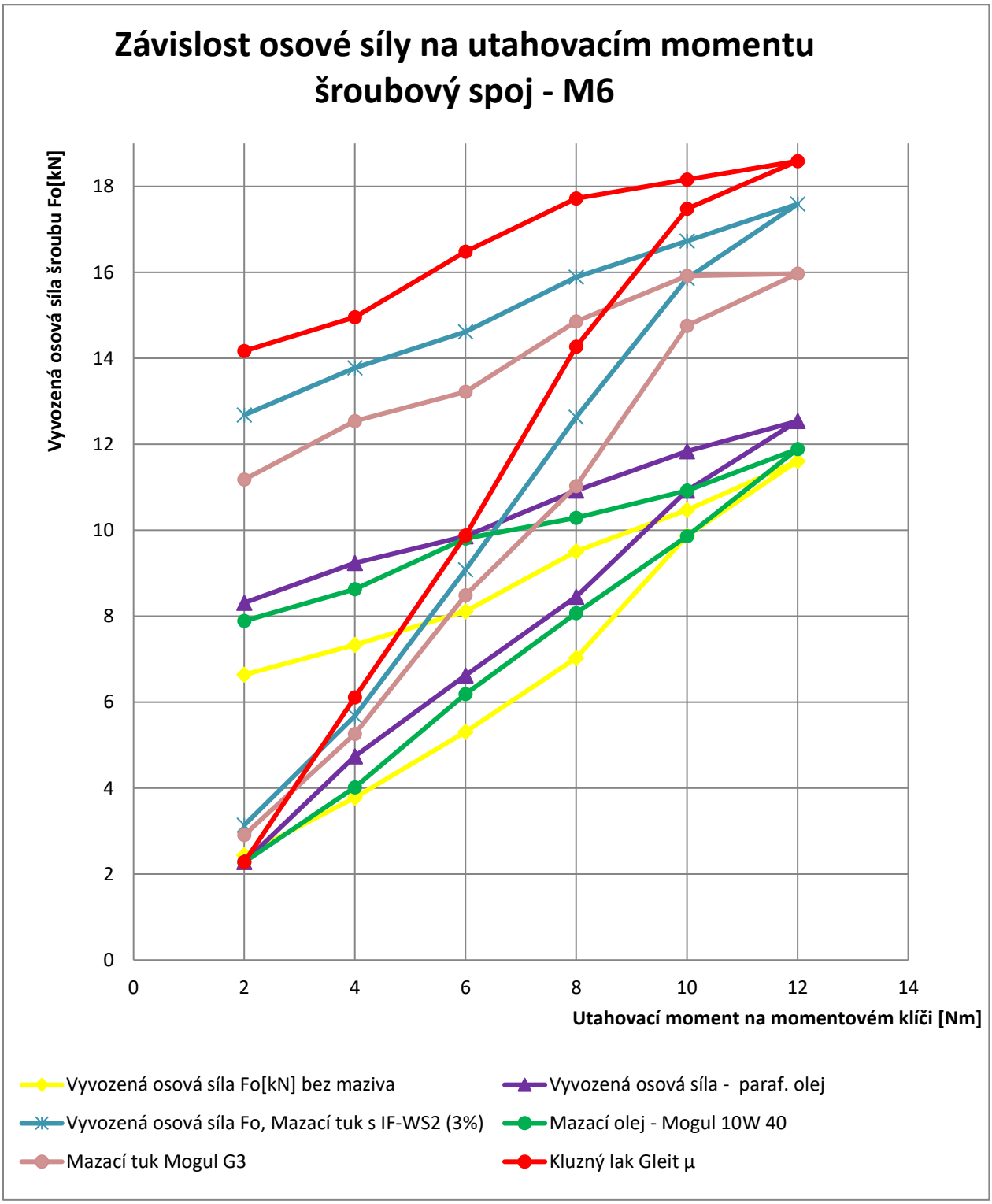
Závit	Stoupání P_h [mm]	Střední průměr d_2 [mm]	Úhel stoupání γ [rad]	Úhel stoupání γ [°]
M6	1	5,35	0,059427119	3,404923094
M8	1,25	7,188	0,055297957	3,168339538
M10	1,5	9,026	0,05284957	3,028057282

3.3.3.1 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).

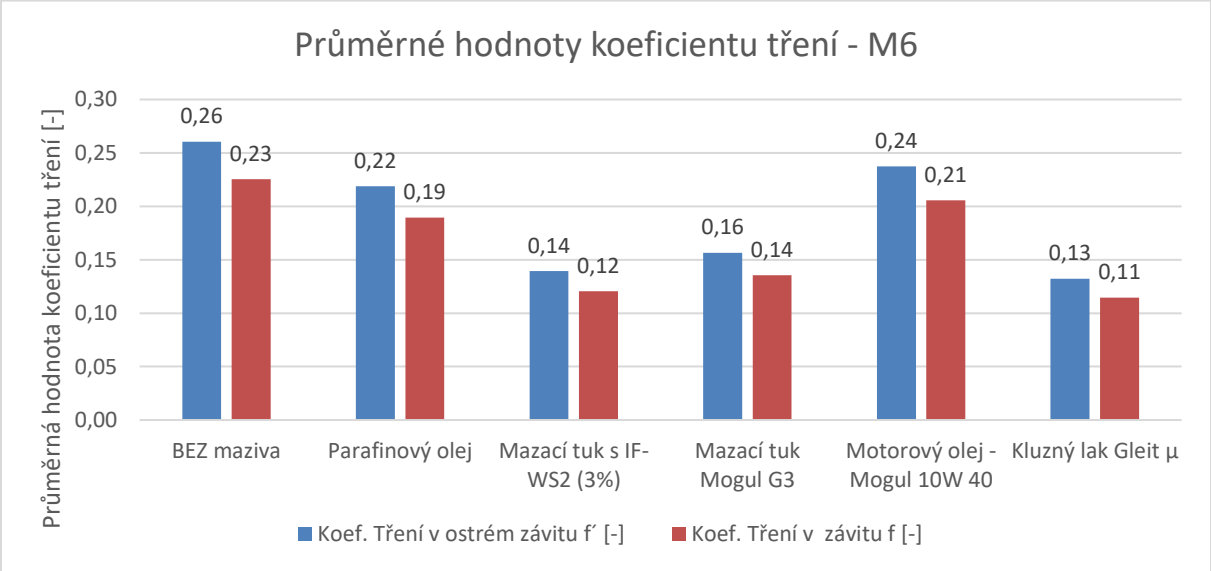
Následující graf 17. zobrazuje závislosti dotahovacího momentu na osovém předpětí šroubového spoje se závitem M6, vzhledem k použitému mazivu aplikovaného do oblasti závitu matice. V grafu jsou zaznamenány charakteristiky, které popusují proces dotahování až na hodnotu doporučeného momentu k dané velikosti testovaného šroubu (závitu), následně byl daná spoj odlehčování v krocích po 2 Nm. I tento proces povolování je zachycen v grafu.

3.3.3.2 Výsledky měření osové síly v závislosti na utahovacím momentu šroubu - M6



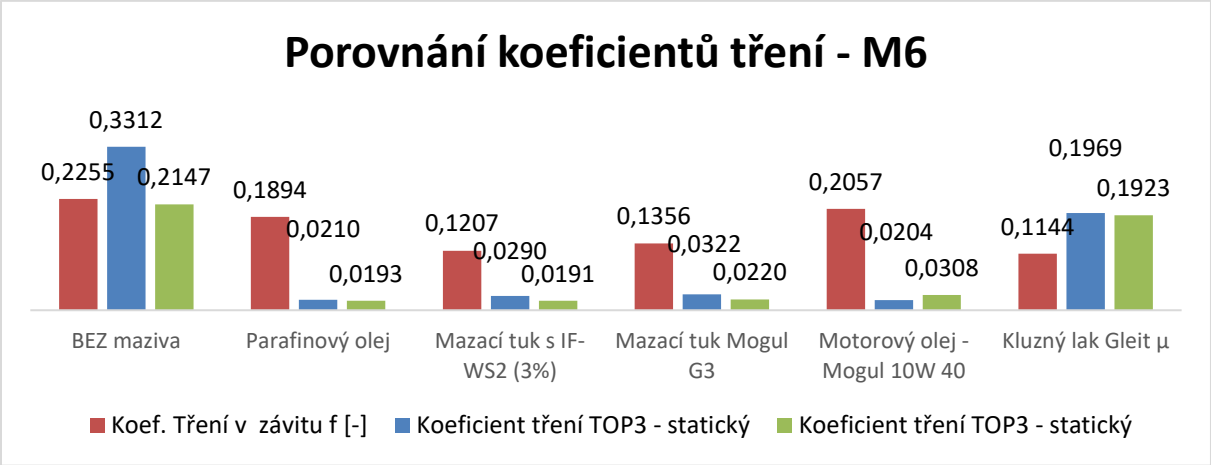
Graf 17: Závislost osové síly na utahovacím momentu šroubu – závit M6

Následující graf 18. 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 zadírání.



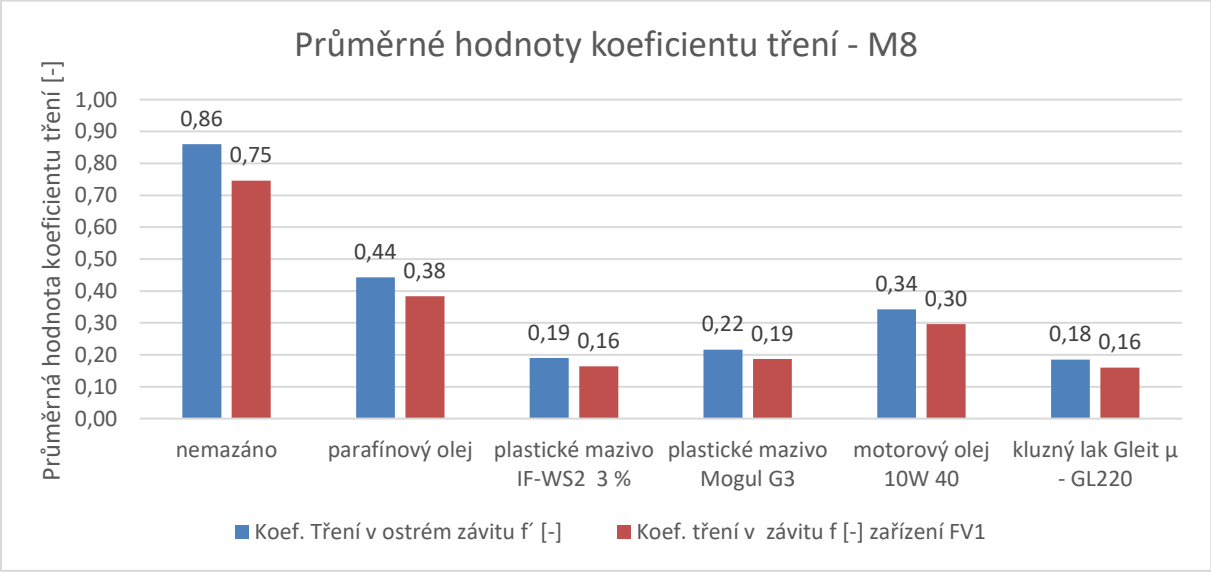
Graf 18: Zjištěné hodnoty koeficientů tření pro šroubový spoj se závitem M6.

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 viz. publikace [VV1].

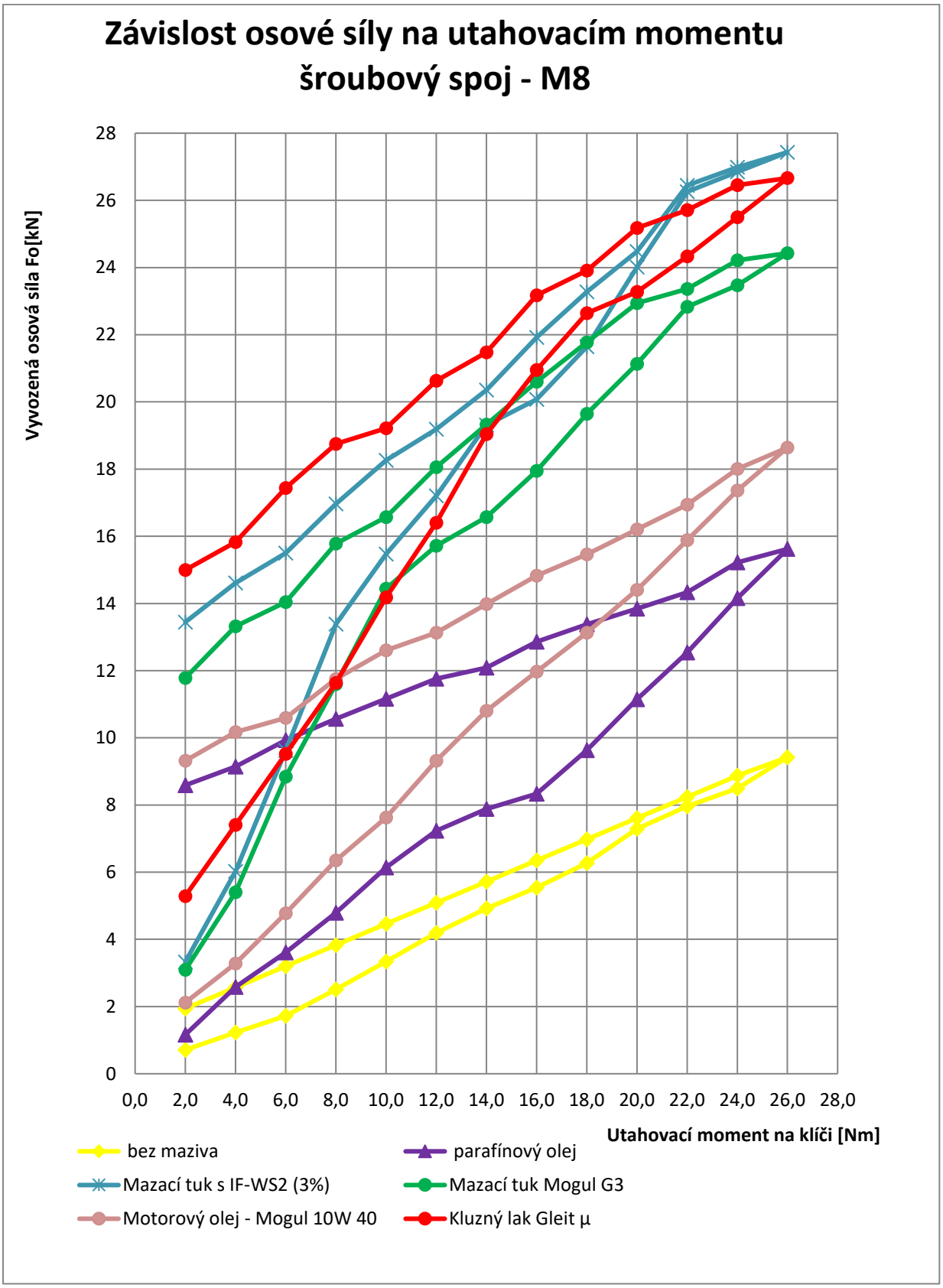


Graf 19: Porovnání koeficientů tření naměřených na tribometru TOP 3 a na zařízení FV1.

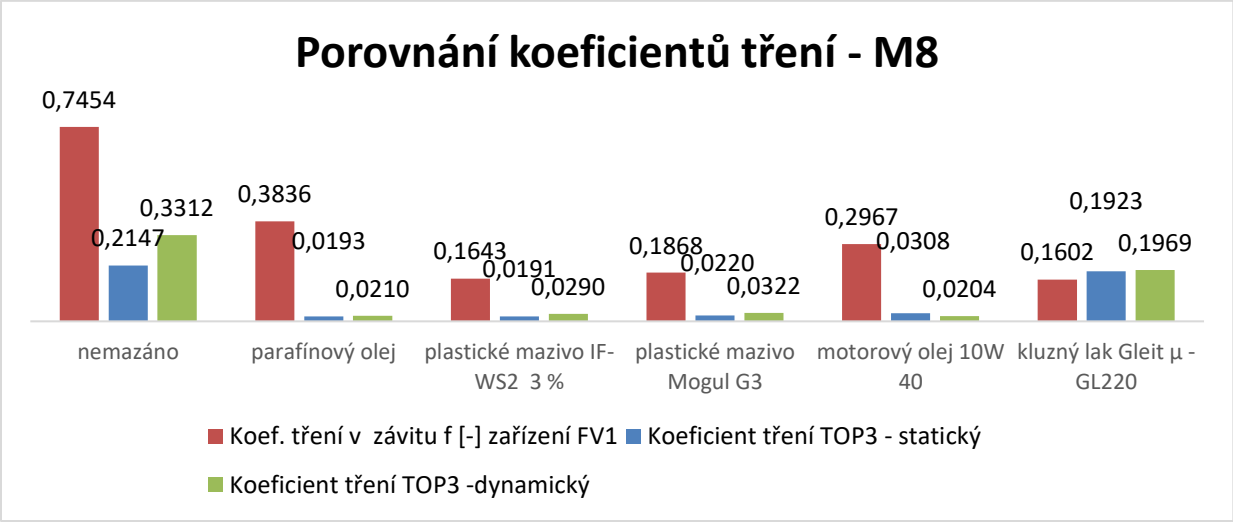
Pro porovnání byly provedeny měření i na šroubech se závity M8 a M10 se standardizovaným, základním stoupáním. Charakteristiky závislostí osové síly na dotahovacím momentu a použitém mazivu či povrchové úpravě, jsou zaznamenány v následujících dvou grafech a podrobně popsány v publikaci [VV1] a [VV2]. Grafy jednotlivých testů a průběhy koeficientu tření v závitu jsou uvedeny v přílohách [P4] této práce.



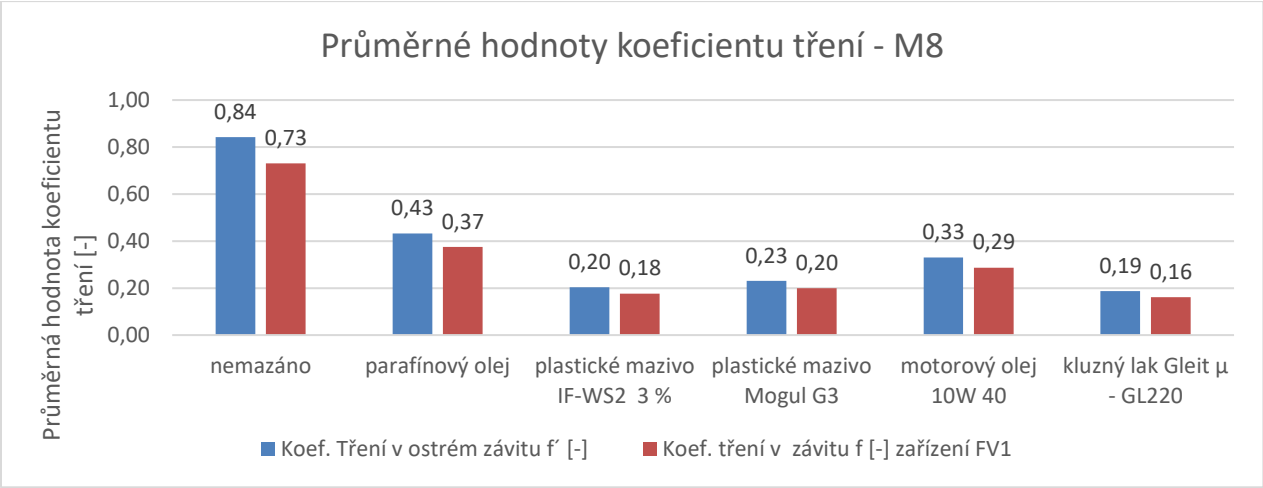
Graf 20: Zjištěné hodnoty koeficientů tření pro šroubový spoj se závitem M8.



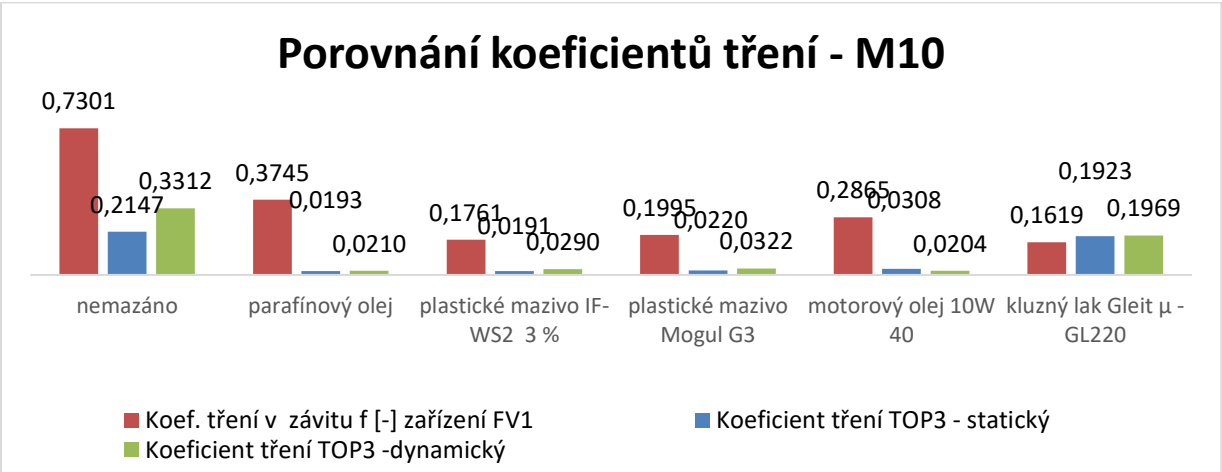
Graf 21: Závislost osové síly na utahovacím momentu šroubu – závit M8.



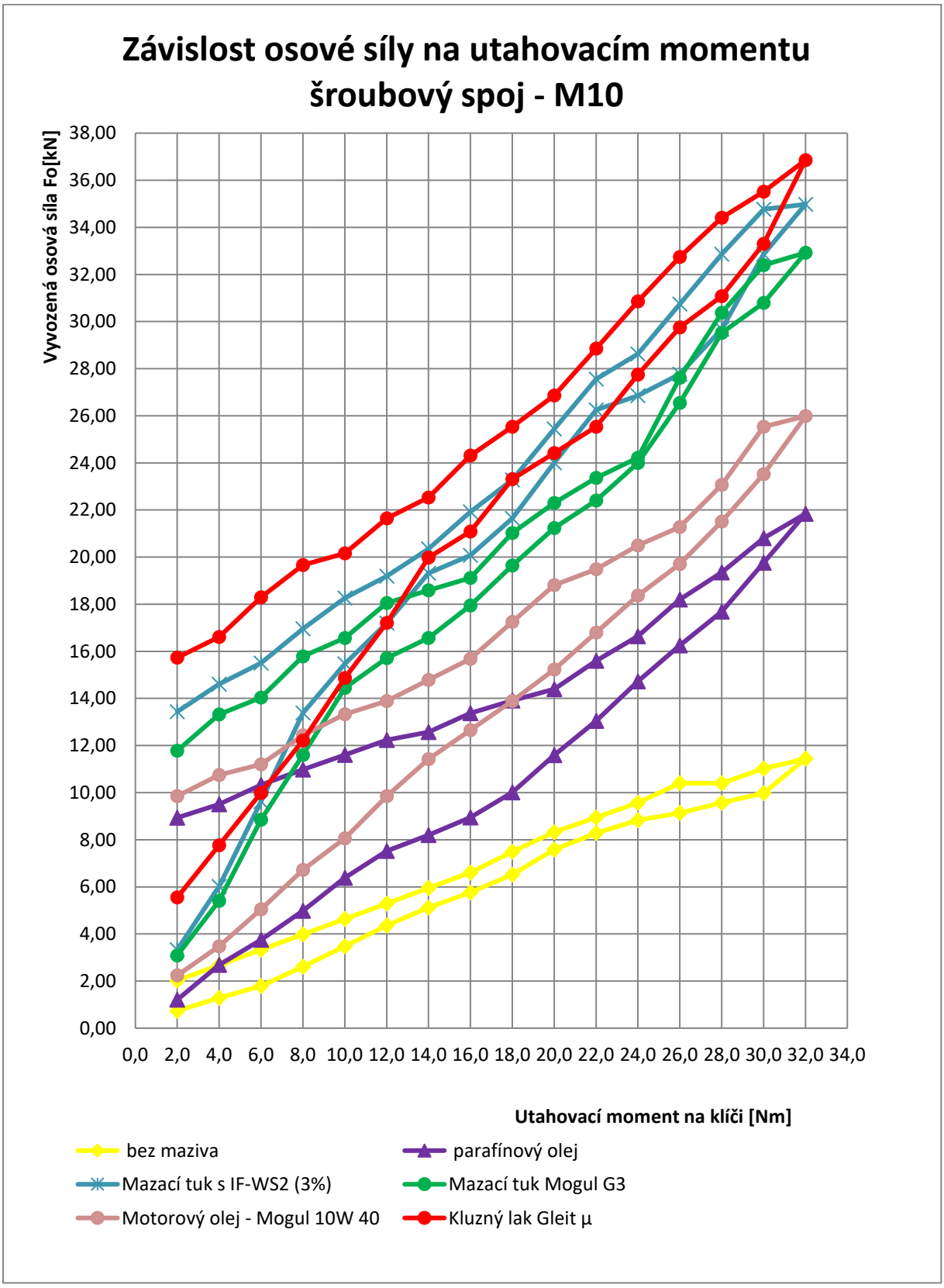
Graf 22: Porovnání koeficientů tření naměřených na tribometru TOP 3 a na zařízení FV1 -závit M8.



Graf 23: Zjištěné hodnoty koeficientů tření pro šroubový spoj se závitem M10.



Graf 24: Porovnání koeficientů tření naměřených na tribometru TOP 3 a na zařízení FV1- závit M10.



Graf 25: Závislost osové síly na utahovacím momentu šroubu – závit M10.

3.4 Brzdové uzly

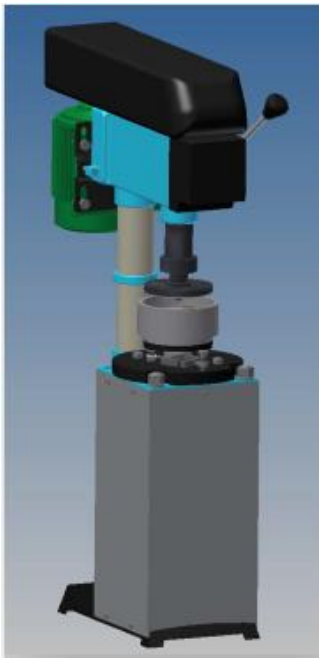
Následně popsaná experimentální část je zaměřená na zjišťovaní a porovnávání tribologických vlastností materiálů. Hlavní těžiště spočívá ve sledování a zhodnocování třecích koeficientů, hmotnostních a rozměrových úbytků funkčních dvojic.

