



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

## VÝVOJ MAZIVA PRO TEMENO KOLEJNICE

TOP OF RAIL LUBRICANT DEVELOPMENT

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Šimon Skurka

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Daniel Kvarda

BRNO 2021



# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování  
Student: **Bc. Šimon Skurka**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Konstrukční inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Daniel Kvarda**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Vývoj maziva pro temeno kolejnice

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Efektivita a bezpečnost kolejové dopravy je významně ovlivněna tribologickými procesy v kontaktu kola a kolejnice. Maziva pro temeno kolejnice představují efektivní způsob řízení adheze v kontaktu. Aplikací těchto kompozic lze docílit optimální úrovně adheze, snížení hluku a redukci opotřebení. Doposud publikované odborné články byly takřka výhradně zaměřeny na popis chování komerčně dostupných maziv. V současné době tedy není popsán vliv jednotlivých složek maziva pro temeno kolejnice na adhezi.

Typ práce: výzkumná

Výstup práce: publikační výsledek (J, D)

Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

**Cíle diplomové práce:**

Hlavním cílem práce je navrhnout vhodné složení maziva pro temeno kolejnice s ohledem na adhezní chování.

Dílčí cíle diplomové práce:

- analýza složení maziv pro temeno kolejnice,
- návrh experimentálního přístupu,
- posouzení adhezních vlastností různých složení maziva,
- vyhodnocení, interpretace a publikace výsledků.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske–studium–ukoncení/>

**Seznam doporučené literatury:**

OLOFSSON, U. a R. LEWIS. Wheel-rail interface handbook. Cambridge: Woodhead Publishing, 2009. ISBN 978-1-84569-412-8.

LEWIS, S.R., R. LEWIS, J. COTTER, X. LU a D.T. EADIE. A new method for the assessment of traction enhancers and the generation of organic layers in a twin-disc machine. *Wear*. 2016, 366-367, 258-267. ISSN 0043-1648.

HARMON, M. a R. LEWIS. Review of top of rail friction modifier tribology. *Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces*. 2016, 10(3), 150-162. ISSN 1751-5831.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Modifikace tření v kontaktu kola a kolejnice představuje cestu k dosažení ekologicky šetrné přepravy osob a materiálu. Cílem diplomové práce je vyvinout mazivo pro temeno kolejnice, které by navozovalo vhodné třecí podmínky a zajišťovalo dostatečnou adhezi pro rozjezd či brzdění vozidla. Experimentální část práce probíhala na tribometru v konfiguraci ball-on-disc. Nejprve byly měřeny jednotlivé složky maziva. Poté byly zkoumány jejich vícesložkové kompozice a tři nejlepší byly následně porovnány s komerčními produkty. Navržená maziva prokázala dobrou schopnost řízení adheze, redukce opotřebení a také odolnost vůči přemazání. V závěru práce je diskutován proces verifikace, kterým musí mazivo projít před jeho nasazením na reálné trati.

## KLÍČOVÁ SLOVA

TOR maziva, kontakt kola a kolejnice, adheze, modifikace tření

## ABSTRACT

Friction modification within the wheel-rail interface is an important way of achieving ecologically friendly transportation of both persons and goods. This thesis aims to develop a new TOR lubricant, which will be able to maintain suitable frictional conditions while securing minimal adhesion required for traction. All measurements were carried out on tribometer MTM in the ball-on-disc configuration. In the first step, individual components were examined. More complex compositions were measured after that and the three best of them were compared with commercial TOR lubricants. The results show a good ability of developed compositions to maintain required adhesion, reduce wear, and all of them had resistivity against over-lubrication. Lastly, the process of lubricant verification before its application in real traffic was discussed.

## KEYWORDS

TOR lubricants, wheel-rail interface, adhesion, friction modification



## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SKURKA, Šimon. *Vývoj maziva pro temeno kolejnice*. Brno, 2021, 92 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce Ing. Daniel Kvarda.



## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu Ing. Danielu Kvardovi za pomoc, bez které by tato práce nemohla nikdy vzniknout. Můj dík patří také Ing. Radovanu Galasovi, Ph. D. za poskytnuté rady a cenné připomínky. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům za podporu v průběhu celého studia.

## PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Daniela Kvardy. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>14</b>
2.1	Kontakt kola a kolejnice	14
2.1.1	Kolo a kolejnice	14
2.1.2	Tření, trakce, adheze	15
2.1.3	Trakční křivka a bod saturace	17
2.1.4	Režimy mazání	18
2.1.5	Opotřebení a hluk	19
2.2	Modifikace tření mazivy pro temeno kolejnice	21
2.2.1	Adheze v kolejové dopravě	21
2.2.2	Řízení adheze	22
2.2.3	Redukce hluku	26
2.2.4	Redukce laterálních sil	27
2.2.5	Maziva pro temeno kolejnice a jejich vliv na vznik prachových částic	29
2.3	Složení maziv pro temeno kolejnice	30
2.3.1	Olejová báze	31
2.3.2	Tuhá maziva	32
2.3.3	Částice pro modifikaci tření	33
<b>3</b>	<b>ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE</b>	<b>36</b>
3.1	Analýza problému	36
3.2	Analýza a zhodnocení řešerše	36
3.3	Cíl práce	37
<b>4</b>	<b>MATERIÁL A METODY</b>	<b>39</b>
4.1	Postup při vývoji maziva	39
4.2	Materiály použité pro vývoj maziva	40
4.3	Měřicí zařízení	40
4.3.1	Mini traction machine	41
4.3.2	Bruker ContourGT-X	42
4.4	Metodika měření	42
4.4.1	Práce s kontaktními tělesy	42
4.4.2	Parametry experimentu	44
4.4.3	Adhezní testy samostatných látek	45
4.4.4	Adhezní testy kompozic	45