3.4.1 Návrh a inovace zkušebního zařízení

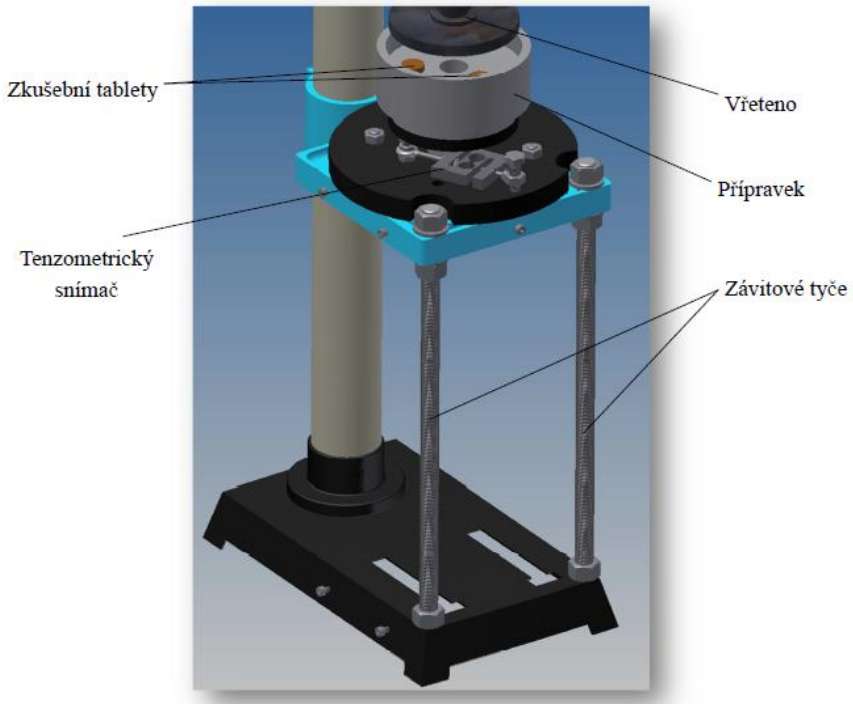
Tribometr VRT 02, na kterém se prováděly testy, byl v rámci této disertační práce inovován pomocí nové snímací techniky, dále byly vyrobeny přípravky a redukce pro upínání brzdových materiálů. Toto zařízení má oproti stávajícímu tribometru TOP 3 několik výhod.

- 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 hlavice válečky-tabletami vyrobených ze třech různých základních materiálů a tím simulovat skladbu brzdného kompozitního materiálu.



Obr. 50: Celková sestava tribometru VRT02

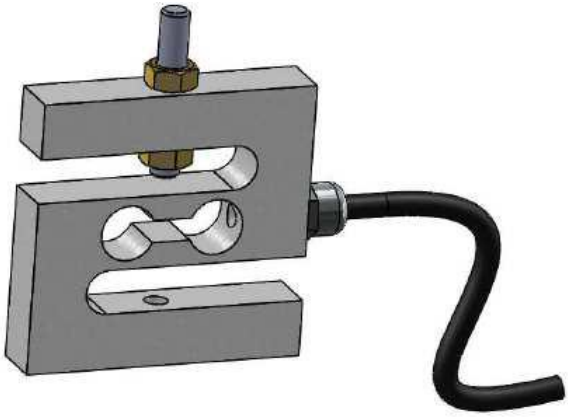


Obr. 51: Schématický popis tribometru VRT 02

3.4.1.1 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 sily dochází k unášivému pohybu po kružnici o průměru 80mm, reakcí tohoto posunu a vyvozena unášivá síla, kterou zaznamenává níže vyobrazený a popsaný tenzometrický snímač. Zjištěné hodnoty se vloží do vyhodnocovacího softwaru napsaného na platformě MS Excel, a ten vyhodnotí a vytvoří grafické závislosti měření.



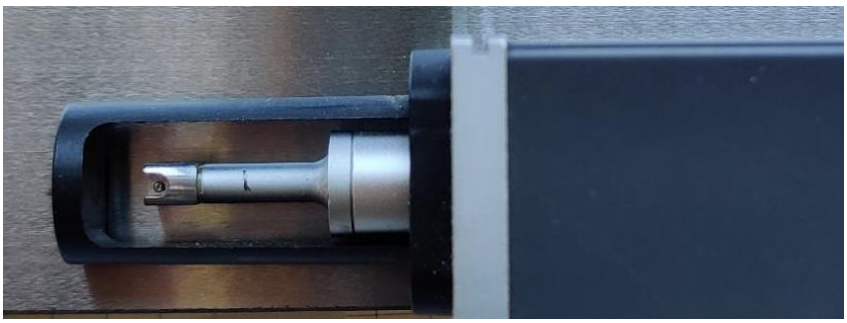
Obr. 52: Tenzometrický snímač síly

3.4.1.2 Vzorky

V rámci této disertační práce bylo vyrobeno či upraveno, otestováno a vyhodnoceno celkem 14 sestav funkčních dvojic (označení 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. 18: Materiály testované funkční dvojice

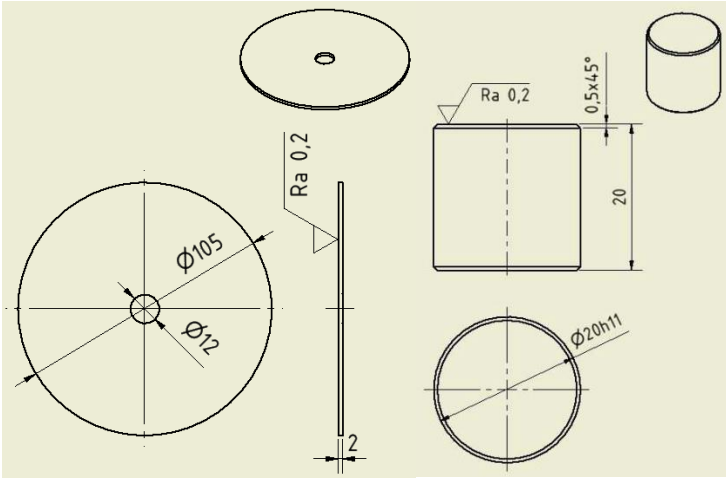
Funkční dvojice - materiály		
FD	Disk	Váleček
1	ocel	dural
2	ocel	korozivzdorná ocel
3	ocel	bronz
4	ocel	titan
5	ocel	měď
6	ocel	mosaz
7	ocel	šedá litina
10	ocel	A
11	ocel	B
12	ocel	C
13	ocel	D
14	ocel	E



Obr. 53: Detail měření drsnosti povrchu vzorku pomocí drsnoměru mitutoyo

Pro upřesnění chemického složení výše uvedených vzorků byla provedena spektrometrická analýza každého testovaného materiálu. Toto měření bylo provedeno pomocí níže vyobrazeného spektrometru BAS Delta. [P1] Specifikace a přesné parametry tohoto přístroje jsou uvedeny v příloze. Chemické složení testovaných materiálů je uvedeno v tabulce 10.

Obr. 54: Spektrometr BAS Delta pro určování chemického složení materiálu [P1]



Obr. 55: Náčrt dílů funkční dvojice (FD)

3.4.1.3 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. 19: Specifikace vstupních silových parametrů

ocejchované závaží [kg]	Normálová síla [N]	Styková plocha [mm^2] 1 váleček	Kontaktní tlak [Mpa] 1 váleček	Styková plocha [mm2] 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.

Tab. 20: Chemické složení testovaných materiálů

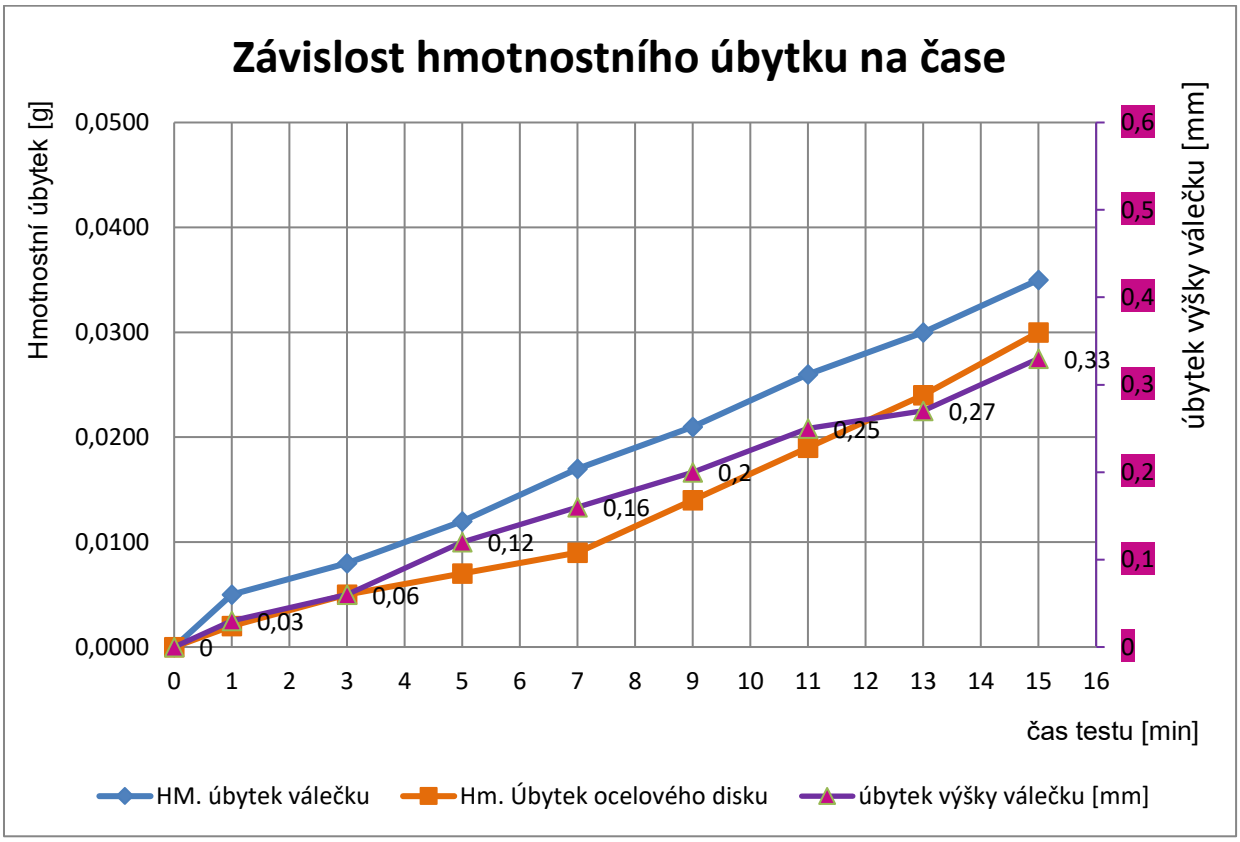
Typ vzorku	Materiál vzorku	Rozložení prvků [%]	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	C	P	S	Ni	Cb	Mo	Al	Sn	Pb	V	silikon	Zr
Kotouč Ø100	**Ocel S 235 JR**	min.	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		max.	x	x	x	x	x	x	x	x	0,17	0,05	0,05	0,01	x	x	x	x	x	x	x	x
Válečeк ø20	Hliník 99%	min.	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		max.	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	99,5	x	x	x	x	x
	Dural EN AW7075	min.	x	x	1,2	x	2,1	0,18	5,1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		max.	0,15	0,2	2	0,1	2,9	0,28	6,1	0,1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Bronz	min.	x	2	x	x	x	x	x	x	x	x	x	4	x	x	9	x	x	x	x	x
		max.	x	4	x	1,5	x	x	0,3	x	x	x	x	5,5	x	x	11	0,2	x	x	0,25	x
	Měď	min.	x	x	99,5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		max.	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Mosaz	min.	x	x	62	x	x	x	33	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		max.	x	0,1	64	x	x	x	35	x	x	x	x	0,3	x	x	0,03	0,1	0,1	x	x	x
	Koroziv. ocel	min.	x	x	2,5	14	x	x	x	x	x	3,5	0,35	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		max.	x	x	4,5	116	x	x	0,07	0,03	0,02	5,5	0,45	0,5	x	x	x	x	x	x	1	x
	ocel C45	min.	0,17	x	x	0,5	x	x	x	x	0,42	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		max.	0,37	x	0,3	0,8	x	0,25	x	x	0,5	0,04	0,04	0,3	x	x	x	x	x	x	x	x
	šedá litina	min.	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
		max.	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Titan	min.	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	6	2	x	6	x	x
		max.	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	A	naměřeno	31,2	14,6	22,5	1,58	x	x	x	20,4	x	x	x	0,11	x	x	x	x	x	9,51	x	0,4
	B	naměřeno	9,5	4,6	35,1	0,1	x	5,7	9,12	19,4	x	x	x	x	x	x	x	x	x	2	x	14,6
	C	naměřeno	4,77	0,93	71,5	x	x	2,42	8,1	x	x	x	x	x	x	x	5,9	3,11	x	x	x	3,63
	D	naměřeno	7,9	4,51	53,4	x	x	3,73	x	x	x	x	x	22,3	x	x	x	8,64	x	x	x	x
	E	naměřeno	3,45	1,2	39,2	0,2	x	5,6	9,52	21,4	x	x	x	x	x	x	x	x	x	2,31	x	17,3

Tab. 21: Vstupní parametry tribologického testu FD I. -01

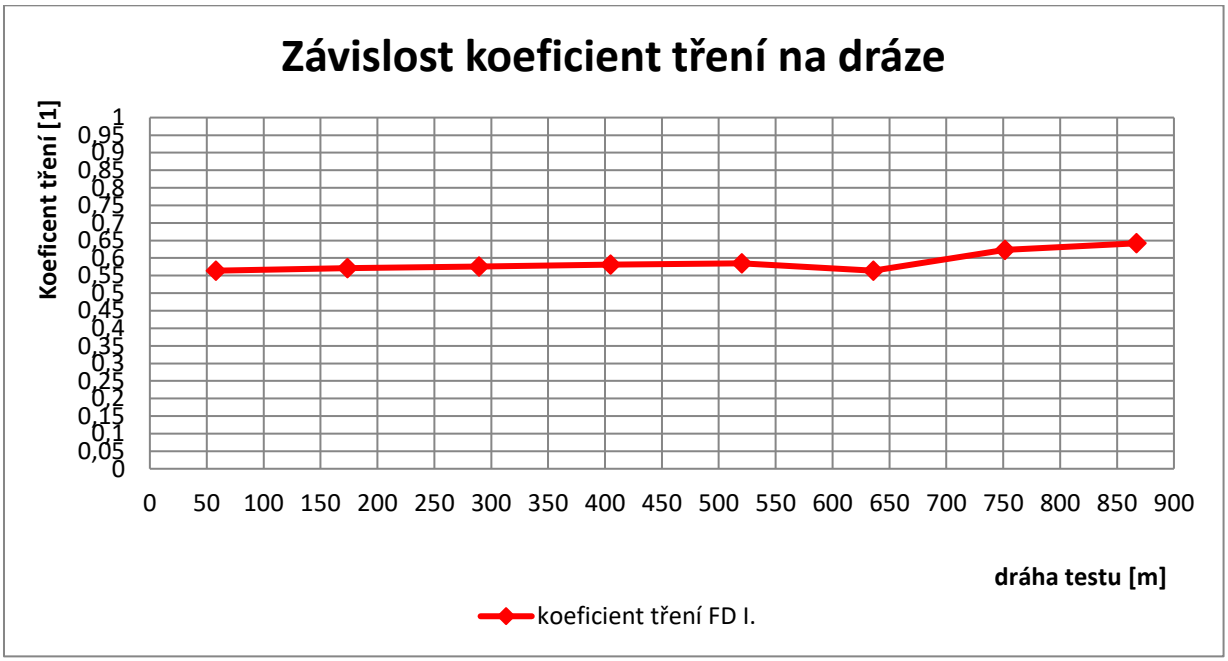
Parametry testu	FD I.-01
Normálové zatížení [kg]	1,040
Normálová síla [N]	10,202
Obvodová rychlost [m*min^{-1}]	57,805
Max. čas testu [min]	15

Tab. 22: Naměřené hodnoty – funkční dvojice Ocel/ Dural

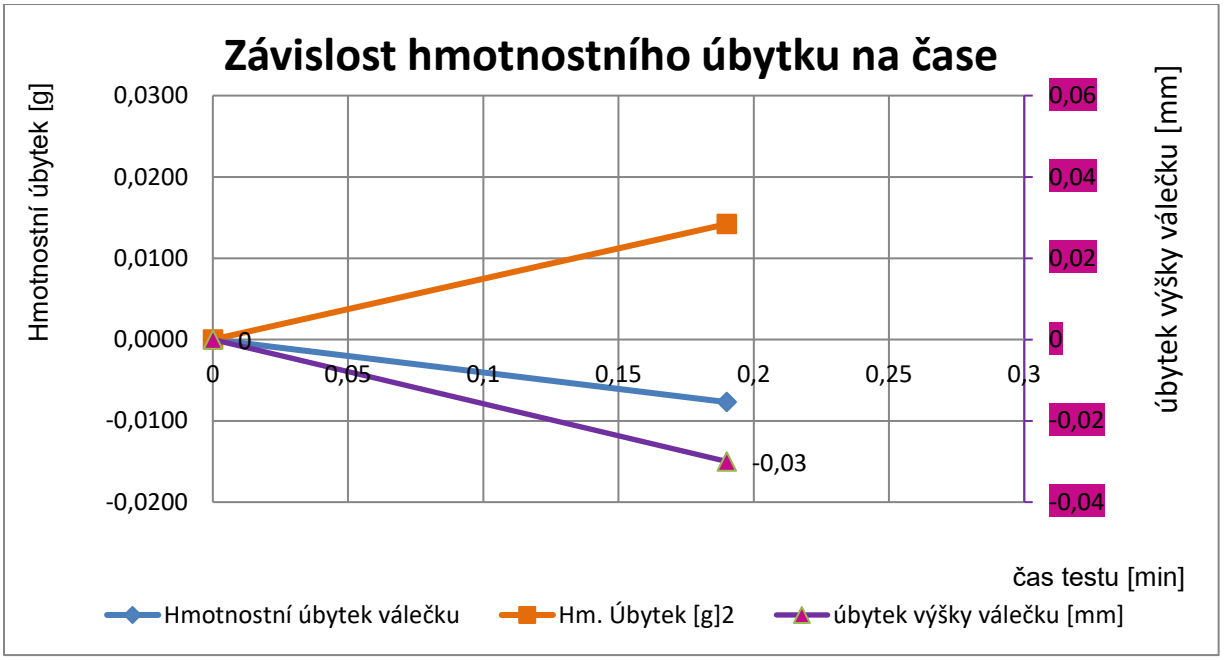
Zjištěná data funkční dvojice OCEL - Dural (EN AW 7075)								
FD I-01.		Váleček - DURAL (EN AW 7075)				Disk - OCEL		
čas [min]	dráha [m]	hmotnost [g]	Hm. Úbytek [g]	výška válečku [mm]	úbytek výšky válečku [mm]	hmotnost [g]	Hm. Úbytek [g]	koeficient tření FD I.
0	0,000	17,5490	0,0000	19,97	0	129,8460	0,0000	-
1	57,805	17,5440	0,0050	19,94	0,03	129,8440	0,0020	0,564
3	173,416	17,5410	0,0080	19,91	0,06	129,8410	0,0050	0,571
5	289,027	17,5370	0,0120	19,85	0,12	129,8390	0,0070	0,576
7	404,637	17,5320	0,0170	19,81	0,16	129,8370	0,0090	0,581
9	520,248	17,5280	0,0210	19,77	0,2	129,8320	0,0140	0,585
11	635,858	17,5230	0,0260	19,72	0,25	129,8270	0,0190	0,564
13	751,469	17,5190	0,0300	19,7	0,27	129,8220	0,0240	0,623
15	867,080	17,5140	0,0350	19,64	0,33	129,8160	0,0300	0,642



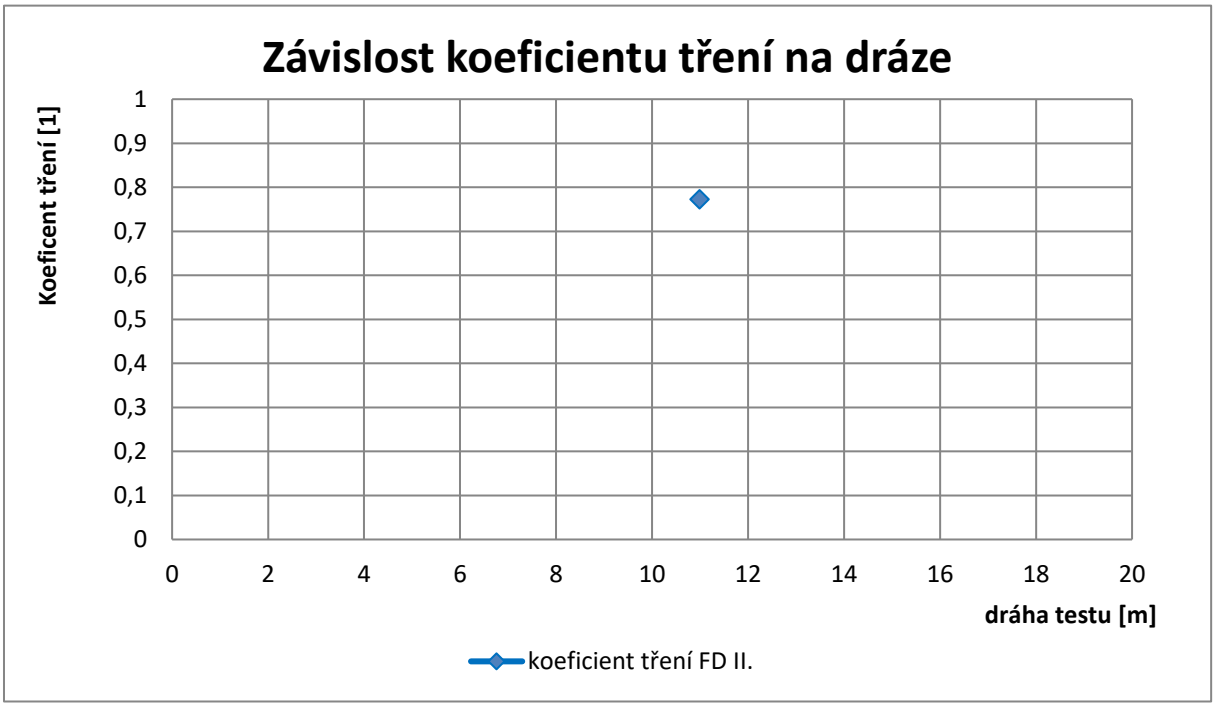
Graf 26: Vývoj hmotnostního úbytku FD1 na čase – Ocel/ Dural, zatížení 1kg.



Graf 27: Vývoj koeficientu tření FD1 na dráze – Ocel/ Dural, zatížení 1kg.



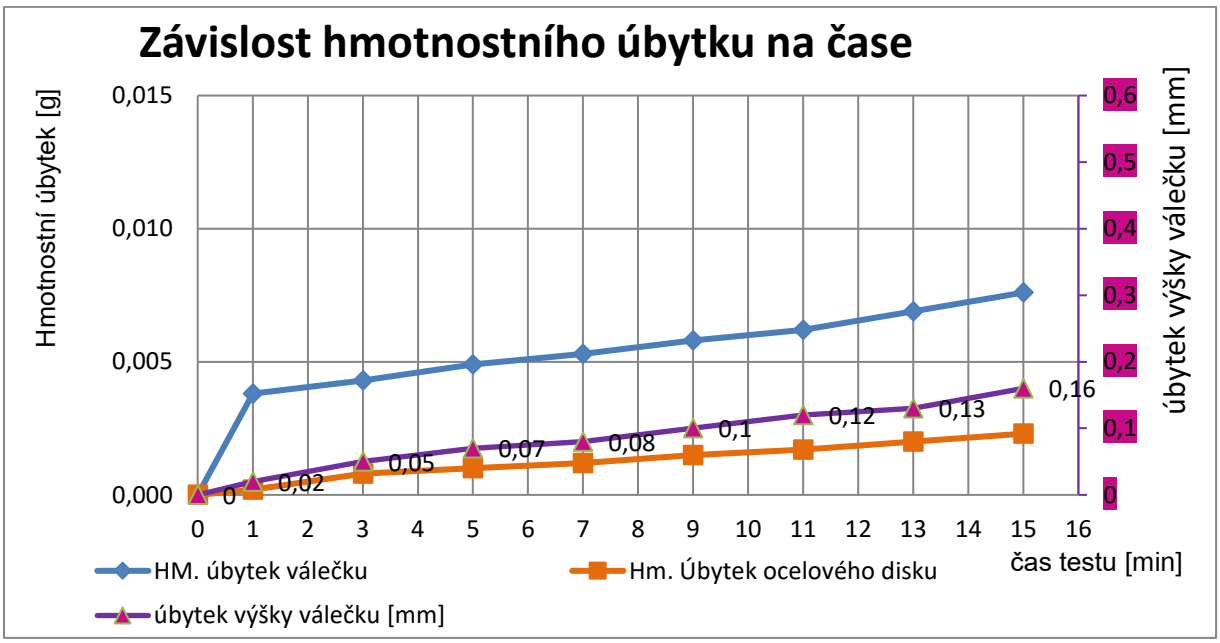
Graf 28: Vývoj koeficientu tření na dráze – Ocel/ Ocel 316L, zatížení 1kg.



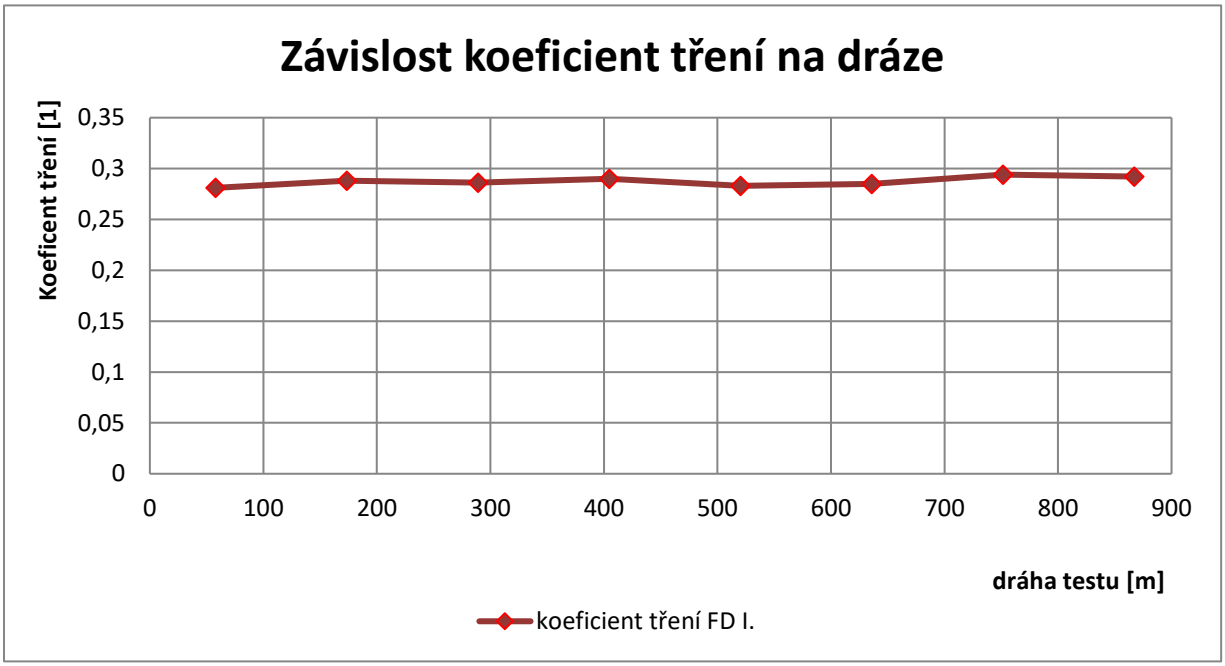
Graf 29: Vývoj hmotnostního úbytku na čase – Ocel/ Ocel 316L, zatížení 1kg.

Jelikož došlo k zadření funkční dvojice

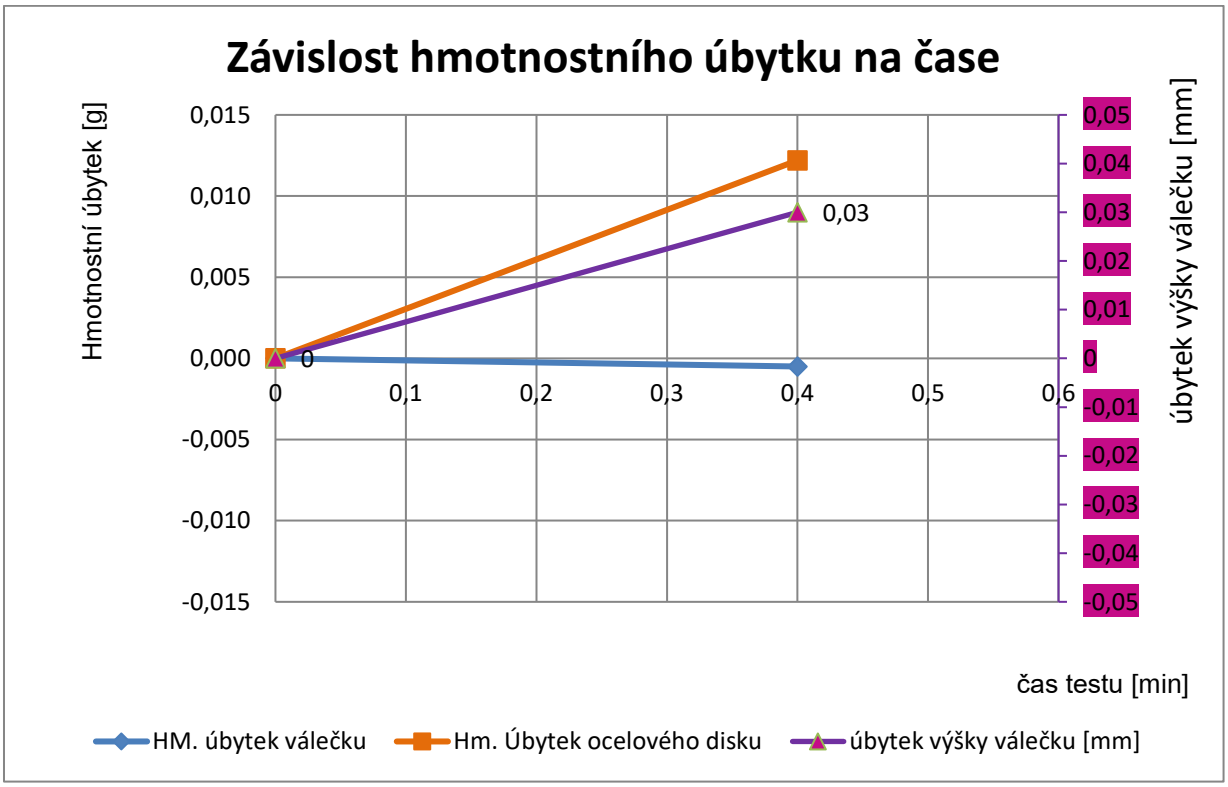
Tab. 23: Naměřené hodnoty – funkční dvojice Ocel/ Bronz



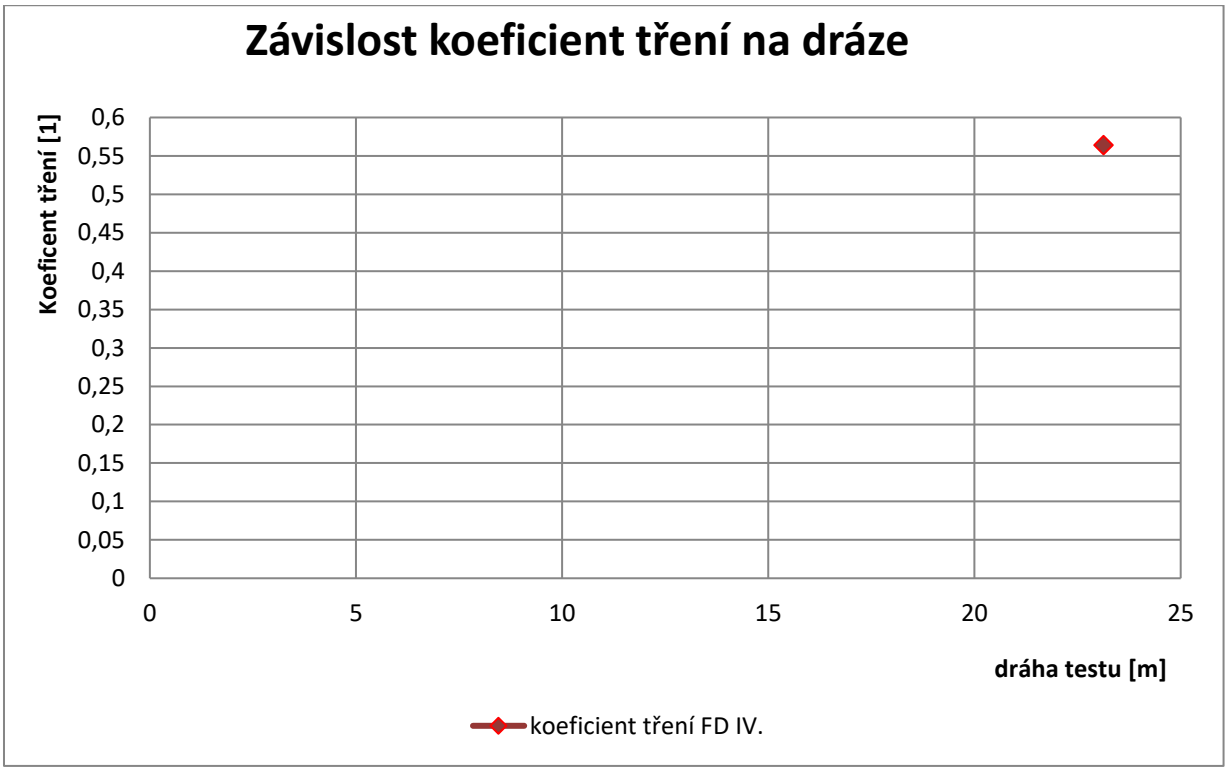
Graf 30: Vývoj koeficientu tření na dráze – Ocel/ Bronz, zatížení 1kg.



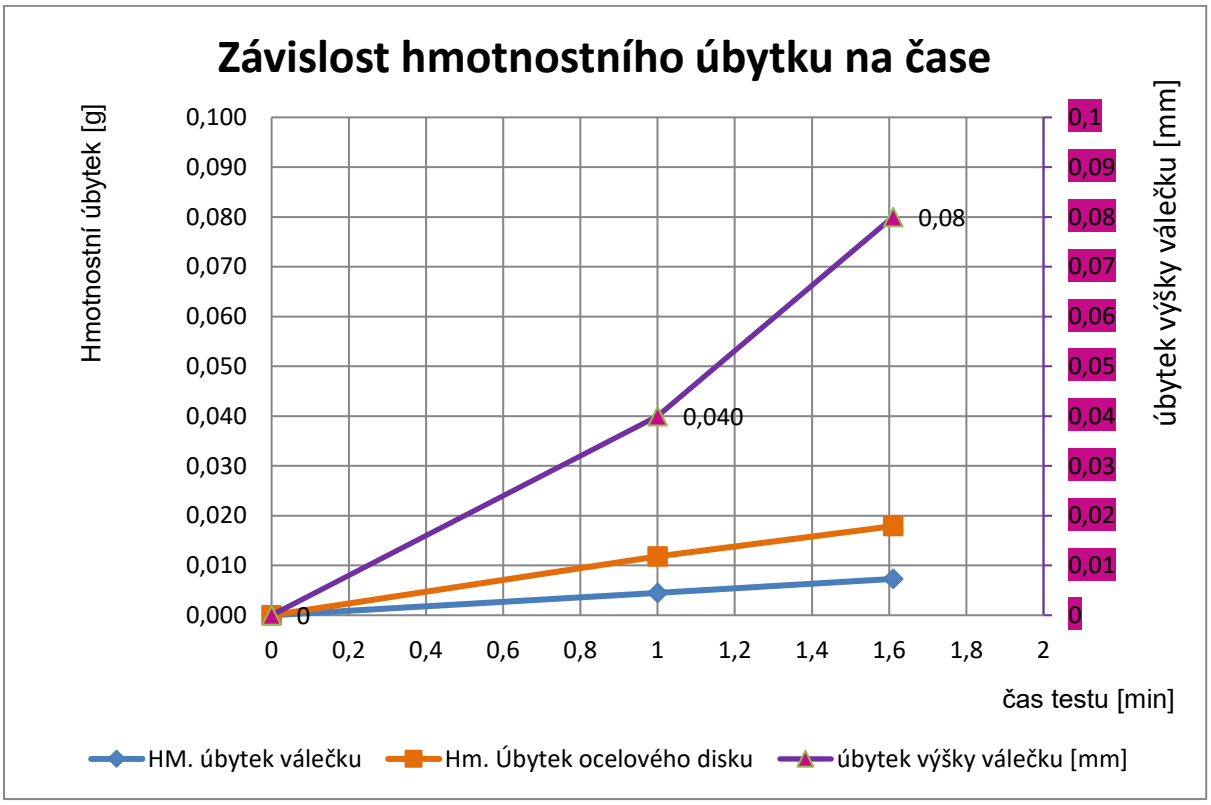
Graf 31: Vývoj hmotnostního úbytku na čase – Ocel/ Bronz, zatížení 1kg.



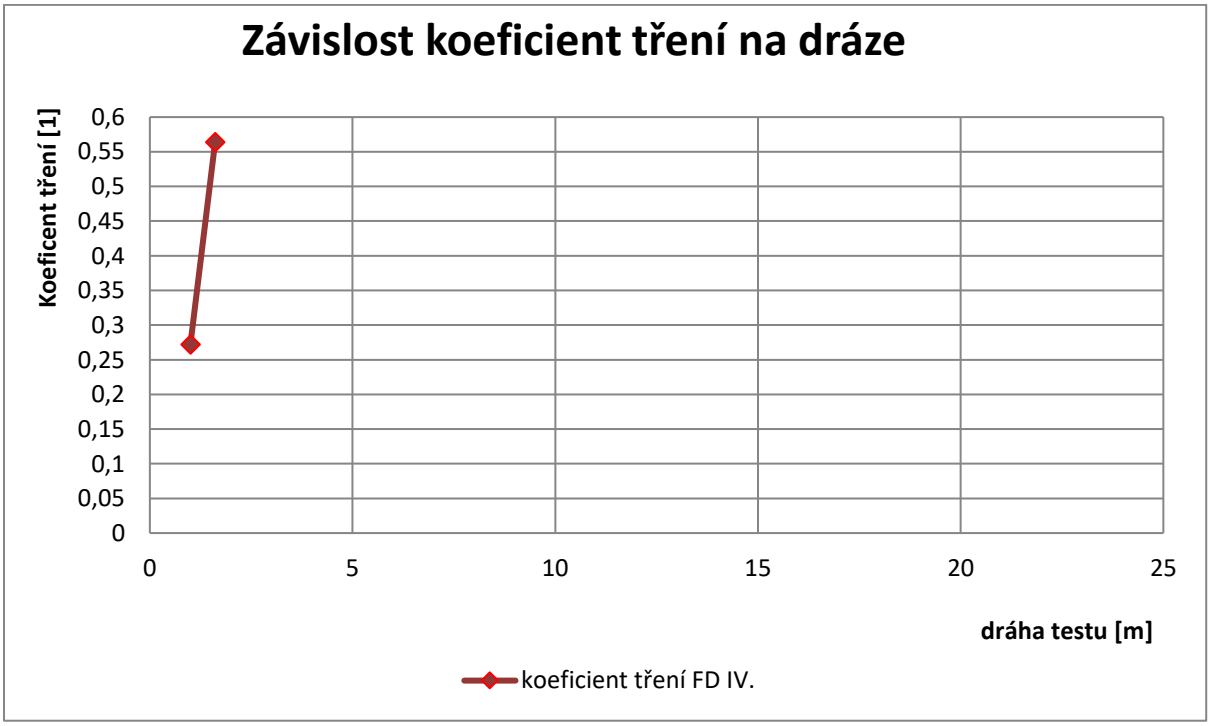
Graf 32: Vývoj hmotnostního úbytku na čase – Ocel/ Titan, zatížení 1kg.



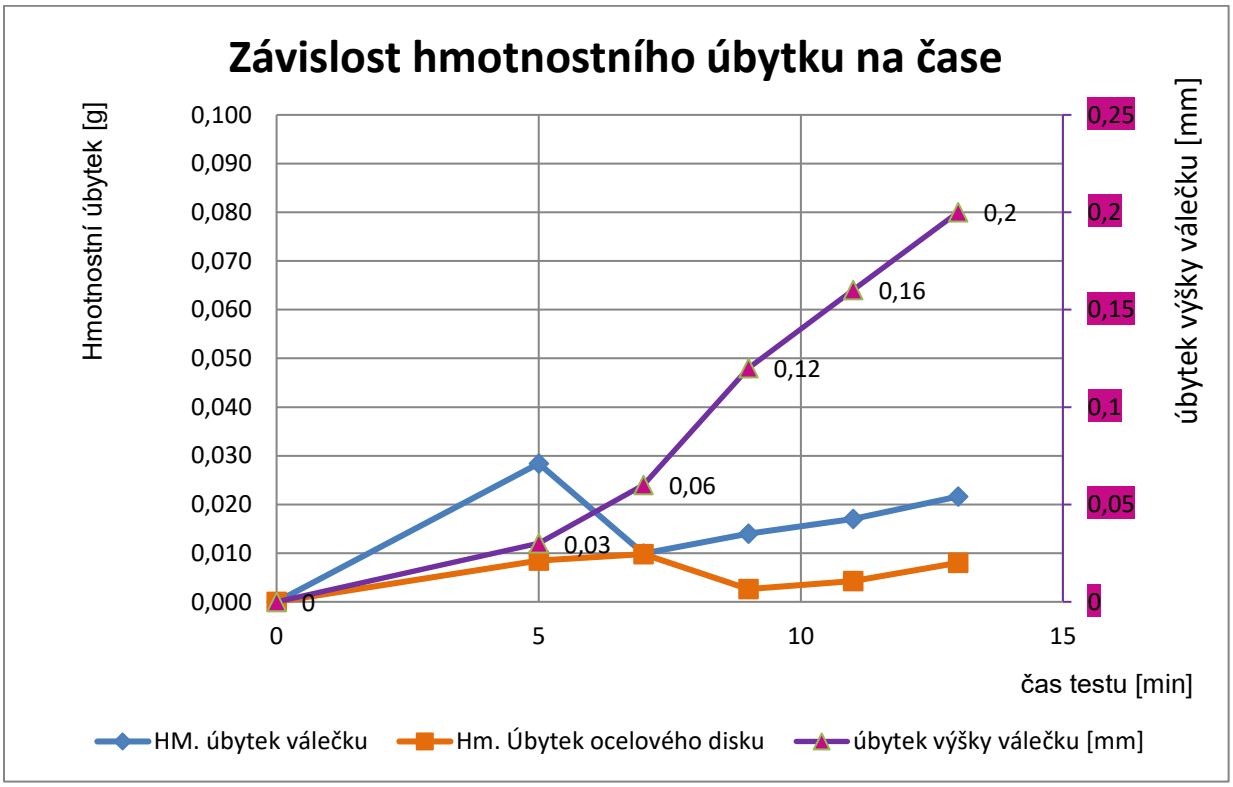
Graf 33: Vývoj koeficientu tření na dráze – Ocel/ Titan, zatížení 1kg.



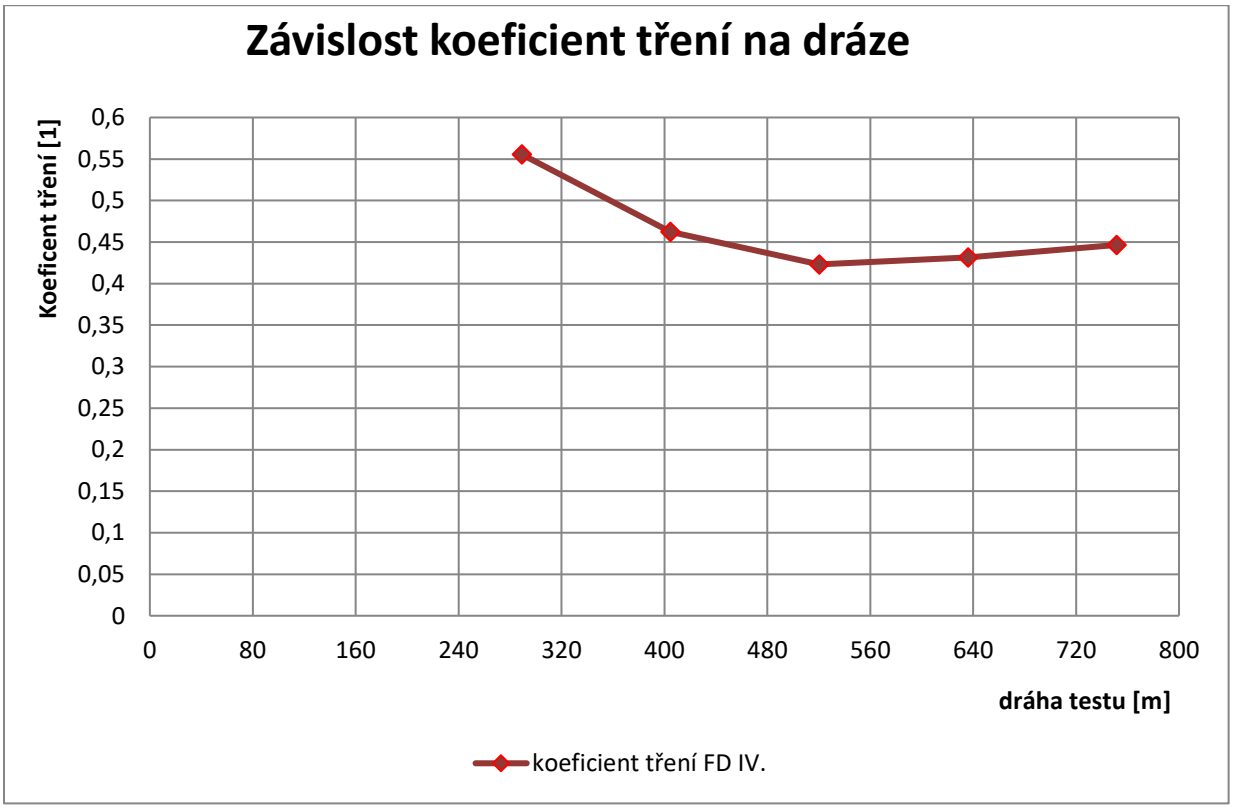
Graf 34: Vývoj hmotnostního úbytku na čase – Ocel/ Měď, zatížení 1kg.



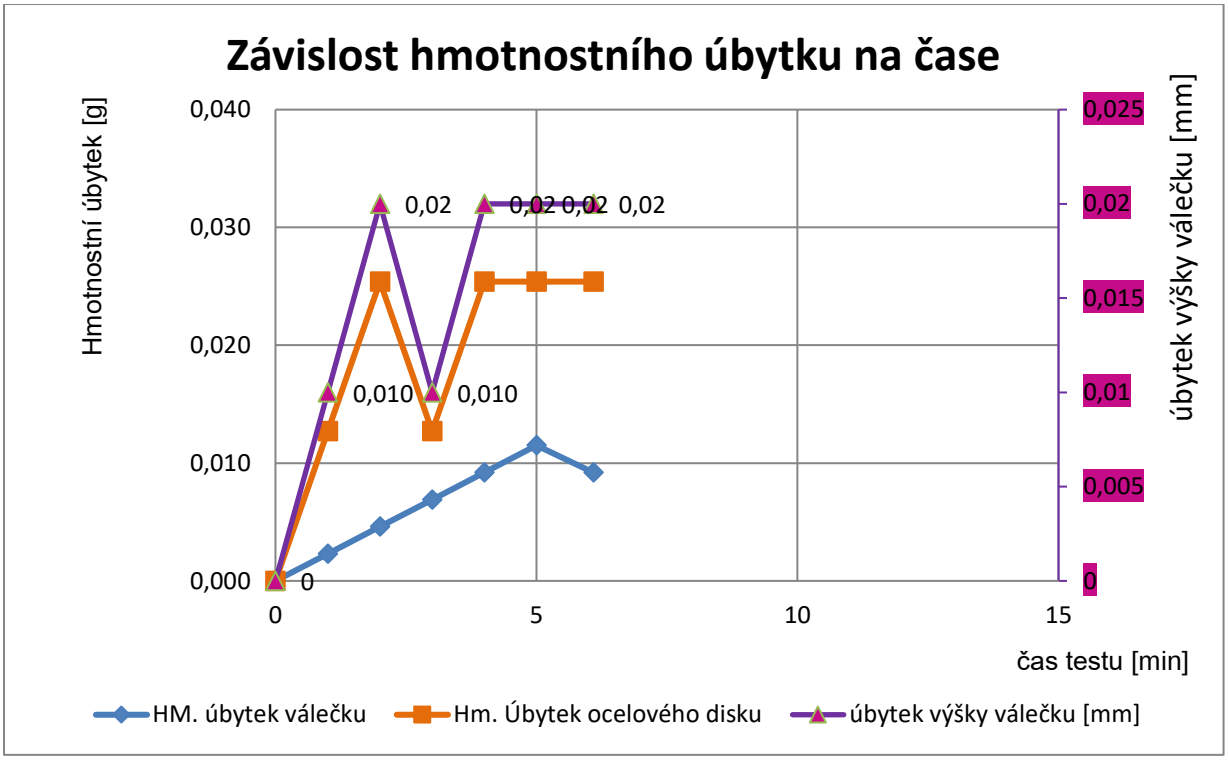
Graf 35: Vývoj koeficientu tření na dráze – Ocel/ Měď, zatížení 1kg.



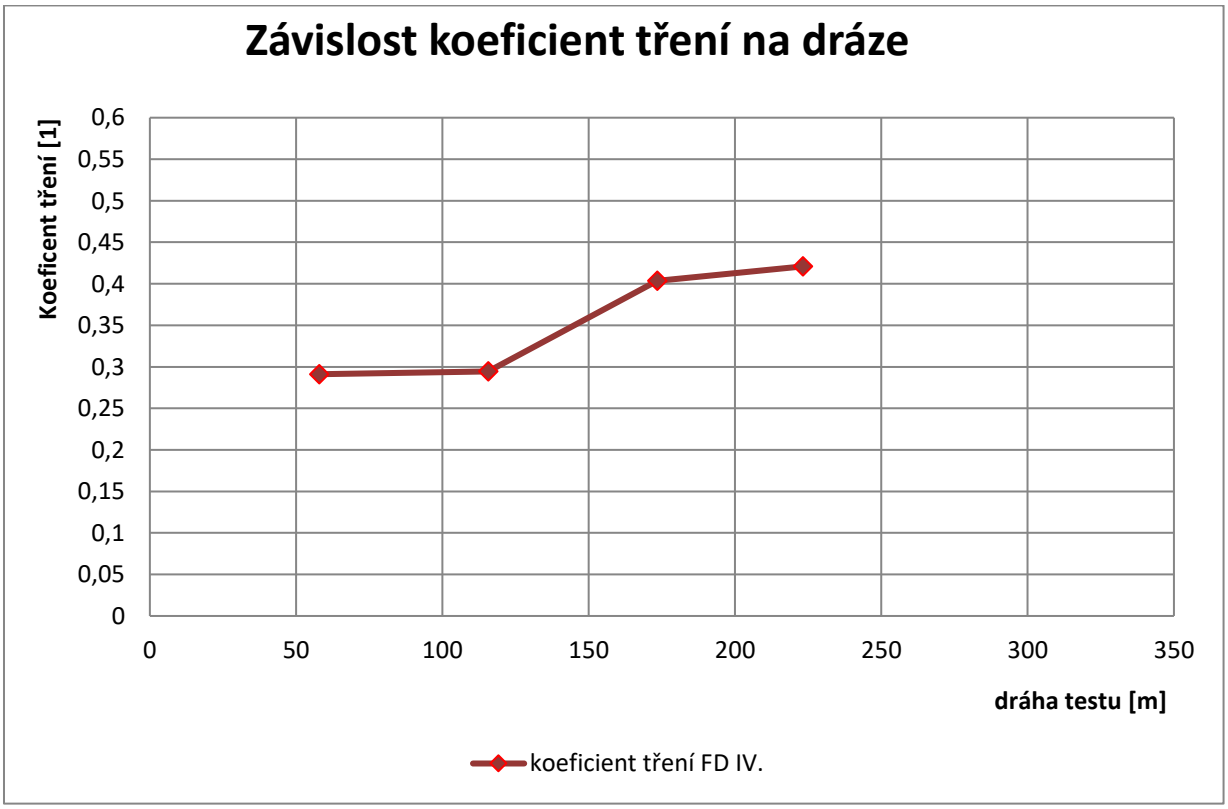
Graf 36: Průběh hmotnostního úbytku FD OCEL/ Mosaz v závislosti na čase testu, zatížení 1kg.



Graf 37: Průběh koeficientu tření FD OCEL/Mosaz v závislosti na dráze testu, zatížení 1kg.



Graf 38: Průběh hmotnostního úbytku FD OCEL/ šedá litina v závislosti na čase testu, zatížení 1kg.



Graf 39: Průběh koeficientu tření FD OCEL/šedá litina v závislosti na dráze testu, zatížení 1kg.

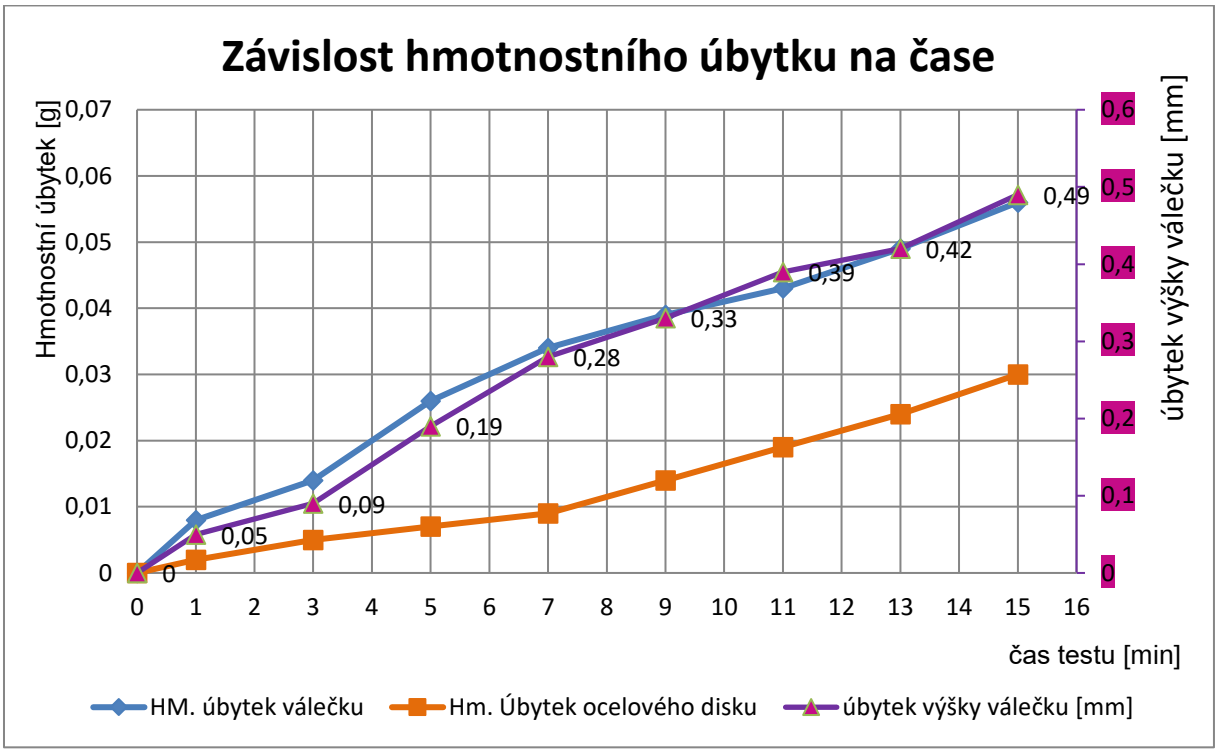
Tab. 24: Vstupní parametry tribologického testu FD I. -03

Parametry testu	FD I. -03
Normálové zatížení [kg]	3,000
Normálová síla [N]	29,921
Obvodová rychlost [m*min^{-1}]	57,805
Max. čas testu [min]	15

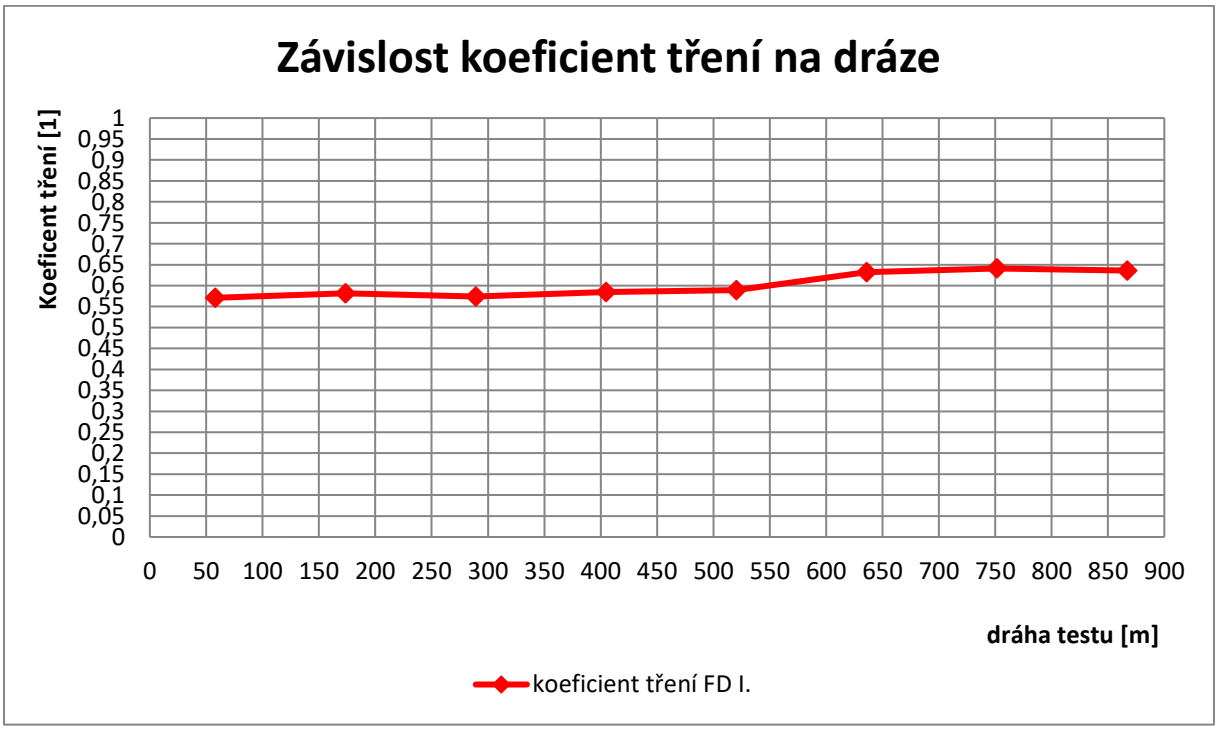
Obr. 56: Funkční dvojice OCEL / DURAL před (vlevo) a po testu (vpravo)

Tab. 25: Naměřená data funkční dvojice ocel- dural, zatížení 29,921 [N]

Zjištěná data funkční dvojice OCEL - Dural (EN AW 7075)								
FD I.-03		Váleček - DURAL (EN AW 7075)				Disk - OCEL		koeficient tření FD I.
čas [min]	dráha [m]	hmotnost [g]	Hm. Úbytek [g]	výška válečku [mm]	úbytek výšky válečku [mm]	hmotnost [g]2	Hm. Úbytek [g]	
0	0,000	17,5590	0	20,06	0	129,8460	0	-
1	57,805	17,5510	0,008	20,01	0,05	129,8440	0,002	0,571
3	173,416	17,5450	0,014	19,97	0,09	129,8410	0,005	0,582
5	289,027	17,5330	0,026	19,87	0,19	129,8390	0,007	0,574
7	404,637	17,5250	0,034	19,78	0,28	129,8370	0,009	0,585
9	520,248	17,5200	0,039	19,73	0,33	129,8320	0,014	0,589
11	635,858	17,5160	0,043	19,67	0,39	129,8270	0,019	0,632
13	751,469	17,5100	0,049	19,64	0,42	129,8220	0,024	0,641
15	867,080	17,5030	0,056	19,57	0,49	129,8160	0,030	0,636



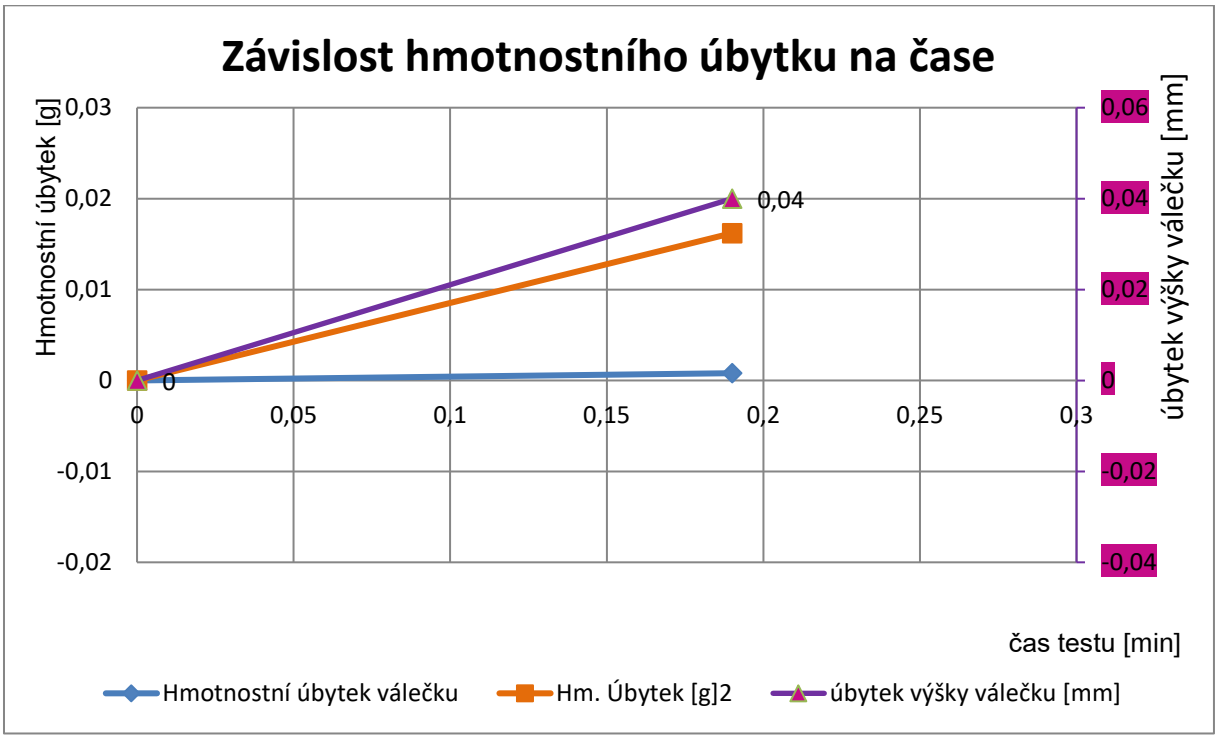
Graf 40: Vývoj hmotnostního úbytku FD1 na čase – Ocel/ Dural, zatížení 29,921 [N]



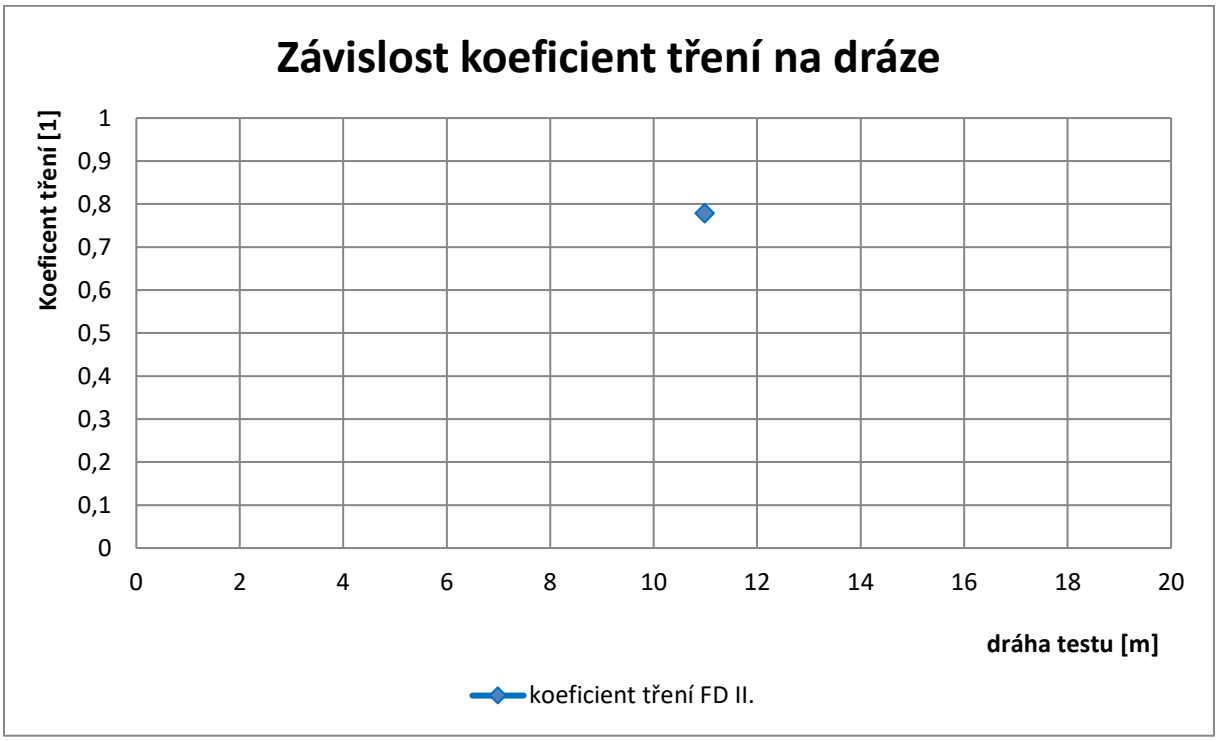
Graf 41: Průběh koeficientu tření FD OCEL/DURAL v závislosti na dráze testu, 29,921 [N]

Tab. 26: Naměřená data funkční dvojice ocel- ocel 316 L, zatížení 29,921 [N]

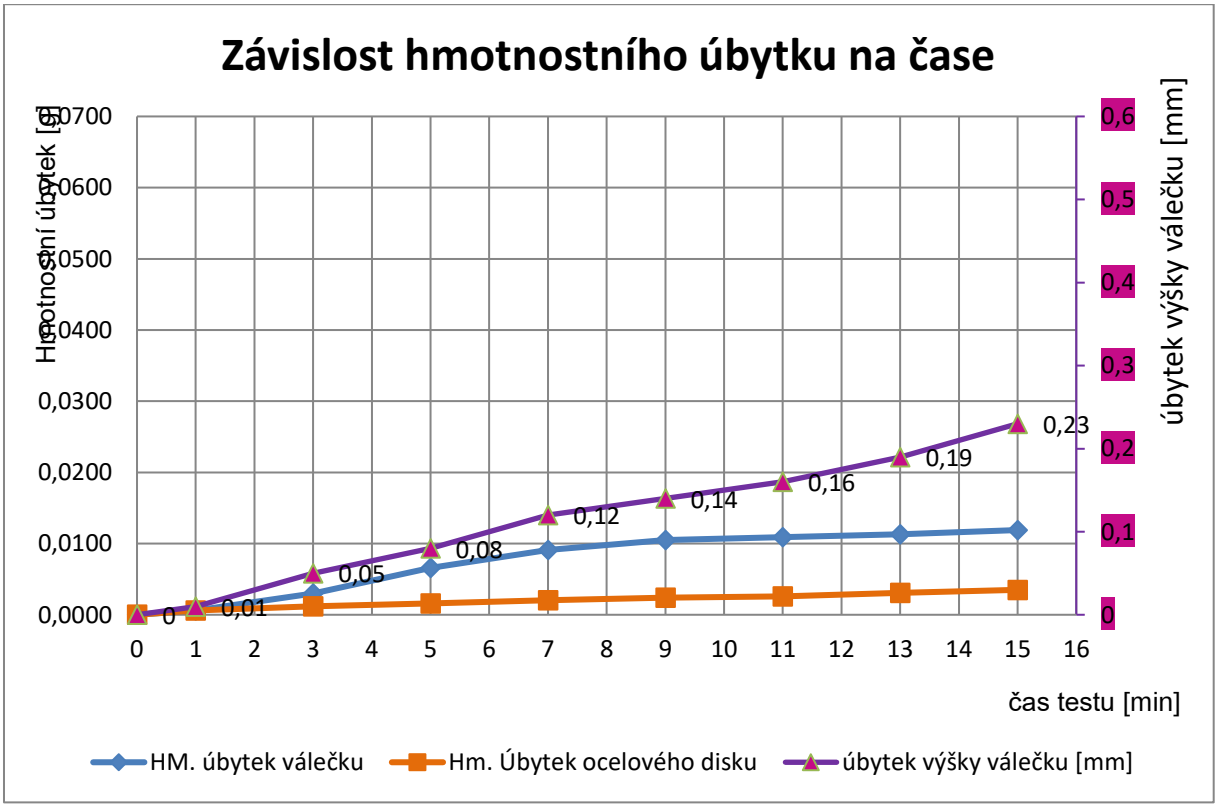
Zjištěná data funkční dvojice OCEL - ocel 316L								
FD II.		Váleček - ocel 316L				Disk - OCEL		koeficient tření FD II.
čas [min]	**dráha [m]**	**hmotnost [g]**	**Hm. Úbytek [g]**	**výška válečku [mm]**	**úbytek výšky válečku [mm]**	**hmotnost [g]2**	**Hm. Úbytek [g]2**	
0	0,000	47,3910	0	20,08	0	130,1542	0	-
0,19	10,983	47,3902	0,001	20,04	0,04	130,1380	0,016	0,7786
3	173,416	x	x	x	x	x	x	x



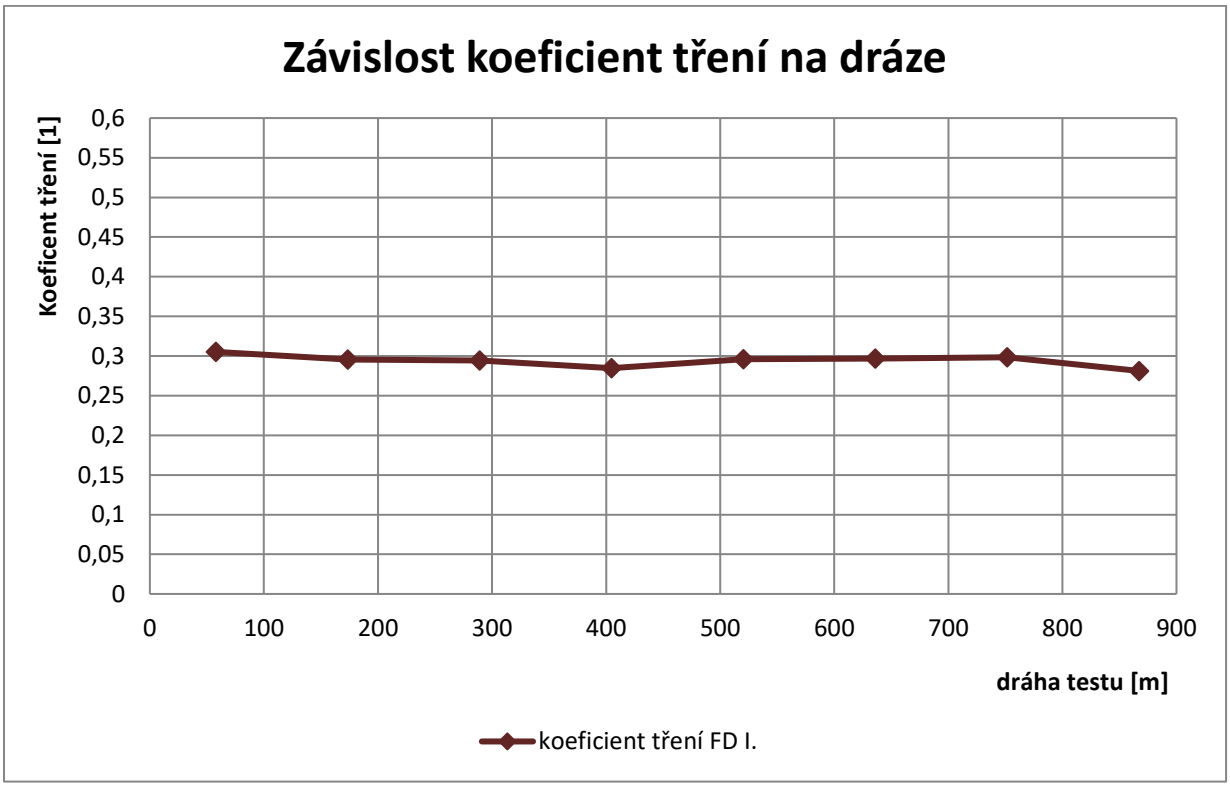
Graf 42: : Průběh hmotnostního úbytku FD OCEL/Ocel 316L v závislosti na čase testu, 29,921 [N]



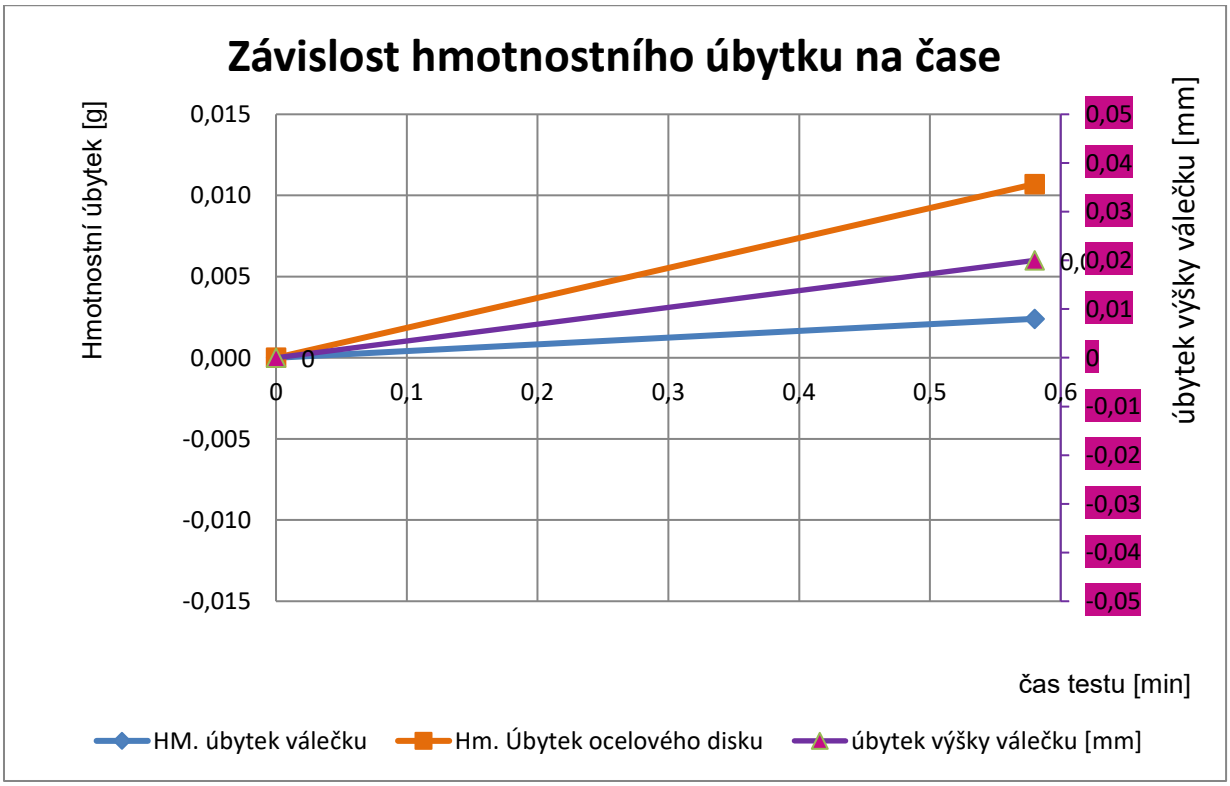
Graf 43: Průběh koeficientu tření FD OCEL/Ocel 316L v závislosti na dráze testu, 29,921 [N]



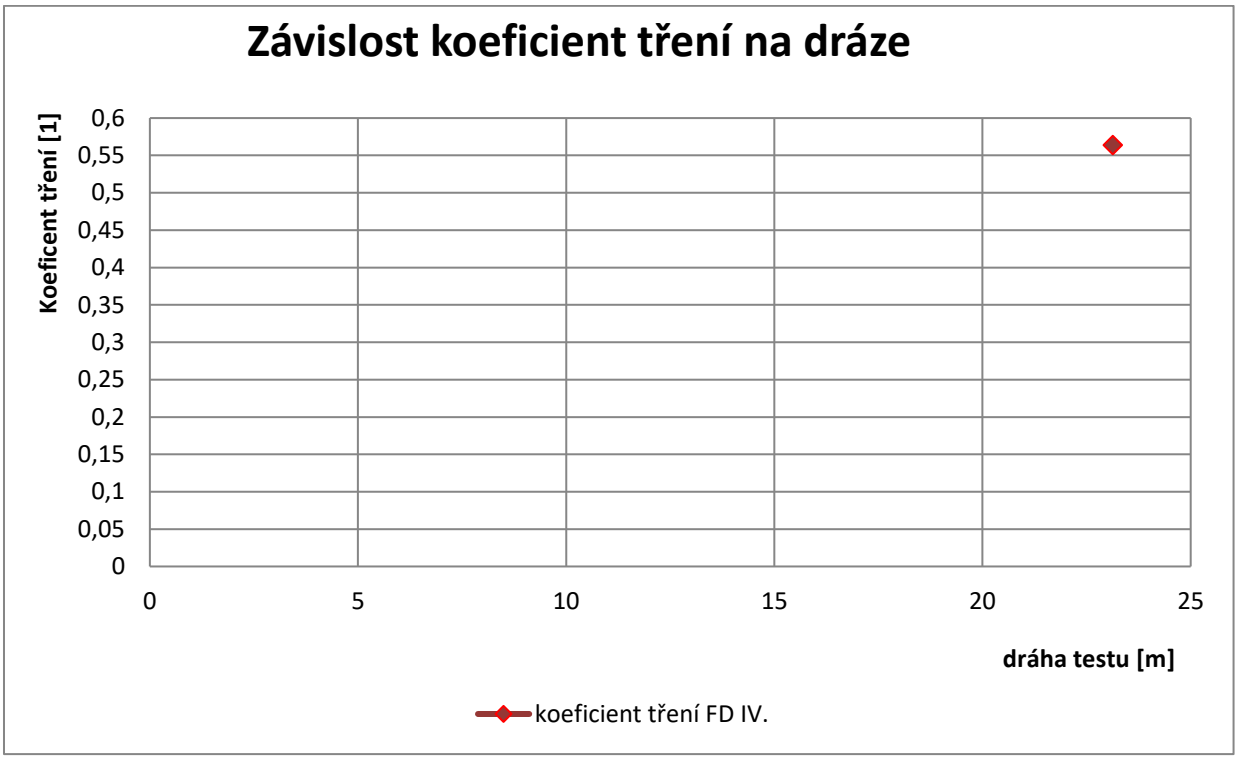
Graf 44: Průběh hmotnostního úbytku FD OCEL/Bronz v závislosti na čase testu, 29,921 [N]



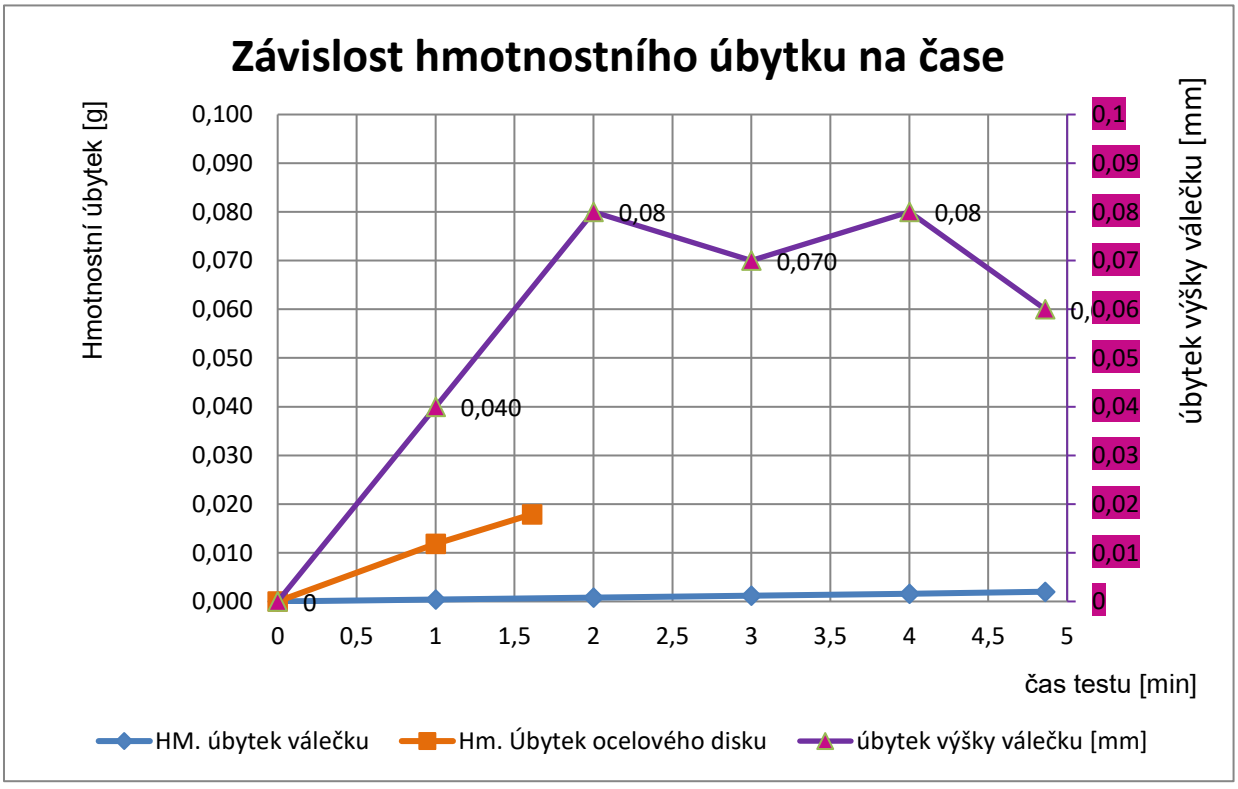
Graf 45: Průběh koeficientu tření FD OCEL/Bronz v závislosti na dráze testu, 29,921 [N]



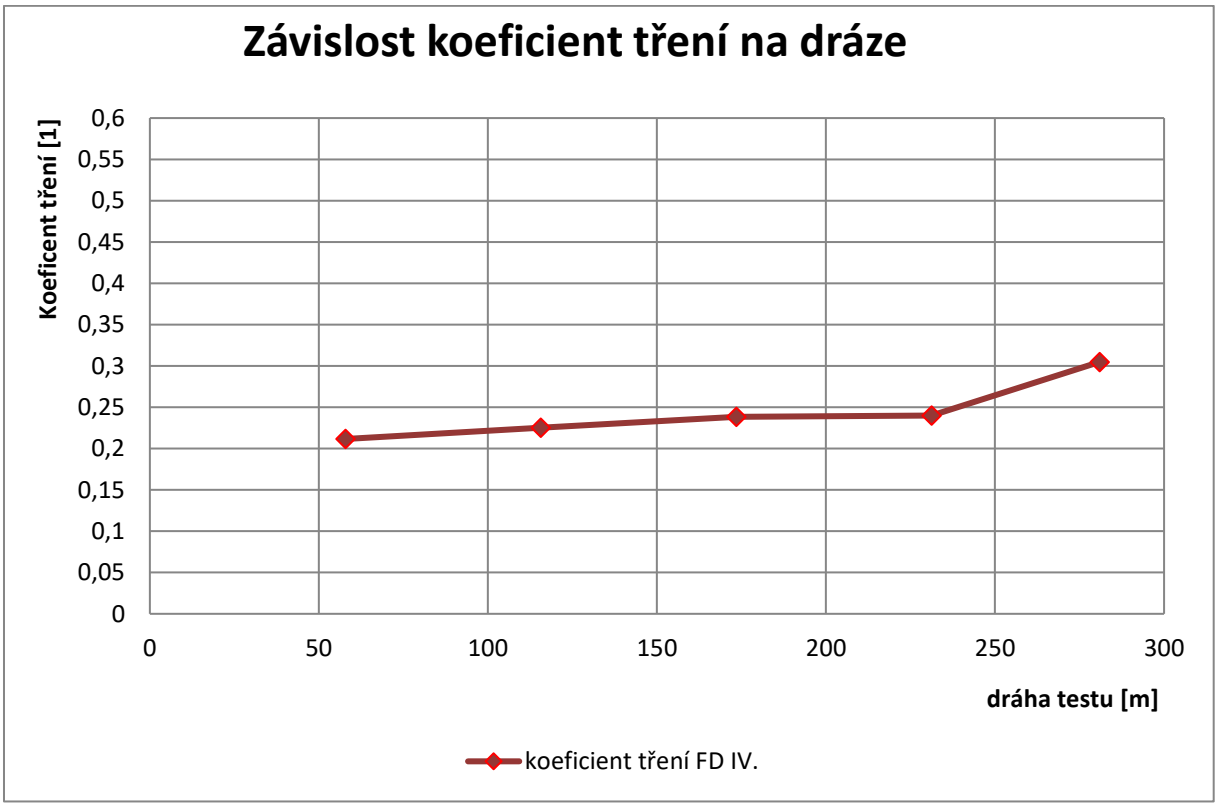
Graf 46: Průběh hmotnostního úbytku FD OCEL/Titan v závislosti na čase testu, 29,921 [N]



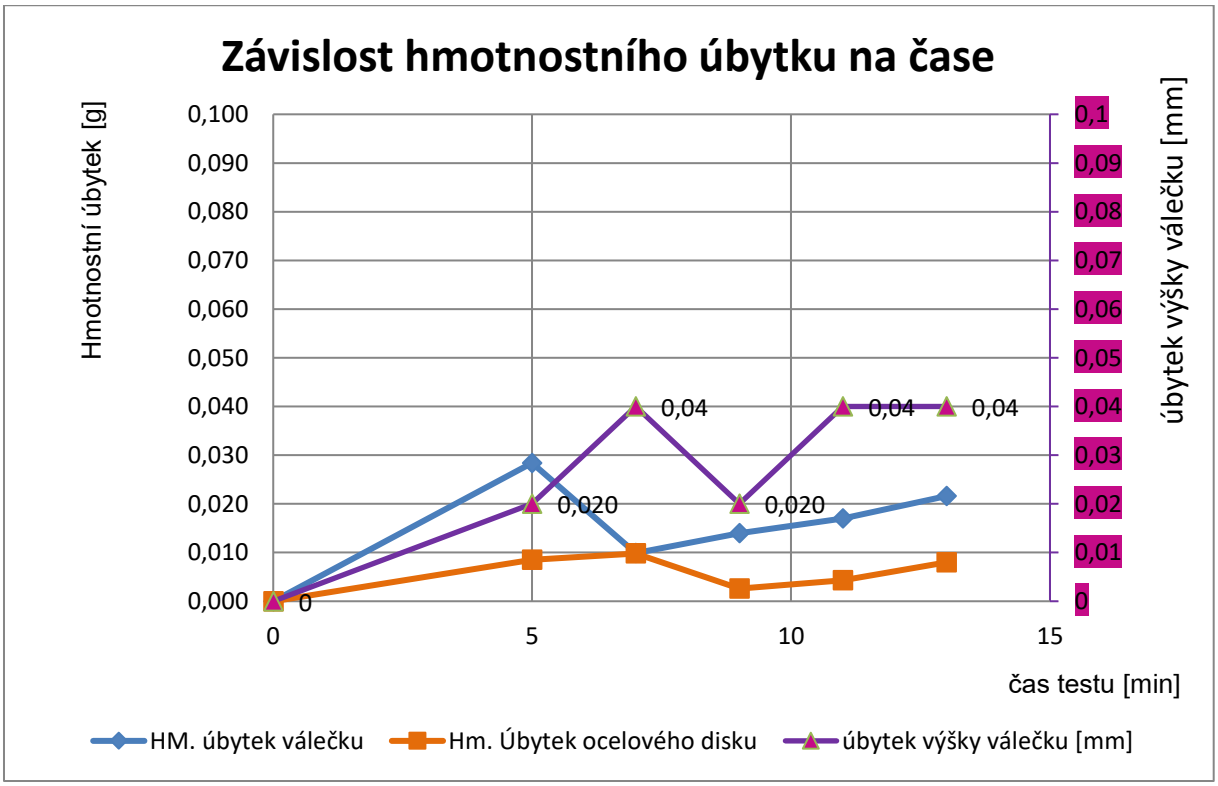
Graf 47: Průběh koeficientu tření FD OCEL/Titan v závislosti na dráze testu, 29,921 [N]



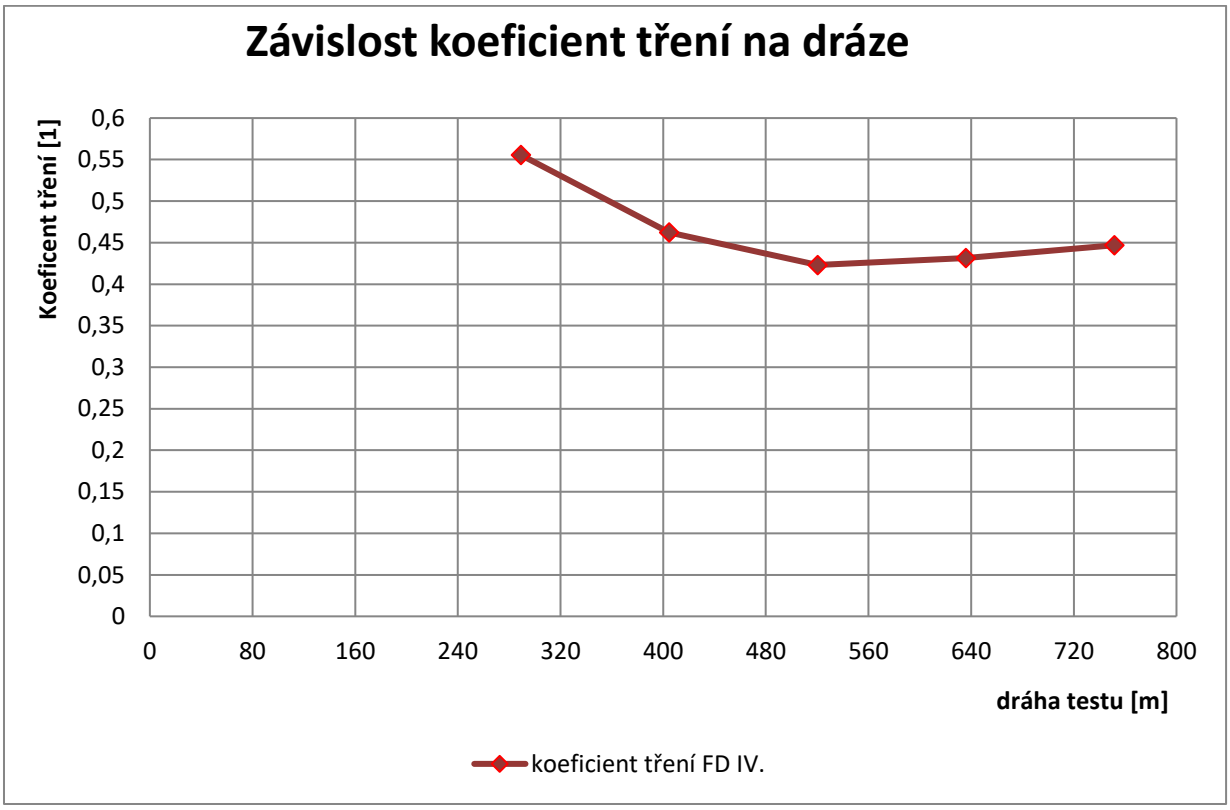
Graf 48: Průběh hmotnostního úbytku FD OCEL/ Měď v závislosti na čase testu, 29,921 [N]



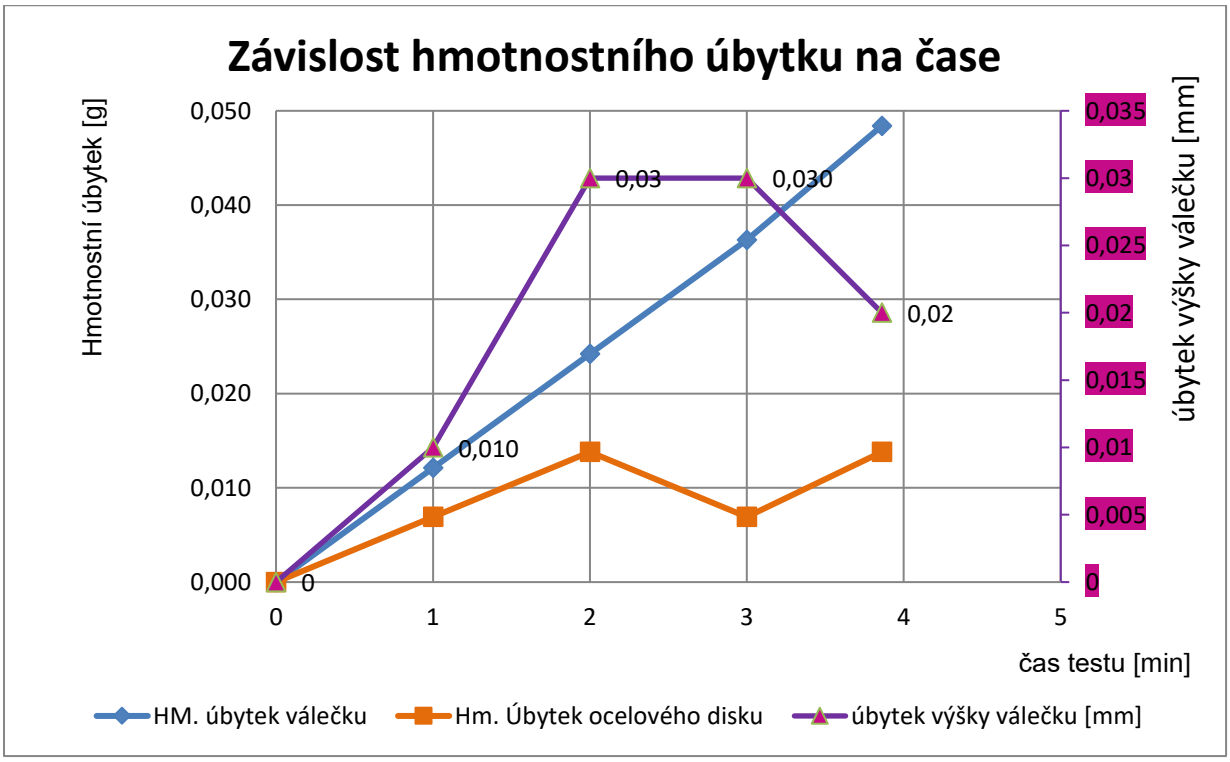
Graf 49: Průběh koeficientu tření FD OCEL/Měď v závislosti na dráze testu, 29,921 [N]



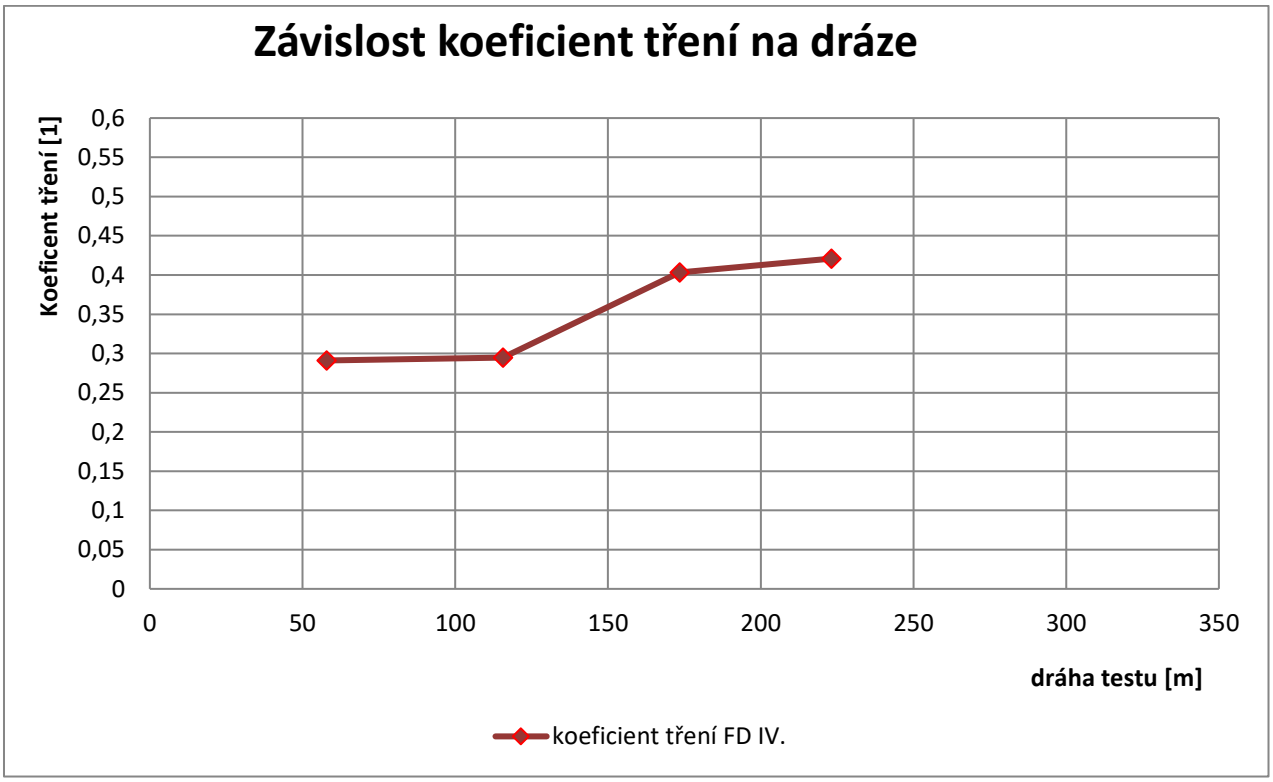
Graf 50: Průběh hmotnostního úbytku FD OCEL/ Mosaz v závislosti na čase testu, 29,921 [N]



Graf 51: Průběh koeficientu tření FD OCEL/Mosaz v závislosti na dráze testu, 29,921 [N]



Graf 52: Průběh hmotnostního úbytku FD OCEL/ šedá litina v závislosti na čase testu, 29,921 [N].

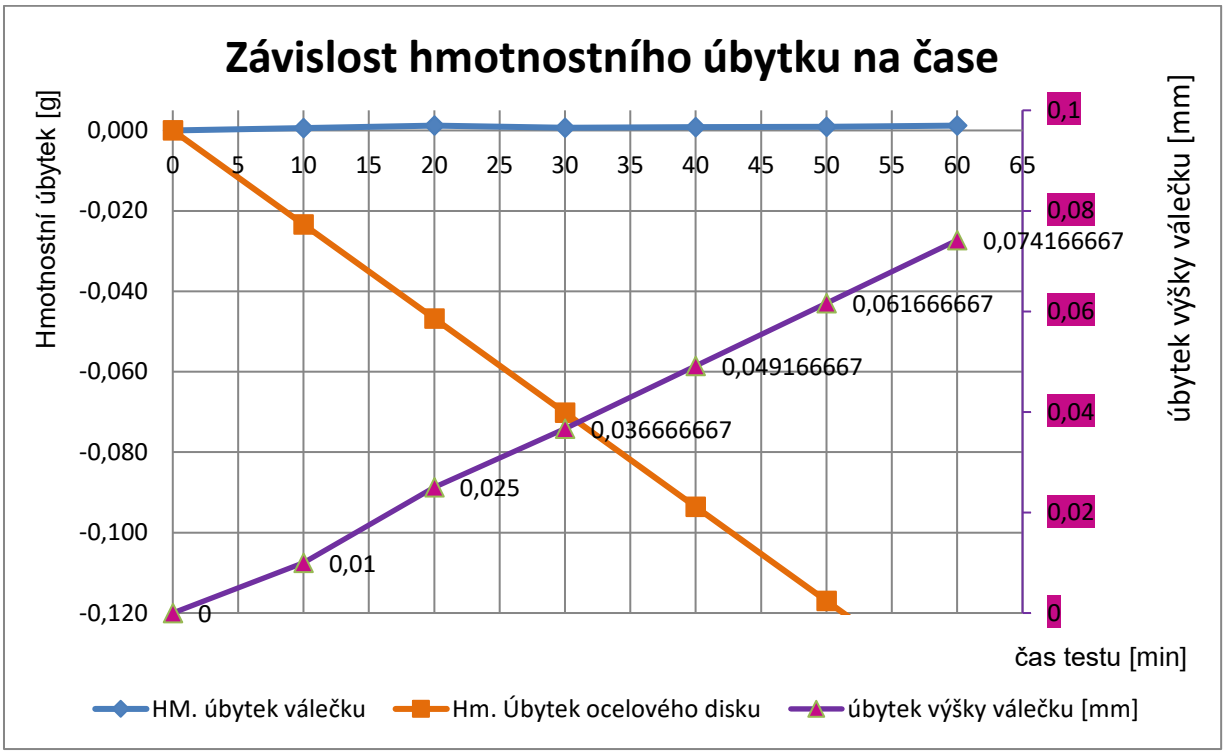


Graf 53: Průběh koeficientu tření FD OCEL/ šedá litina v závislosti na dráze testu, 29,921 [N]

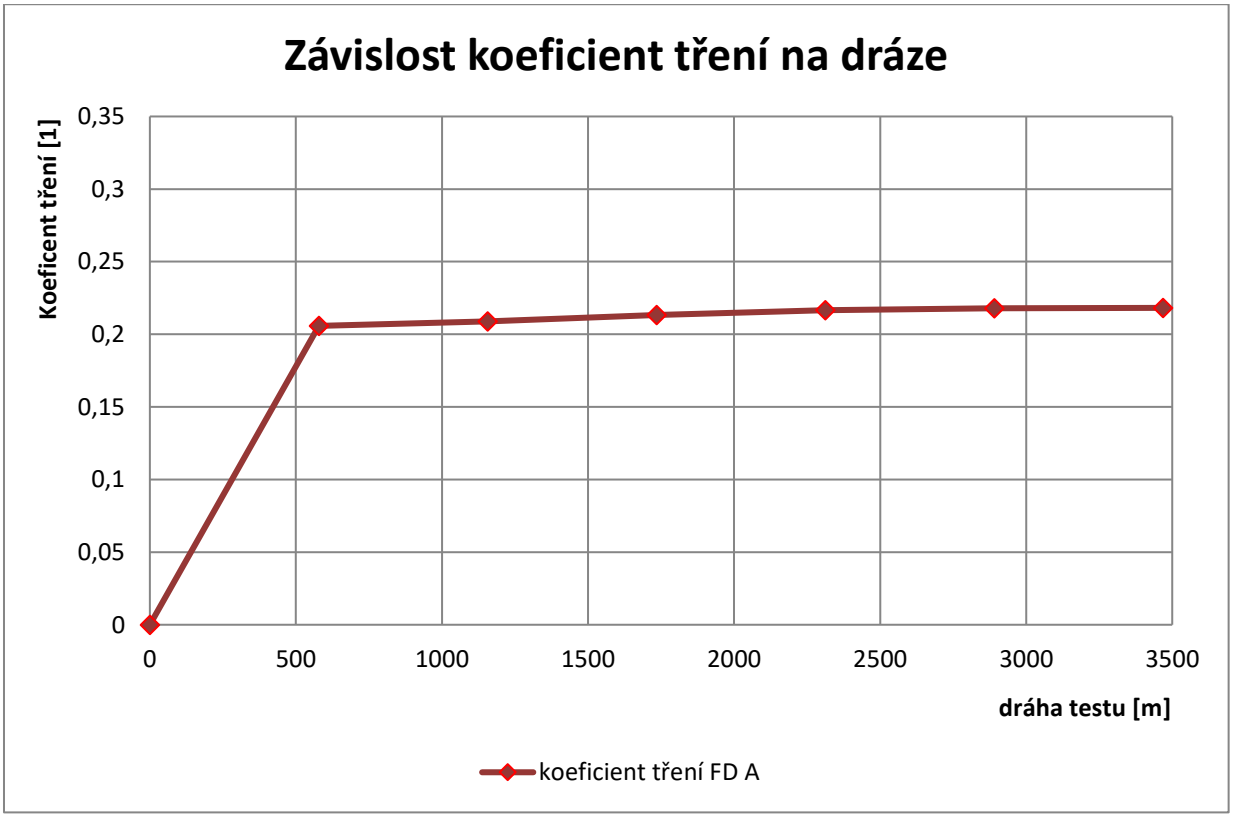
Následující slitinové materiály, jejihž složení bylo navržené na základě předchozích experimentálních měření základních možných materiálů. Byly testovány pouze při zatížení 2 kg, což odpovídá normálové síle o hodnotě 19,62 N.

Vzorek A:

Obr. 57: Funkční plocha vzorku A.



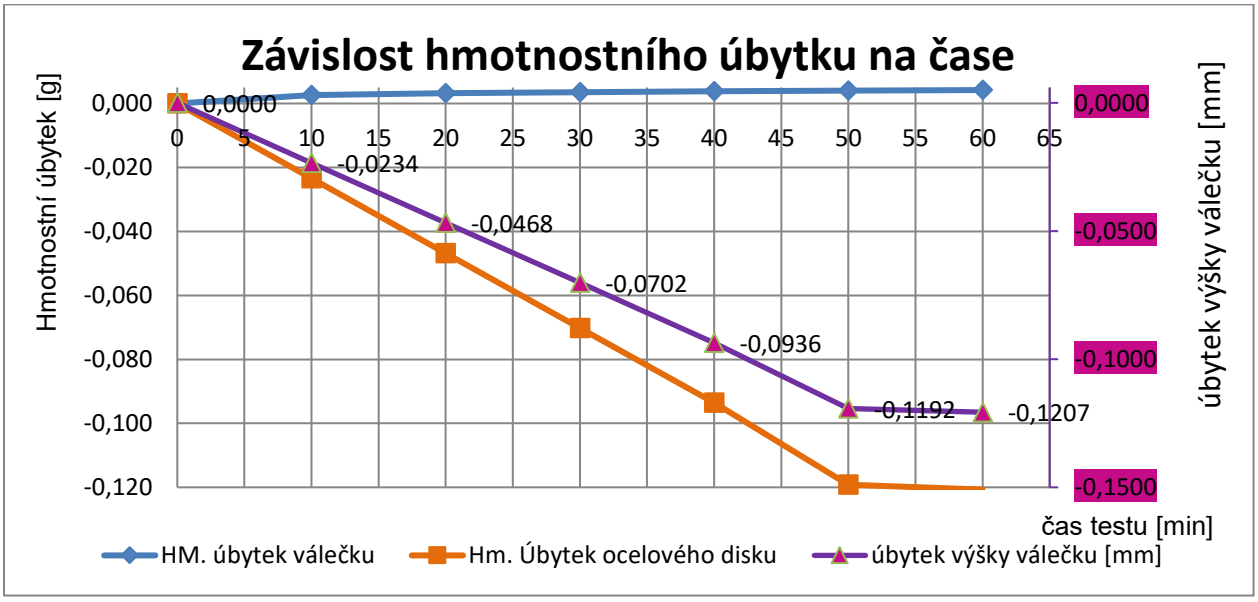
Graf 54: Průběh hmotnostního úbytku FD OCEL/ vzorek A v závislosti na čase testu, zatížení 2kg.



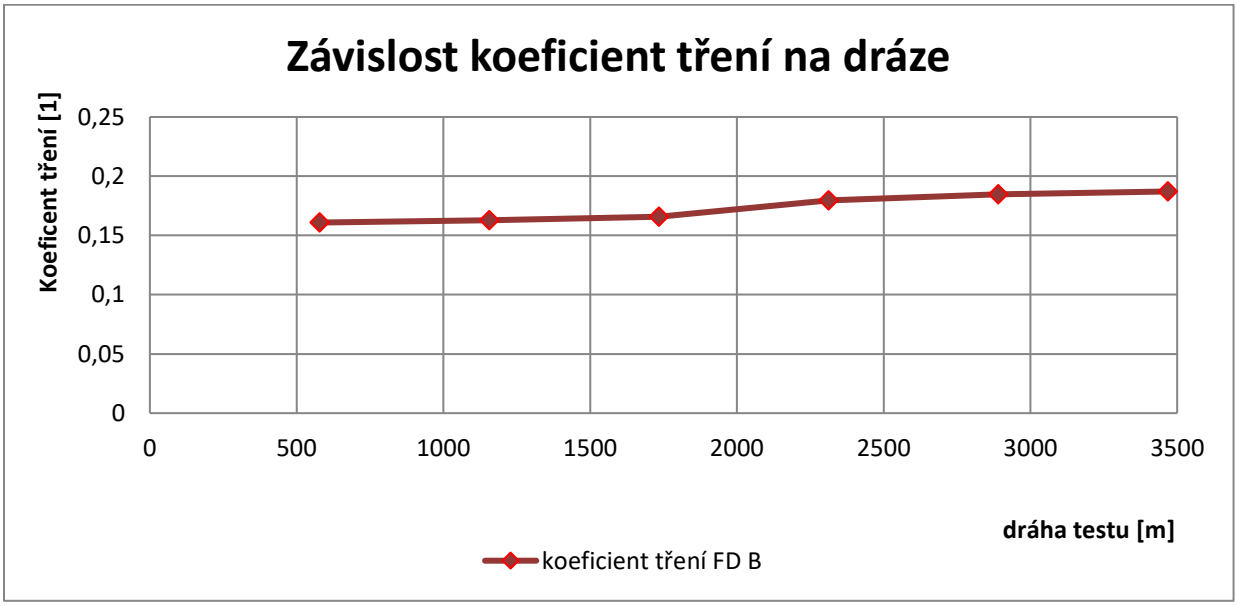
Graf 55: Průběh koeficientu tření FD OCEL/vzorek A v závislosti na dráze testu, zatížení 2kg.

Vzorek B:

Obr. 58: Funkční plocha vzorku B.



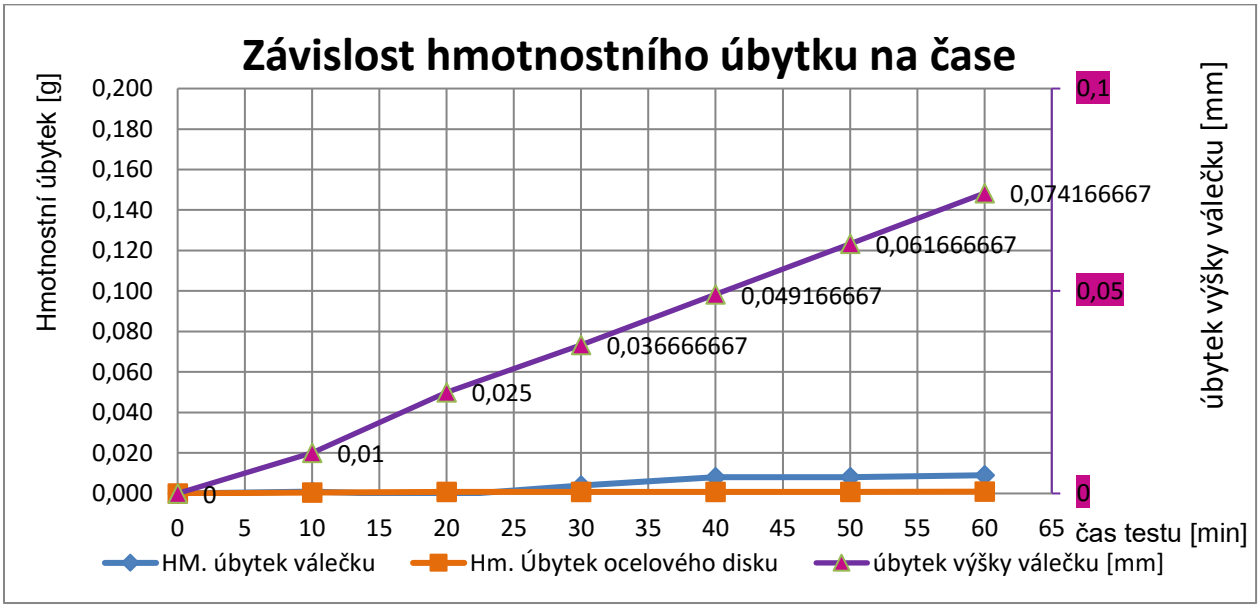
Graf 56: Průběh hmotnostního úbytku FD OCEL/ vzorek B v závislosti na čase testu, zatížení 2kg.



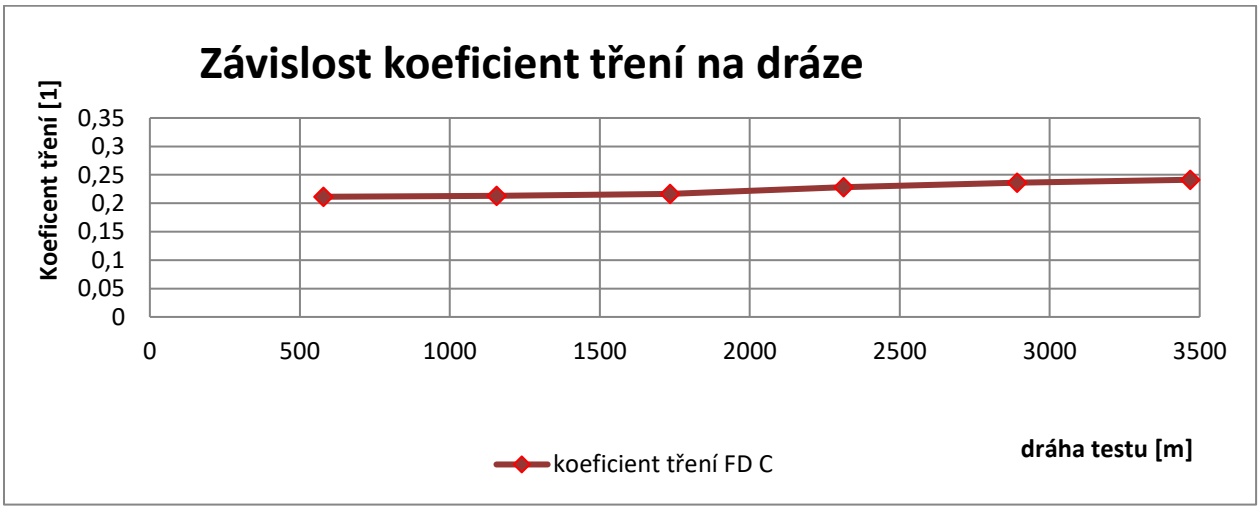
Graf 57: Průběh koeficientu tření FD OCEL/vzorek B v závislosti na dráze testu, zatížení 2kg.

Vzorek C:

Obr. 59: Funkční plocha vzorku C.



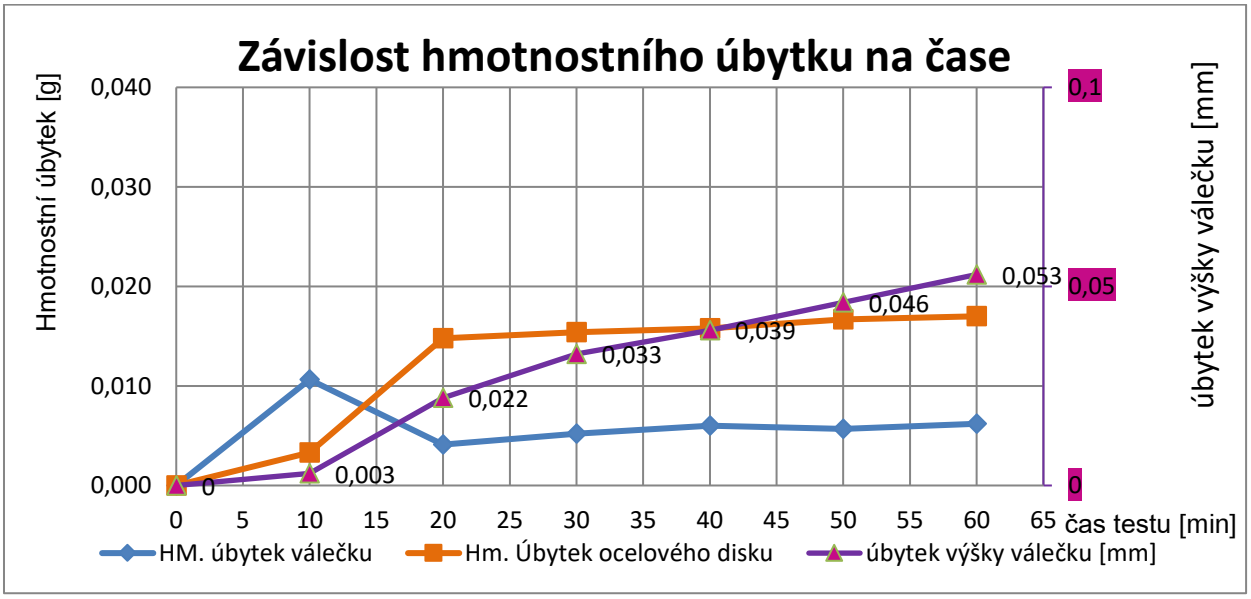
Graf 58: Průběh hmotnostního úbytku FD OCEL/ vzorek C v závislosti na čase testu, zatížení 2kg.



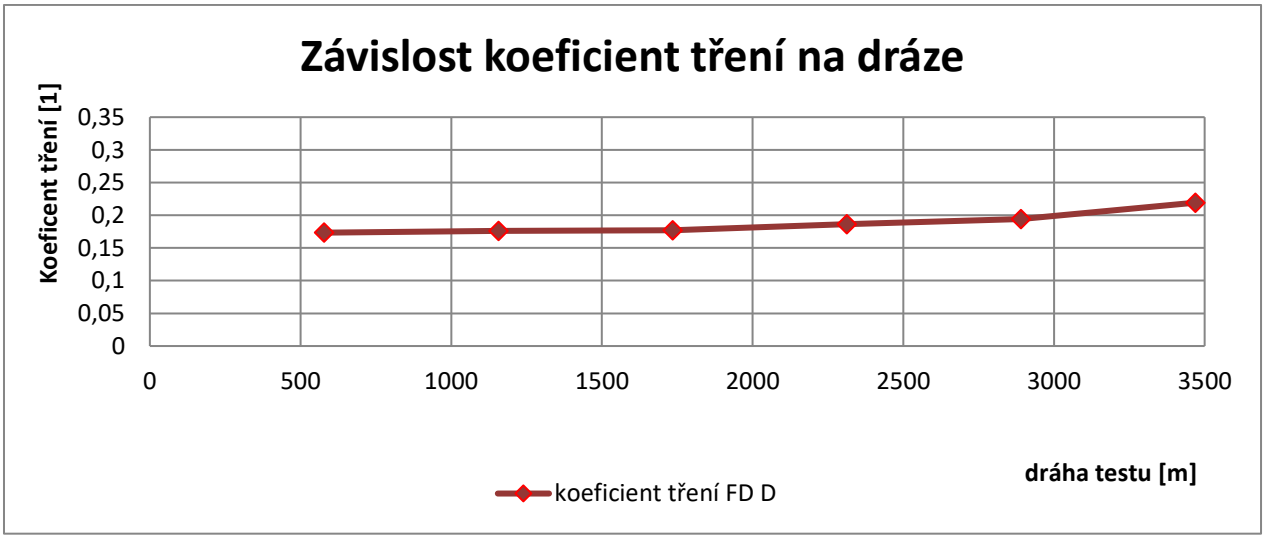
Graf 59: Průběh koeficientu tření FD OCEL/vzorek C v závislosti na dráze testu, zatížení 2kg.

Vzorek D:

Obr. 60: Funkční plocha vzorku D.



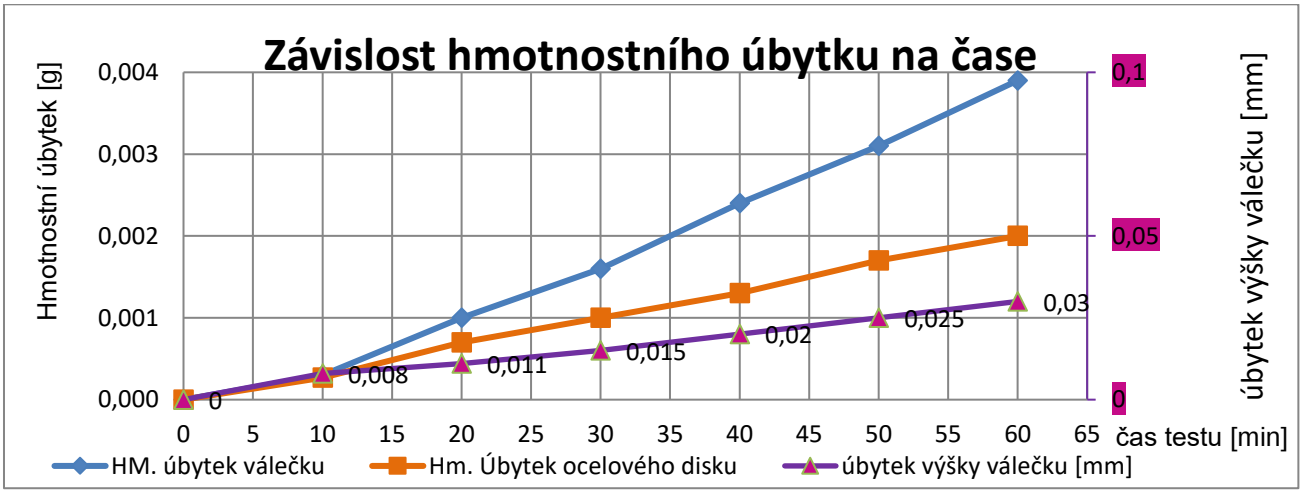
Graf 60: Průběh hmotnostního úbytku FD OCEL/ vzorek D v závislosti na čase testu, zatížení 2kg.



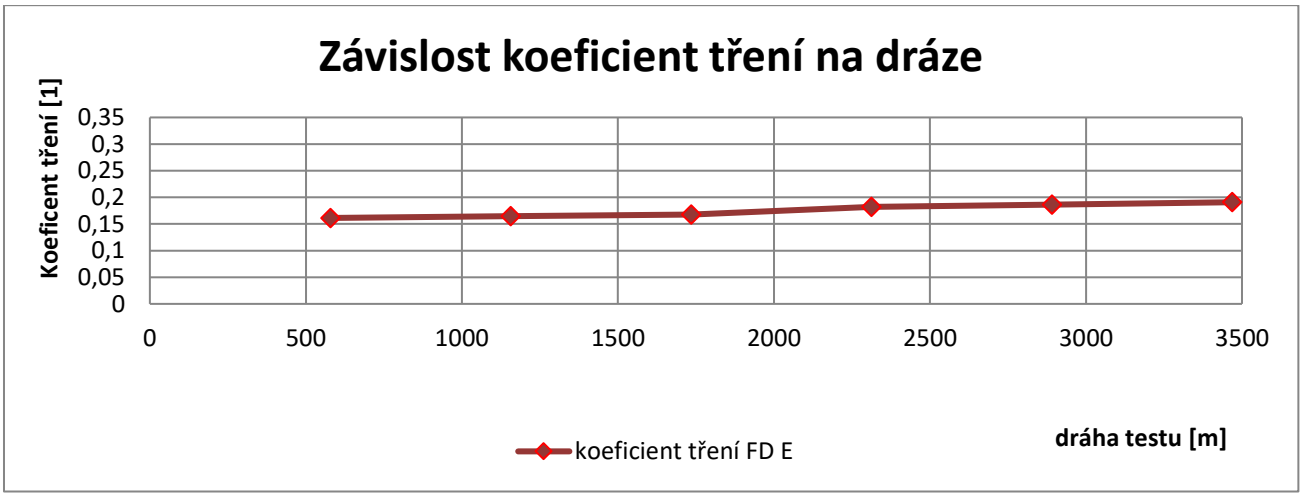
Graf 61: Průběh koeficientu tření FD OCEL/vzorek D v závislosti na dráze testu, zatížení 2kg.

Vzorek E:

Obr. 61: Funkční plocha vzorku E.



Graf 62: Průběh hmotnostního úbytku FD OCEL/ vzorek E v závislosti na čase testu, zatížení 2kg.



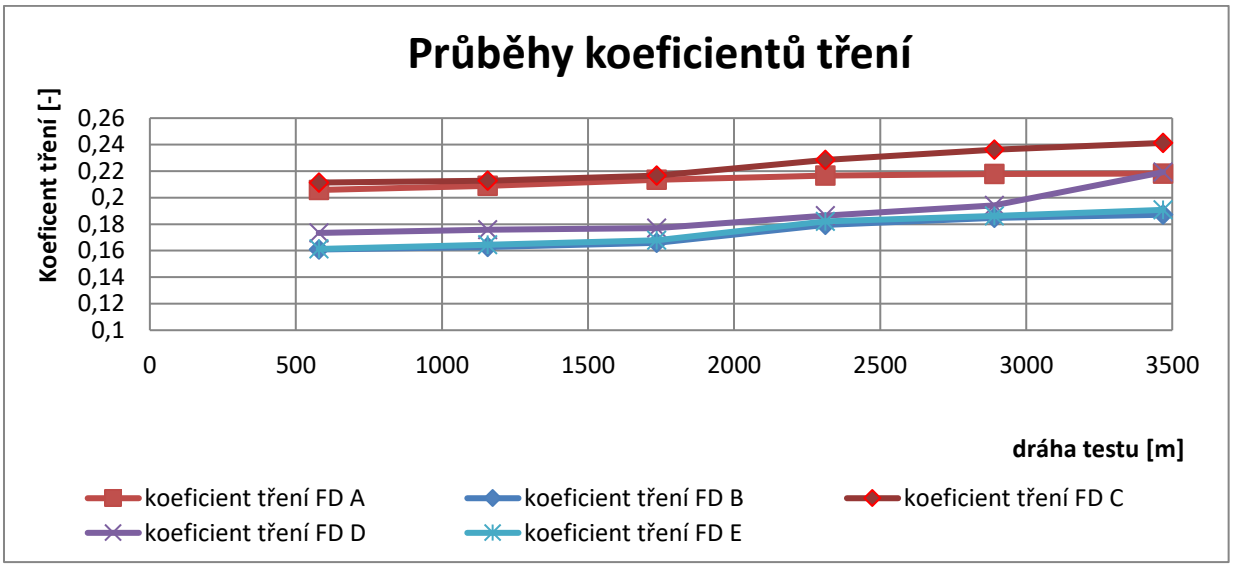
Graf 63: Průběh koeficientu tření FD OCEL/vzorek E v závislosti na dráze testu, zatížení 2kg.

3.4.2 Shrnutí parametrů a vlastností brzdových uzlů

Pro náležitou a adekvátní volbu základních materiálů brzdných uzlu, 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.

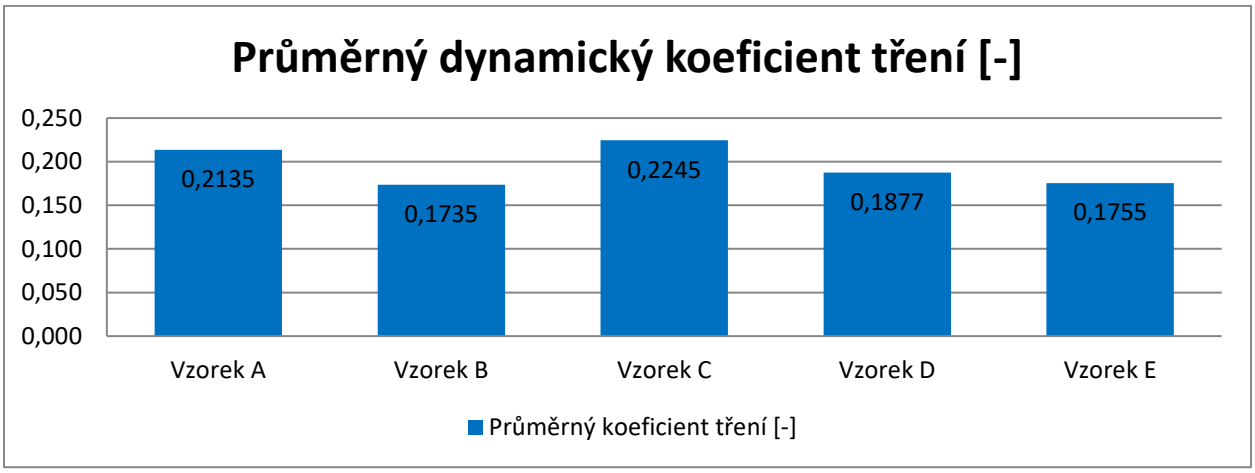
3.4.2.1 Srovnání dynamických koeficientů tření

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 64: 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 mědí 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 65: Porovnání průměrných hodnot koeficientu tření, navržených materiálů.

3.4.2.2 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 hmotností úbytek vykazoval vzorek D. Téměř lineární závislosti vykazují hmotnostní úbytky vzorků C a B. Na základě experimentů lze nastavovat životnost těchto brzdných 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 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 opotřebení na klima planety, zejména na emise CO_2 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 větu: „Hmotu stvořil Bůh, povrchy ďábel“.

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 [VV7]. Zásadní roli v naplnění těchto prognóz sehrají nanotechnologie a děje v submikronových rozměrech povrchů na zcela nových poznatcích vědy.

Ocel a litina mají přes své nesporné výhody i podstatné nedostatky spočívající především:

- v nízké odolnosti proti opotřebení, 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 mikroreliéfů,
- 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 [91]. 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 jejích 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 opotřebováním, při údžbě.

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 CO_2 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 [VV7].

Velmi perspektivní v submikronových aditivech jsou anorganické fullereny dichalkogenidů, přechodových kovů, jako MoS_2 a WS_2. Jejich objevitelem je prof. Reschef Teune na Welzmann Instutute 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-WS_2 (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 snžit hodnoty CO2 jsou shrnuty v publikaci [VV12]. Nanočástice WS_2 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.

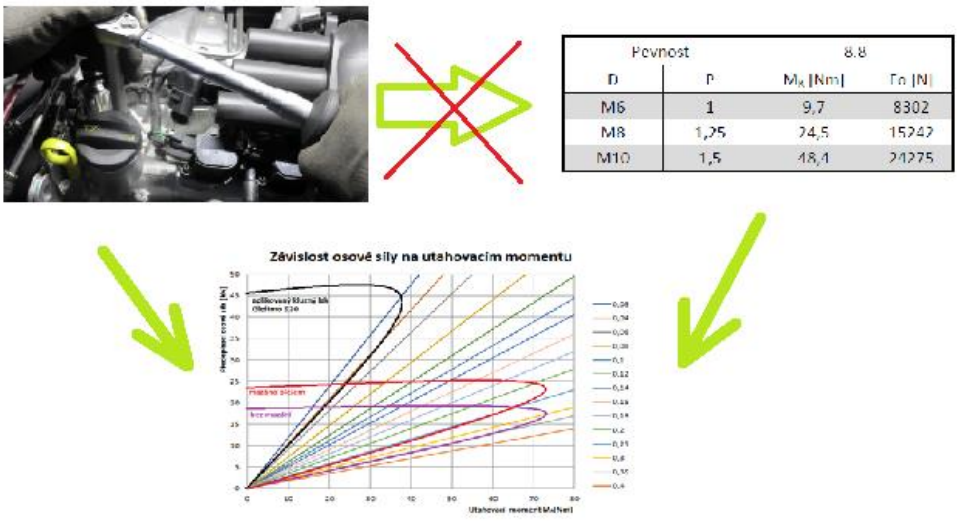
Z uvedených experimentálně ověřených příkladů použitých aditiv SVS a nanočástic IF-WS_2 vyplývají změny v oblastech tribologie směřující k omezení poškozování klimatu cestou snižování spotřeby paliv a energie, a to i v automobilové dopravě viz publikace [VV11] a [VV12].

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, biomimetrický 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 [69, 70, 71, 72, 73]. 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 závitu 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 postu 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 [72]. Proto byla navržená 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 [VV13].



Obr. 62:Nové schéma volby dotahovacího momentu pro praktické použití.

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 ubrzdit, spojit a přenášet stále rostoucí výkony motorů, strojů a vozidel.

V Publikacích autora [VV13], jsou uvedeny některé z výsledků experimentů směřující k optimalizaci složení frikčních materiálů prováděných na navržených a sestrojených tribo stendech k těmto účelům na pracovišti autora na ČVUT v Praze.

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 stopově 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 aplikacemi nanočástic. Vývoj práškové metalurgie a kovokeramických materiálů umožňují renezanci těchto materiálů i technologií a další rozvoj kluzných materiálů s vysokou odolností proti otěru (pod 1μm.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 [VV14], a částečně i této disertační práce nabízejí nové způsoby, jak snížit negativní důsledky tření a zvýšit dle požadavků výkony třecích uzlů.

5 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 CO_2 spalovacích motorů netradičními způsoby na principu kompozitních nanočástic v mazivech.***

Navržení způsobu úspory CO_2 v provozu automobilů snížením pasivních odporů bylo vyřešeno pomocí nových aditivních přísad do maziv.

CÍL č. 2: ***Omezení rizik selhání šroubových spojů stanovením přesných hodnot koeficientů tření a jejich vlivu na předepnutí šroubu.***

Přesné zjišťování závislosti předepnutí šroubů na utahovacích momentech v závislosti na koeficientech tření bylo realizováno pomocí navrženého zařízení.

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

Provedená měření brzdných účinků funkčních třecích ploch potvrdila důležitost materiálového složení na výkon brzdových systémů.

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 CO_2 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 fullerenů (technologie s částicemi maziva sférických fullerenů disulfidu wolframu IF-WS_2

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 CO_2, 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 CO_2 při výrobě a používání energií všech typů. Nanočástice na bázi fullerenů například IF-WS_2 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.

Uvědomme si tuto skutečnost včas, dříve, než budete v dopravním prostředku, který bude mít problémy zpomalit či zastavit.

7 Seznam zdrojů a použité Literatury

[1] ABDELBARY, 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] Merkisz 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] HELEBRANDT, F., ZIEGLER, J., MARASOVÁ, D. Technická diagnostika a spolehlivost I. *Tribodiagnostika*. 2000. Ostrava. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, I.vydání, 153 s., ISBN 80-7078-883-6, str. 27nn.

[16] BLAŠKOVIČ, P., BALLA, J. a OZIMKO, M. *Tribológia*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1990. 362s. ISBN 80-05-00 633-0. Str. 36nn

[17] STACHOWIAK, G., BATCHELOR, A. *Engineering tribology – fourth edition*. UK: Oxford, 2014, p. 883. ISBN 978-0-12-397047-3

[18] DVOŘÁK, M. *Parametry kluzných ložisek moderních spalovacích motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 35 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Novotný, Ph.D. str. 16nn.

[19] Types of lubrication – boundary, hydrostatic and hydrodynamic. *Bright hub engineering.* [online]. [cit.8.1.2020]. Dostupné z: https://www.brighthubengineering.com/manufacturing-technology/73568-hydrostatic-lubrication/

[20] KRÁLOVÁ, Magda. *Smykové tření*. [online]. Techmania [cit.8.1.2020]. Dostupné z: https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/sila/odporove-sily/smykove-treni

[21] KRÁLOVÁ, Magda. *Valivé tření*. [online]. Techmania [cit.8.1.2020]. Dostupné z: https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/sila/odporove-sily/valive-treni

[22] ČERNÝ, Jaroslav. *Vlastnosti motorových olejů*. *Oleje.cz* [online]. [cit. 20.3.2019]. Dostupné z: https://www.oleje.cz/clanek/Vlastnosti-motorovych-oleju---Viskozita.

[23] 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

[24] 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

[25] HROMÁDKO, 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.

[26] KLIMEŠ, Pavel. Části a mechanismy strojů. 1.vyd. Brno: CERM, 2003, 70 s. ISBN80-214-2422-2. s. 29-31.

[27] KOŽOUŠEK, Josef. Výpočet a konstrukce spalovacích motorů II. 1. vyd. Praha:SNTL, 1983, 483 s. s. 114-119.

[28] MACEK, Jan. Spalovací motory. 2. vyd. V Praze, 2012, 262 s. ISBN 978-80-01-05015-6, s. 88nn

[29] 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.

[30] 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

[31] NOVOTNÝ, Pavel, Václav PÍŠTĚK, Richard AMBRÓZ a Lubomír DRÁPAL.*MODERN COMPUTATIONAL APPROACHES TO POWERTRAIN MECHANICALLOSS SOLUTION*. In: [online]. 2010 [cit. 2020-04-11]. Dostupné z:http://pernerscontacts.upce.cz/20_2010/Novotny.pdf

[32] *Částicová fyzika, ekvipartiční teorém.* [online]. [cit. 2020-04-19]. Dostupné z:http://fyzika.fce.vutbr.cz/pub/otazky_cb54.pdf

[33] *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

[34] 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

[35] GÄNSHEIMER, Josef. *Optimalizace šroubových spojů za pomoci tuhých maziv*. Nacházel, s.r.o., [2001]. R. Berman, Physical Properties of Diamond, Clarendon press, Oxford, 1965

[36] K.E. Spear, Journal of the American Ceramic Society 72, 1989, p. 171.

[37] D.W. Wheeler, R.J.K. Wood, Wear 225– 229(1999) 523. reduction, Wear (2006)

[38] R. Ipek, B. Selkuk, *The dry wear profile of cam shift*, Journal of Materials Processing Technology 168 (2005), p.373–376.

[39] 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.

[40] G. Ryk, I. Etsion, Testing piston rings with partial laser surface texturing for friction

[41] 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.

[42] 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.

[43] Gehring Technologies GmbH 2015: LASER HONING. *Gehring Technologies GmbH 2015: LASER HONING* [online]. Ostfildern: Gehring, 2012, 2015 [cit. 2015-12-18]. Dostupné z: http://www.gehring.de/en-ww/laser-honing

[44] 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.

[45] Vlk, F., *Paliva a maziva motorových vozidel*., 1. Vydání, Brno: Vlk František, 2006, ISBN 80-239-6461-5. s. 177-184.

[46] Specifikace motorových olejů. *Petroleum.cz* [online]. [cit. 20.3.2019]. Dostupné z: http://www.petroleum.cz/vyrobky/oleje-motorove-specifikace.aspx

[47] 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

[48] Bílá tuhá maziva. *Tribotechnika*: Mazanie [online]. [cit.26.12.2018]. Dostupné z: https://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12010/bila-tuha-maziva-spravny-krok-v tribologii.html

[49] Tribology 101 – introduction to the basicof tribology. *Bruker:* [online]. [cit.26.12.2018]. Dostupné z: https://www.bruker.com/fileadmin/user_upload/8-PDF-Docs/SurfaceAnalysis/TMT/Webinars/Tribology_101_Webinar-1_Intro_and_Basics_29-Jan-2013.pdf

[50] Tribotechnika v teorii a praxi III. Tribotechnics in theory and practice III : VIII.International conference 21.-24.4.1997 Skalský dvůr. 1. vyd. Praha : Sekuron, 1997. 68 s.

[51] Castrol ČR. Viskozitní klasifikace SAE [online]. [cit. 2012-05-14]. Dostupné z: http://www.castrol.com/castrol/sectiongenericarticle.do?categoryId=9011986&contentId =7023155

[52] MAREK, Vladislav a Ladislav HRABEC. Oleje.cz: Informace ze světa maziv [online]. [cit. 2012- 05-16]. Dostupné z: http://oleje.cz/index.php?left=main&page=clanky_5

[53] 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-technologiemi-rvs.html

[54] Test report- on efficiency of RVS Technology® products for combustion engines with regards to emissions and fuel consumption. RVS-USA [online]. Garching: TÜV Süd, 2010, 09.06. 2010 [cit. 2021-09-24]. Dostupné z: https://www.rvs-usa.com/wp-content/uploads/2017/05/tuev-sued.pdf

[55] *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/

[56] Technologie mazání. *AEROTEC*. [online]. [cit. 18.3.2019]. Dostupné z: https://www.aerotec.cz/cs/technologie

[57] Podstata a funkce MILITECU. *MILITEC*. [online]. [cit.18.3.2019]. Dostupné z: http://www.militec.cz/podstata/

[58] KŘÍZOVÁ, Olga. Nanomaziva a jejich praktické aplikace. *Chemotribos* [online]. Praha, 2020, 7.11.2020 [cit. 2021-01-20]. Dostupné z: http://www.chematribos.cz/Nanomaziva%20a%20moznosti%20jejich%20prakticke%20aplikace.pdf

[59] 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

[60] Ali MKA, Xianjun H, Essa F, Abdelkareem M A, Elagouz A and Sharshir S 2018 Friction and wear reduction mechanisms of the reciprocating contact interfaces using nanolubricant under different loads and speeds Journal of Tribology 140 051606

[61] POSPÍŠIL, František. *Závitová a šroubová spojení*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1968. 264s.Řada strojírenské literatury, s. 167nn

[62] DOMINIK, Josef. FERODOM. *Tribológia skrutkových spojov*. Žilina: Ferodom, 2014, 118 s. ISBN 978-80-9715-010-5. s. 88-96.

[63] BOLEK, Alfred a Josef KOCHMAN. *Části strojů*. Vyd. 5., přeprac. (v SNTL 1. vyd.). Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989. Technický průvodce. ISBN 80-030-0046-7.

[64] ČSN EN ISO 898-1. *Mechanické vlastnosti spojovacích součástí z uhlíkové a legované oceli: Část 1: Šrouby se specifikovanými třídami pevnosti - Hrubá a jemná rozteč*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.

[65] WESSELY, Andreas. *Test šroubů při těžkých zatíženích: Mazání šroubů*. Nacházel, s.r.o., [2000].

[66] ŠVEC, Vladimír. *Části a mechanismy strojů: příklady*. Vyd. 4. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04137-6.

[67] ŠVEC, Vladimír. *Části a mechanismy strojů: spoje a části spojovací*. Vyd. 3. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04138-3.

[68] Předepjatý šroubový spoj. In: *Mechanical, Industrial and Technical Calculations* [online]. Děčín, 2019 [cit. 2019-05-27]. Dostupné z: http://www.mitcalc.cz/doc/boltcon/help/cz/boltcontxt.htm

[69] 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.

[70] Croccolo, D. - De Agostinis, M. – Vincenzi, N. *Failure analysis of bolted joints: Effect of friction coefficients in torque-preloading relationship. Engineering Failure Analysis*, 2011. p. 364, pp.73

[71] 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.

[72] Friedrich C. Reliable light weight fastening of magnesium components in automotive applications. In: Proceedings of the 2004 SAE World Congress. Detroit (Michigan); March 8–11, 2004.

[73] KUDLÁČEK, Jan, Viktor KREIBICH, Petr DRAŠNAR a Dana BENEŠOVÁ. Povrchové úpravy závitových dvojic. MM Průmyslové spektrum [online]. 14.12.2010 [cit. 10.5.2021]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/clanek/povrchove-upravy-zavitovych-dvojic.html

[74] Galvanické zinkování. Eurometal. [online]. [cit. 13.5.2021]. Dostupné z: https://www.eurometal.cz/magazin/rozdil-mezi-zarovym-a-galvanickym-zinkovanim-detail-60

[75] Žárové zinkování. WIEGEL. [online]. [cit. 10.5.2021]. Dostupné z: https://wiegel.cz/fileadmin/redaktion/files algemein/Feuerverzinken/cz/WIEGEL_20131_InformaceProZaroveZinkovani_cz.pdf

[76] 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

[77] Grigoratos, T., Martini, G. Brake wear particle emissions: a review. *Environ Sci Pollut Res* 22**,** 2491–2504, 2015. https://doi.org/10.1007/s11356-014-3696-8

[78] Směrnice komise 659. EC ze dne 3. prosince 1991, o sbližování 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

[79] Směrnice komise 77. EEC. ze dne 26. července 1999, , o sbližování 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

[80] DUFEK, Vladimír. *Kovokeramické třecí materiály*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1965. 134s. Řada strojírenské literatury. s. 76-84.

[81]]MINISTR, Zdeněk. *Strojní součásti z práškových kovů*. 1. Praha: SNTL, 1963, 215 s.

[82] 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

[83] SATHYAMOORTHY,G. - R. VIJAY, SINGARAVELU, D., L. *Brake friction composite materials: A review on classifications and influences of friction materials in braking performance with characterizations.* In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. ISSN 1350-6501. Dostupné z: doi:10.1177/13506501211064082

[84] Bhagwan, D. Garg – Steven, H. - Cadle, - Mulawa, P.- Groblicki, P. – Laroo, Ch. and Graham A. Parr, *Brake Wear Particulate Matter Emissions Environmental Science & Technology* 2000 *34* (21), 4463-4469 DOI: 10.1021/es001108h

[85] 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 EngineeringTribology* 2021**,** *11* ,135065012110640. https://doi.org/10.1177/13506501211064082

[86] Mohamed, A. - Ahdy, Mohamed, K. - Kamal Ahmed Ali, M. Mourad, Ali M. Abd-El-Tawwab. Review of automotive brake lining materials and their tribological properties. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* 2021, *1,*135065012110598. https://doi.org/10.1177/13506501211059812

[87] Bijwe J. Composites as friction materials: recent developments in non-asbestos fiber reinforced friction materials—a review. Polym Compos. 2014; pp. 378– p. 96.

[88] Venugopal S, Karikalan L. A review paper on aluminium-alumina arrangement of composite materials in automotive brakes. Mater Today Proc. 2020;pp.320

[89] BORAWSKI, Andrzej. Conventional and unconventional materials used in the production of brake pads – review. In: *Science and Engineering of Composite Materials*. 2020, p. 374-396. ISSN 2191-0359. Dostupné z: doi:10.1515/secm-2020-0041

[90] VÁLOVÁ, Marie. *Kvalita povrchů a tribologické vlastnosti materiálů*. Praha, 2004, p. 90. Diplomová. ČVUT v Praze.

[91] PLESKAČ, Jan. Tribologické vlastnosti funkčních dvojic materiálů. Praha, 2004, p. 72, Diplomová. ČVUT v Praze.

[92] 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.

[93] 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/

[94] SKOPAL, Jaroslav. TECHNICKÁ NORMALIZACE A NANOTECHNOLOGIE. In: *Progresivní a netradiční technologie povrchových úprav / 3. Mezinárodní odborný seminář-Sborník přednášek*. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2006, s. 92-95. ISBN 80-239-8275-3.

8 Publikace autora spojené s prací

[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] KUCHAŘ, 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, A.G.B 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] KUCHAŘ, 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 spalovacích motorů 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 CO_2. 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.pd

[VV14] Z. HAZDRA. *Zvýšení výkonu brzdných uzlů* Občasník Povrcháři. 2033,(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-automobilový-průmysl.html

9 Publikace autora

[FV1] HAZDRA, Z. Zařízení pro měření koeficientu tření ve šroubových spojích. [Funkční vzorek], 2021.

[PA1] KUCHAŘ, J. – HAZDRA, Z. Technologie naší doby – čištění nepřístupných míst. In: MECHATRONICS – PRODUCTION TECHNOLOGIES - DIGITAL ENTERPRISE. Trnava, 2021-04-14. Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2021. s. 81-87. sv. 1. ISBN 978-80-87691-36-6.

[PA2] 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.

[PA3] 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.

[PA4] HUSAIN, H. – HAZDRA, Z. – ROHAN, P. – KUCHAR, J. *Risk factors for B4C composite utilization in tribological processes.* In: Metal 2021- Conference Proceedings. 30th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials, Brno, 2021-05-26/2021-05-28. Ostrava: Tanger Ltd., 2021. P. 801-806. ISSN 2694-9296. ISBN 978-80-87294-99-4. DOI 10.37904/metal.2021.4186

[PA5] ROHAN, P. – HAZDRA, Z. – KUCHAR, J. *Pulsed-PTA Preparation of B4C-Based Titanium Matrix Cermet.* In: Thermal Spray 2021: Proceedings from the International Thermal Spray Conference. International Thermal Spray Conference, virtual, 2021-05-24/2021-07-28. Materials Park, OH: ASM International, 2021. P. 298-306. DOI:10.31399/asm.cp.itsc2021p0298

[PA6] 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.

[PA7] KUCHAŘ, J.- KREIBICH, V. – HAZDRA, Z. *Cleaning of liquid waste from the cleaning process.* In: TECHNOLOGICAL FORUM 2020. Jaroměř, 2020-11-25. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2020. P. 98-101. ISBN 978-80-87583-32-6.

[PA8] DRAŠNAR, P. – HAZDRA, Z. – KREIBICH, V. – MACHKA, B. *Tribological properties of modern coatings on aluminium.* In: International Conference on Innovative Technologies IN-TECH 2019 Belgrade - Proceedings. IN-TECH 2019 International Conference on Innovative Technologies, Belgrade, 2019-09-11/2019-09-13. Rijeka: Faculty of Engineering University of Rijeka, 2019. P. 138-141. ISSN 0184-9069.

[PA9] 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

[PA10] 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

[PA11] HAZDRA, Z. RENOVATION TECHNOLOGY OF CYLINDER LINERS IN COMBUSTION ENGINE. In: KUDLÁČEK, J. etal., eds. Technological forum 2018 Book of Proceeding. Technologické fórum 2018,Váňův statek - Dubovice, 2018-06-26/2018-06-28. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček,2018. s. 58-61. ISBN 978-80-87583-26-5.

[PA12] HAZDRA, Z. Snižování mechanických ztrát ve spalovacích motorech. Občasník Povrcháři. 2018, 3(3), 15-17. ISSN 1802-9833. Dostupné z: http://povrchari.cz/kestazeni/201803_povrchari.pdf

[PA13] 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.

[PA14] HAZDRA, Z. – KREIBICH, V. Mazání spalovacích motorů a převodovek. In: Progresivní a netradiční technologie povrchových úprav / 15. Mezinárodní odborný seminář - Sborník přednášek. Progresivní

a netradiční technologie povrchových úprav / 15. Mezinárodní odborný seminář, Brno, 2018-11-28/2018-11- 29. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2018. s. 81-84. ISBN 978-80-87583-28-9.

[PA15] KUCHAŘ, 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.

[PA16] HAZDRA, Z., J. KUDLÁČEK a V. KREIBICH. Friction in Automotive Internal Combustion Engines. In: БАЛИЦКИЙ, A.G.B 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.

[PA17] 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

[PA18] KUCHAŘ, 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

[PA19] KUCHAŘ, J., V. KREIBICH a Z. HAZDRA. Cleaning the internal sufaces of heating systems. In: KUDLÁČEK, J., ed. Technological forum 2016. Červenohorské sedlo, 2016-06-28/2016-06-30. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2016. s. 84-86. ISBN 978-80-87583-17-3.

[PA20] KUCHAŘ, J., V. KREIBICH a Z. HAZDRA. Chemical cleaning of inner surfaces of heating and energy equipment. In: ZLATAN, C. a J. KUDLÁČEK, eds. IN-TECH 2016 - International Conference on Innovative Technologies. International Conference on Innovative Technologies, Praha, 2016-09-06/2016-09-08. Rijeka: Faculty of Engineering University of Rijeka, 2016. s. 343-346. ISSN 1849-0662.

[PA21] HAZDRA, Z. Technologie povrchových úprav snižující spotřebu spalovacích motorů a produkci CO2. Povrcháři. 2016,(4), ISSN 1802-9833. Dostupné z: http://www.povrchari.cz/kestazeni/201604_povrchari.pdf

[PA22] HAZDRA, Z. - KUCHAŘ, J., V. KREIBICH. *The influence of hydrogen on the properties of titanium alloy Grade 2*. Book of Proceedings. Technological forum 2015, 6th International Technical Conference, Kouty, 2015-06-23/2015-06-25. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2015. s. 36-40. ISBN 978-80-87583-13-5.

[PA23] HAZDRA, Zdeněk. Vliv pasivních odporů na spotřebu paliva a tvorbu emisí CO_2. Technický týdeník. 8. 3. 2022, roč. 64, č. 4, s. 26.

[PA24] 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.pd

[PA25] Z. HAZDRA. *Zvýšení výkonu brzdných uzlů* Občasník Povrcháři. 2033,(4), 9-10. ISSN 1802-9833. Dostupné z: http://povrchari.cz/kestazeni/202204_povrchari.pdf

[PA26] 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-automobilový-průmysl.html

9.1 Vyzvané přednášky

[1VP] HAZDRA, Z., - KUDLÁČEK, J. - V. KREIBICH. Friction in Automotive Internal Combustion Engines. In: БАЛИЦКИЙ, A.G.B 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. – KUCHAŘ, 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.

10 PŘÍLOHY

[P1] BAS Delta. In: *BAS* [online]. Blansko [cit. 2021-07-13]. Dostupné z: https://www.bas.cz/innov-x-systems/rucni_analyzator_kovu_delta_professional.php

RUČNÍ SPEKTROMETR A RUČNÍ ANALYZÁTOR KOVŮ DELTA PROFESSIONAL

Ruční analyzátor kovů, který přináší:
přesnost, rychlost, výkonnost, spolehlivost.

Série ručních analyzátorů kovů s označením DELTA představuje revoluci v ručních analyzátorech. Výrobce při tvorbě nové série DELTA využil všech dosavadních zkušeností z produkce více jak 10 000 přístrojů. V ČR a SR instalováno již **přes 1 000 ručních analyzátorů Innov-X**. Série DELTA využívá kompaktní rentgenky s **výkonem 4W** a pro lehké prvky využívá možnosti **maximálního proudu až 200 A!** Velmi úzká geometrie detektoru, vzorku a rentgenky zajišťuje maximalizaci užitečného signálu a dosažení nejlepších možných přesností.

Model DELTA používá **velkoplošný SDD detektor**, díky němuž dosahuje vyjímečných detekčních limitů a citlivosti i pro prvky jako jsou **Mg, Al, Si, P, S, ...** Série DELTA využívá nového typu **floating point procesoru**, který zásadně zrychluje veškeré operace přístroje, výpočty i rychlost reakcí uživatelského rozhraní. Přístroj tak reaguje vždy bez jakýchkoliv prodlev. Start přístroje ze zcela vypnutého stavu netrvá déle než 30 sekund. Přístroj používá propracovaný power management, který nebývale šetří hlavní baterii. **Žádný jiný přístroj nevydrží na jednu baterii pracovat tak dlouho, tak rychle a tak přesně jako model DELTA**. Přístroj podporuje výměnu baterií za chodu bez nutnosti vypínání přístroje nebo softwaru.

S přístrojem je tak možné pracovat nepřetržitě. Při vývoji série DELTA byl kladen důraz na maximání spolehlivost, **bezpečnost** obsluhy a robustnost přístroje. Nově tato série používá speciálního systému odvodu tepla z kritických částí přístroje pomocí speciálního chladiče. Přístroj podporuje přenos naměřených dat pomocí **USB a Bluetooth**, přičemž s přístrojem je dodávaný kompletní data management pro tisk atestů, protokolů a souhrnných tabulek. Tělo přístroje je vyrobeno z osvědčeného materiálu **LEXAN**, který odolává i těm nejnáročnejším provozním podmínkám.

Samozřejmostí je **voděvzdornost a totální prachotěsnost**. Dříve nevídaná rychlost, operativnost, jednoduchost ovládání jsou pro tuto modelovou řadu samozřejmostí.

Outdoor robustní provedení přístroje s pevně zapuštěným displejem zajišťuje odolnost přístroje ve všech situacích. Nový typ dotekového průmyslového displeje **BLANVIEW** zajišťuje výbornou čitelnost jak na přímém slunci tak za snížené viditelnosti. Provedení HW vyniká svou výkonností a spolehlivostí díky léty vyvíjenému konceptu kompaktnosti HV komponent.

Spolu se standardními prvky **Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Zr, Nb, Mo, Hf, W, Ta, Re, Pb, Ag, Sn, Bi** a **Sb** přístroj dokáže analyzovat prvky jako jsou **Au, Pd, Pt, Ir, Rh** a dále pak samozřejmě prvky **Al**, **Mg**, **Si**, **P, S bez použití vakua či hélia** a to s bezkonkurenční analytickou přesností a rychlostí. Je možné přidat i další měřené prvky. Přístroj je bateriově napájen. Lze analyzovat vzorky, které mohou mít různé velikosti a tvary. Velkou výhodou je, že ve většině případů není potřeba žádná příprava vzorků a měření je nedestruktivní. Spektrometry DELTA mohou být na vyžádání vybaveny integrovanou full VGA kamerou s možností zúžení RTG paprsku na pouhé 3 mm. Kamera v kombinaci se zúžením paprsku poté umožňuje provedení analýzy například tenkých svarů, drobných kompnent, heterogenních materiálů, šperků atd. Výsledky se zobrazují okamžitě po startu měření. Výrobcem je renomovaná americká firma Innov-X Systems Inc.

[P3] Technický list výrobku GL220

Informace o výrobku

GLEIT -μ® GL 220

MoS_2-kluzný lak systém

nacházel® lubricants

Popis výrobku

Ve stavu dodání
GLEIT-μ GL 220 je šedočerný kluzný lak, který je postaven na bázi anorganického pojiva a postupně sladěné kombinaci tuhých maziv s vysokým podílem MoS_2. Jako ředidlo je zde použit speciální benzín.

Po nanesení
GLEIT-μ GL 220 a odpaření ředidla se na povrchu vytvoří suchý, dobře držící, extrémně tlakově odolný šedočerný kluzný film.

Okruhy použití

Suché mazání:
tam, kde je požadována čistota od olejů a tuků, a kde z důvodu dalšího provozního namáhání je potřebný optimální záběh nebo tam, kde je zapotřebí suchého, vysoce tlakově zatížitelného kluzného filmu (montáž).

Beztřískové tváření kovů:
těžce tvářitelné materiály jsou při použití GLEIT-μ GL 220 dobře zpracovatelné. Zamezí se tím studeným svárům a je možný vysoký stupeň přetvoření.

Vlastnosti

- **suchý, šedočerný kluzný film**
- **extrémně odolný vůči tlaku**
- **konstantní, velmi nízké a opakovatelné hodnoty tření**
- **optimalizuje průběh záběhových procesů**
- **minimalizuje nebezpečí vniku trhavého pohybu (stick-slip)**
- **široký okruh teplotního použití od -180°C do 450°C**
- **umožňuje u strojních součástí počitatelné hodnoty tření**
- **umožňuje skladování montážně namazaných dílů**
- **nabízíme cenově výhodné a profesionálně provedené potažení**
- **je k dispozici i ve spreji**

Příklady použití

- **záběhové procesy na čepech ložisek**
- **závity z ušlechtilých ocelí**
- **podložky**
- **lisování za studena, rozšiřování, redukování**
- **při vysokých plošných tlacích a nízkých kluzných rychlostech**

GLEIT -μ® Speciální maziva a potahování

Výrobce:
Wessely Ges.m.b.H.
Gleis-Straße 1, A-2100 Korneuburg
Tel.: 0043/2262/758390 Fax: 0043/2262/758913
e-mail: wessely@wessely.co.at
http://www.wessely.co.at

Váš partner pro speciální maziva

Nacházel, s.r.o. • Průmyslová 11/1472 • 102 19 Praha 10 - Hostivař • tel.: 222 351 140 • fax: 222 351 149
e-mail: maziva@nachazel.cz , http://www.nachazel.cz

[P2]

https://skoleniaabosch.cz/img/ke-stazeni/produktove-tiskoviny/skupina-bea-2021.pdf

BEA 950: prémiová stanice pro měření emisí s nejvyššími nároky

[illegible]

[illegible]

[illegible]

Obj. číslo:
BEA 950 S1 benzin/diesel: 0 684 122 250
BEA 950 S2 benzin/diesel: 0 684 122 252
BEA 950 benzin: 0 684 122 257

Systém zahrnuje:

- BEA 055, měřicí modul 4/5 plynů (CO, CO_2, HC, O_2, volitelně NO)
- BEA 070, měřicí modul opacimetru, Bluetooth. Volitelně přísluSenství: akumulátor a nabíjecí stanice (není součástí dodávky modelu BEA 950 benzin)
- BEA 030, modul měření otáček, Bluetooth (B+/B-, TN/TD, teplota)
- Diagnostický tester řídicích jednotek KTS 560 (součástí dodávky jen u modelu S1)
- BEA 060, modul měření otáček na vibračně akustickém principu (součástí dodávky u modelu S1 a S2)
- PC, monitor, barevná laserová tiskárna A4
- Dálkové ovládání

Výhody stanice BEA 950 v přehledu

[illegible]

[P3] Potvrzení druhé vyzvané přednášky **[2VP]**

Vyzvaná přednáška

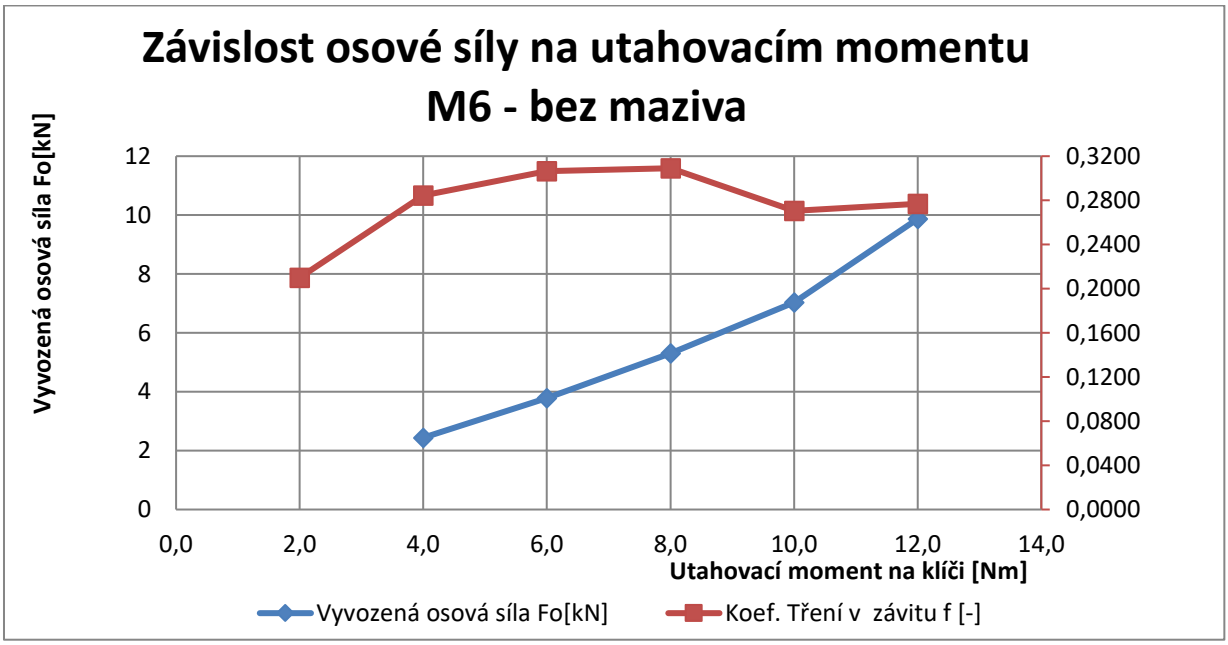
Tímto prohlašuji a potvrzuji vyzvanou online přednášku Ing. Zdeňka Hazdry, který přednesl příspěvek **dne 14.4.2021** na téma **„TŘENÍ VE ŠROUBOVÝCH SPOJÍCH“** na konferenci **MECHATRONICS, PRODUCTION TECHNOLOGIES, DIGITAL ENTERPRISE: latest success, challenges and trends**, která se uskutečnila 14.4.2021 ve Trnave.

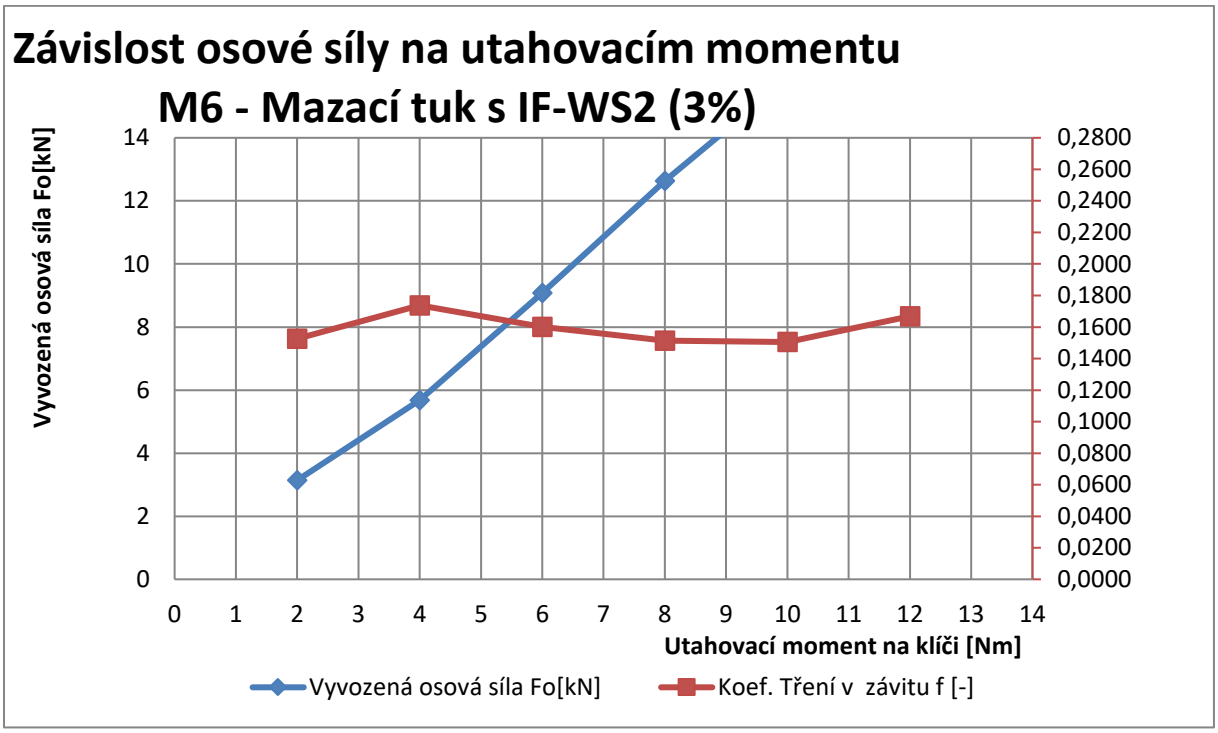
Ve Trnave, 5.1.2022

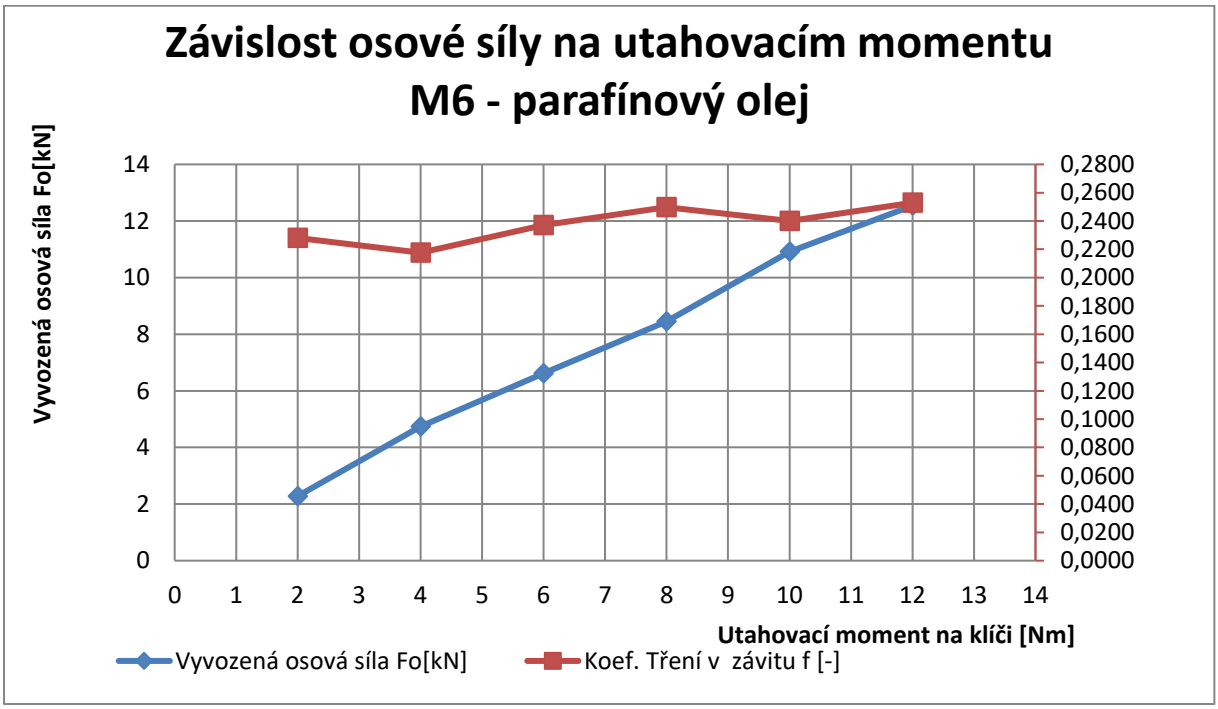
.....

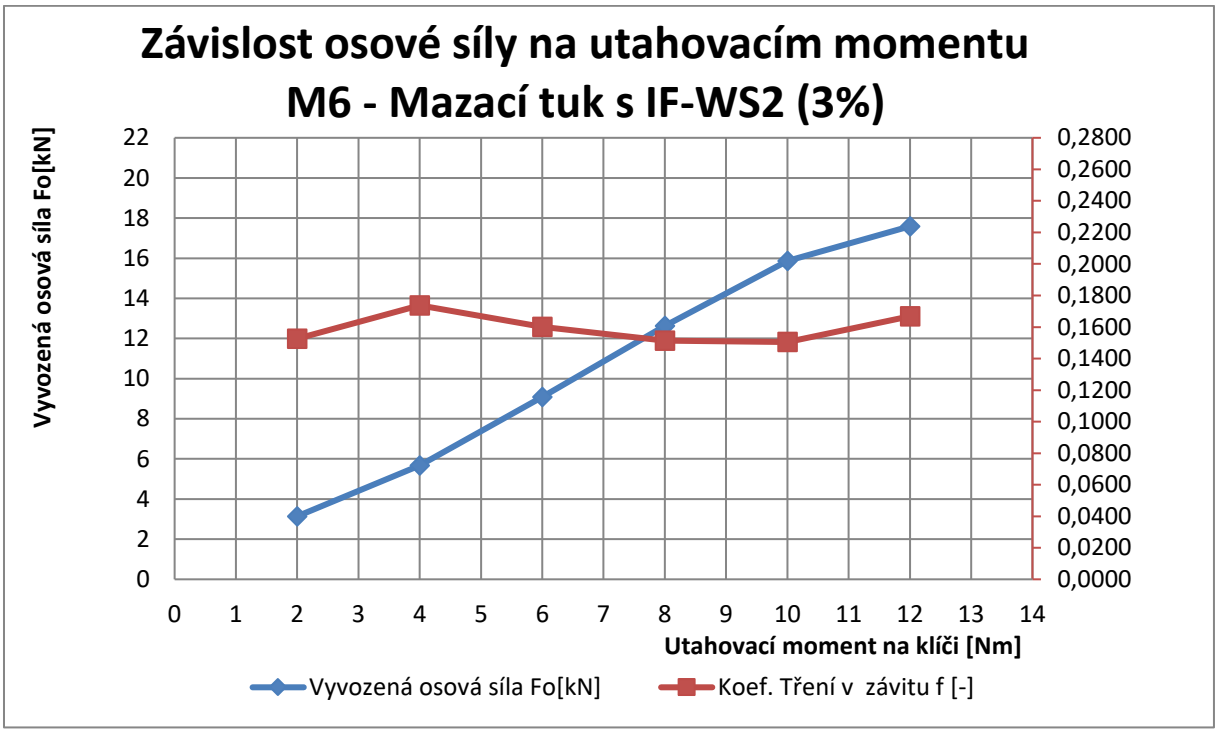
Ing.Vanessa Prajová, PhD.
Slovenská technická univerzita v Bratislave,
Materiálovotechnologická fakulta v Trnave

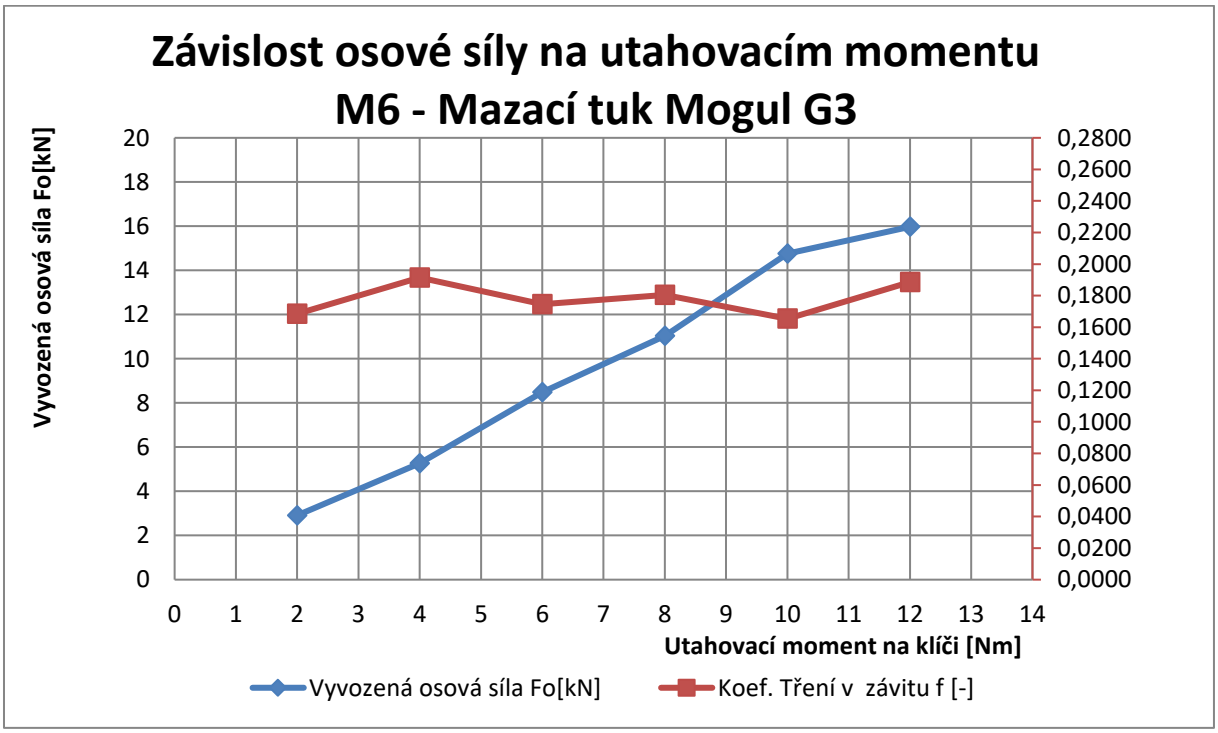
[P4]

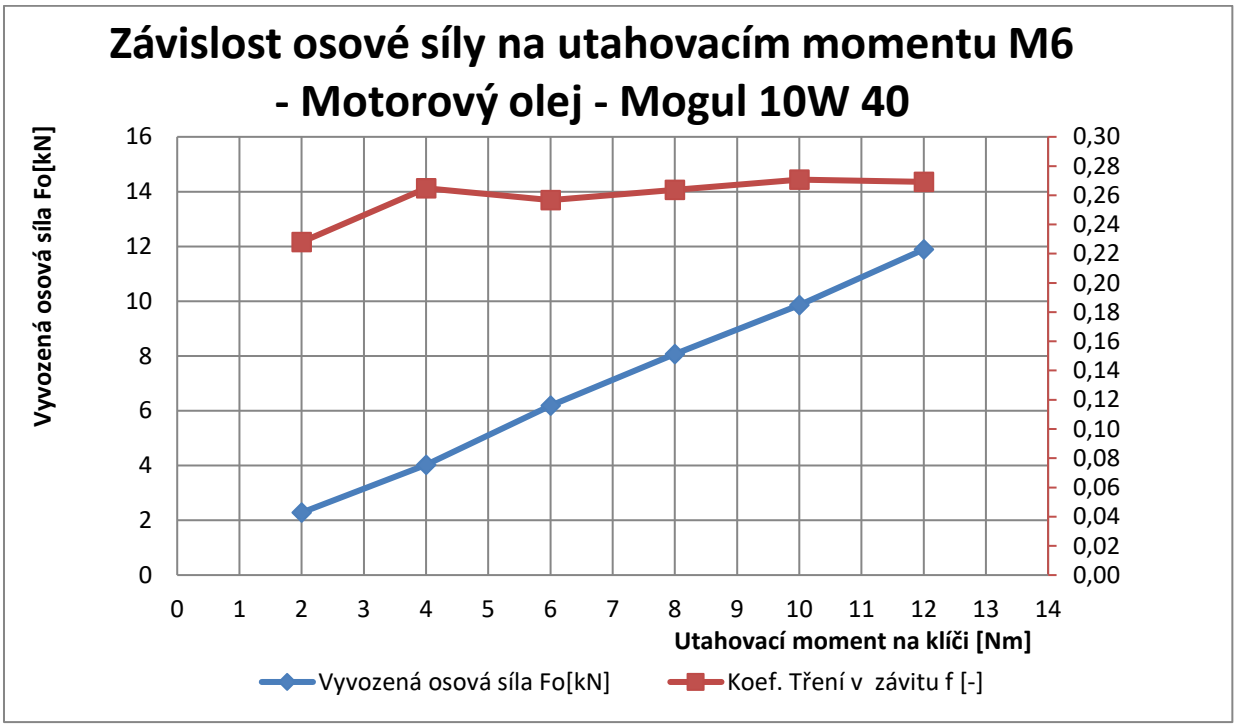


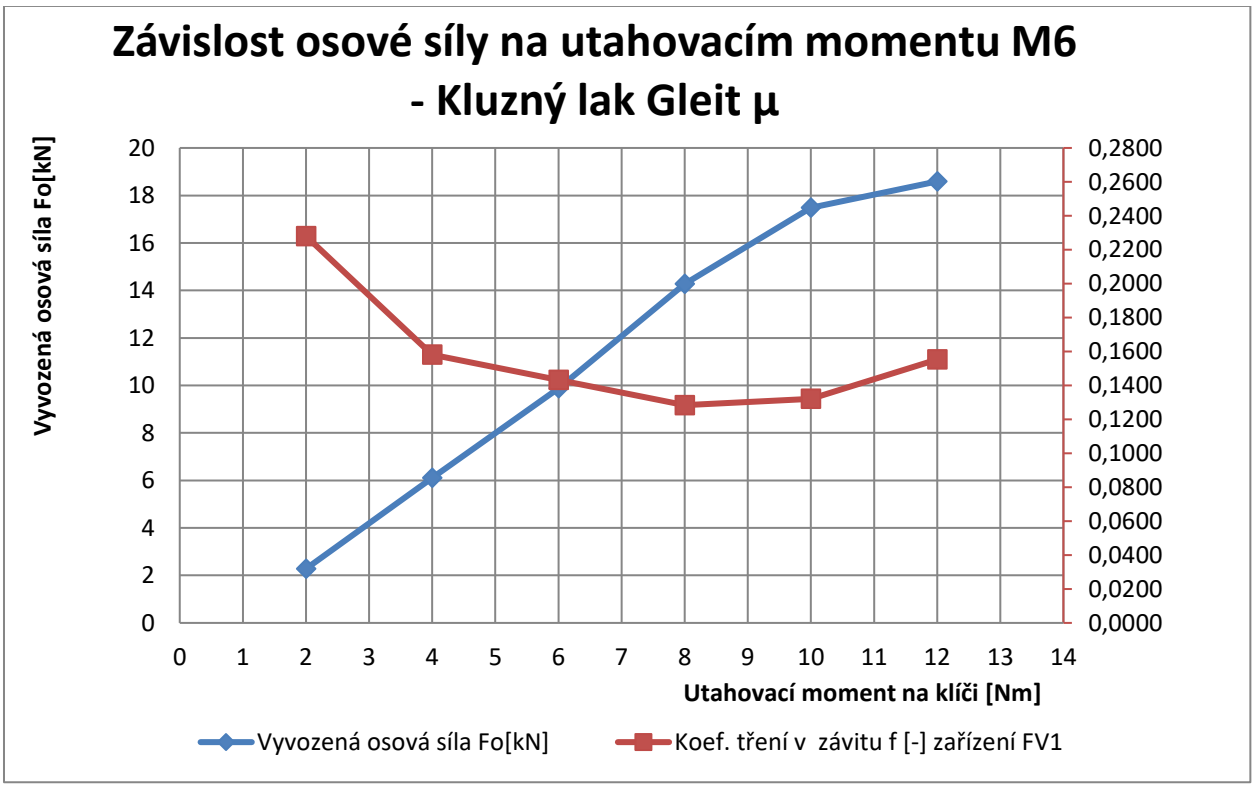

Závislost osové síly na utahovacím momentu
M6 - Mazací tuk s IF-WS2 (3%)
Vyvozená osová síla Fo[kN]
0
2
4
6
8
10
12
14
0,0000
0,0200
0,0400
0,0600
0,0800
0,1000
0,1200
0,1400
0,1600
0,1800
0,2000
0,2200
0,2400
0,2600
0,2800
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14
Utahovací moment na klíči [Nm]
Vyvozená osová síla Fo[kN]
Koef. Tření v závitu f [-]


Závislost osové síly na utahovacím momentu
M6 - parafínový olej
Vyvozená osová síla Fo[kN]
0
2
4
6
8
10
12
14
0,0000
0,0200
0,0400
0,0600
0,0800
0,1000
0,1200
0,1400
0,1600
0,1800
0,2000
0,2200
0,2400
0,2600
0,2800
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14
Utahovací moment na klíči [Nm]
Vyvozená osová síla Fo[kN]
Koef. Tření v závitu f [-]


Závislost osové síly na utahovacím momentu
M6 - Mazací tuk s IF-WS2 (3%)
Vyvozená osová síla Fo[kN]
Utahovací moment na klíči [Nm]
Vyvozená osová síla Fo[kN]
Koef. Tření v závitu f [-]


Závislost osové síly na utahovacím momentu
M6 - Mazací tuk Mogul G3
Vyvozená osová síla Fo[kN]
Utahovací moment na klíči [Nm]
Vyvozená osová síla Fo[kN]
Koef. Tření v závitu f [-]


Závislost osové síly na utahovacím momentu M6
- Motorový olej - Mogul 10W 40
Vyvozená osová síla Fo[kN]
Utahovací moment na klíči [Nm]
Vyvozená osová síla Fo[kN]
Koef. Tření v závitu f [-]


Závislost osové síly na utahovacím momentu M6
- Kluzný lak Gleit µ
Vyvozená osová síla Fo[kN]
Utahovací moment na klíči [Nm]
Vyvozená osová síla Fo[kN]
Koef. tření v závitu f [-] zařízení FV1

[P5]

Zjištěná data funkční dvojice OCEL - ocel 316L								
FD II.-01		Váleček - ocel 316L				Disk - OCEL		koeficient tření FD II.
čas [min]	dráha [m]	hmotnost [g]	Hm. Úbytek [g]	výška válečku [mm]	úbytek výšky válečku [mm]	hmotnost [g]2	Hm. Úbytek [g]2	Sloupec1
0	0,000	47,3264	0,0000	19,98	0	132,1542	0,0000	-
0,19	10,983	47,3341	-0,0077	20,01	-0,03	132,1400	0,0142	0,7721
3	173,416	x	x	x	x	x	x	x

Zjištěná data funkční dvojice OCEL - Bronz								
FD III.-01		Váleček - DURAL (EN AW 7075)				Disk - OCEL		
čas [min]	dráha [m]	hmotnost [g]	Hm. Úbytek [g]	výška válečku [mm]	úbytek výšky válečku [mm]	hmotnost [g]2	Hm. Úbytek [g]3	koeficient tření FD I.
0	0,000	53,0234	0,0000	20,04	0	129,8460	0,0000	-
1	57,805	53,0196	0,0038	20,02	0,02	129,8458	0,0002	0,281
3	173,416	53,0191	0,0043	19,99	0,05	129,8452	0,0008	0,288
5	289,027	53,0185	0,0049	19,97	0,07	129,8450	0,0010	0,286
7	404,637	53,0181	0,0053	19,96	0,08	129,8448	0,0012	0,29
9	520,248	53,0176	0,0058	19,94	0,1	129,8445	0,0015	0,283
11	635,858	53,0172	0,0062	19,92	0,12	129,8443	0,0017	0,285
13	751,469	53,0165	0,0069	19,91	0,13	129,8440	0,0020	0,294
15	867,080	53,0158	0,0076	19,88	0,16	129,8437	0,0023	0,292