4.4.5	Testy opotřebení	47
4.4.6	Reprofilace povrchu disku	48
<b>5</b>	<b>VÝSLEDKY</b>	<b>49</b>
5.1	Vývoj topografie povrchu kontaktních těles	49
5.2	Měření samostatných složek	52
5.3	Měření částic v mazivu	53
5.4	Vliv typu a množství částic v mazivu na adhezi	57
5.5	Návrh složení nového maziva	59
5.6	Komparační testy	63
<b>6</b>	<b>DISKUZE</b>	<b>68</b>
6.1	Srovnání s komerčními produkty	68
6.2	Vliv složek maziva na adhezi	71
6.3	Limity studie	72
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>75</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>76</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN</b>	<b>79</b>
9.1	Seznam použitých zkratk	79
9.2	Seznam fyzikálních veličin	79
<b>10</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>80</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>83</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>84</b>
	<b>PŘÍLOHA 1</b>	<b>85</b>
	<b>PŘÍLOHA 2</b>	<b>90</b>

# 1 ÚVOD

Vlaky a tramvaje se řadí mezi energeticky šetrné dopravní prostředky, které nabývají na významu zejména v dnešní době ekologických trendů, kdy je kladen důraz na snižování emisí a uhlíkové stopy. Klíčovým aspektem ovlivňujícím energetickou účinnost kolejové dopravy je tření, zejména to mezi kolem a kolejnici. Mělo by být natolik nízké, aby docházelo k minimálním energetickým ztrátám, ale zároveň alespoň tak vysoké, aby nebyla ohrožena bezpečnost provozu. Je proto na místě hledat způsoby, kterými je možné tření v kontaktu kola a kolejnice řídit. Dlouhou dobu se používaly pouze dva způsoby úpravy tření na železnicích, a to pískování a mazání pojezdové hrany kolejnice a okolku kola. Tyto metody mají však pouze specifické využití a nelze jimi řešit vysoké tření na temeni kolejnice a všechny negativní jevy, které se k němu vážou.

V současné době se tak pozornost inženýrů upíná k mazivům pro temeno kolejnice, která patří do skupiny tzv. „top of rail produktů“. Jedná se o látky, které jsou svými vlastnostmi schopny upravit tření na vhodnou provozní úroveň. Tření na temeni kolejnice je za běžných provozních podmínek natolik vysoké, že způsobuje opotřebení obou třecích členů a také snižuje energetickou účinnost kolejové dopravy. Mnohé výzkumy ukázaly, že aplikací maziva na povrch kolejnice je možné navodit žádoucí třecí podmínky, a díky tomu prodloužit životnost obou třecích členů. Obyvatelé domů v blízkosti tratě pak zejména ocení snížení nepříjemného kvílivého hluku, který vzniká při průjezdu vozidla traťovým obloukem.

Cílem této diplomové práce je na základě měření a experimentů vyvinout nové mazivo pro temeno kolejnice, které by zajišťovalo třecí podmínky vhodné pro provoz kolejového vozidla. Úkolem práce je rovněž analyzovat složky maziva pro temeno kolejnice a vyšetřit jejich vliv na dosahovaný součinitel adheze.

## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

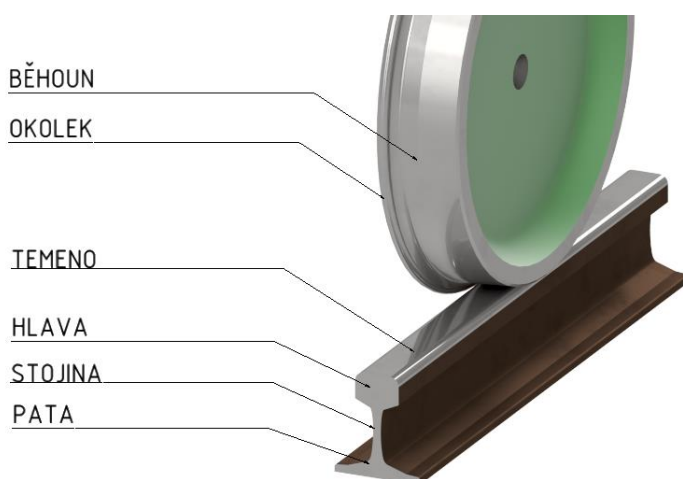
Druhá kapitola diplomové práce je rozdělena na tři části. V první části jsou shrnuty základní poznatky o systému kolo – kolejnice z pohledu klasické mechaniky a tribologie. Je zde objasněna problematika tření, adheze, opotřebení a dalších jevů, se kterými je nutno při provozu kolejového vozidla počítat. Druhá část kapitoly se zaměřuje na maziva pro temeno kolejnice a benefity plynoucí z jejich užívání. Poslední část kapitoly nabídne rozbor látek nezbytných pro návrh složení maziva pro temeno kolejnice.

### 2.1 Kontakt kola a kolejnice

Problematika kontaktu kola a kolejnice je velmi široká a zahrnuje znalosti z řady vědních oborů a disciplín. Složitost problému je umocněna skutečností, že se jedná o otevřený tribologický systém, který je ovlivněn řadou vnějších činitelů, například přítomností částic třetích těles a kontaminantů, jako je voda nebo spadané listí. Kontaktní podmínky se proto mohou lišit nejenom v různých úsecích tratě, ale i mezi koly jediného vagónu [1]. Analogický problém by se v oblasti mechanických kontaktů hledal jen stěží.

#### 2.1.1 Kolo a kolejnice

Pro lepší porozumění budou nejprve definovány základní pojmy systému kolo – kolejnice. Z obr. 2-1 je patrné, že kolejnice sestává z temena, hlavy, stojiny a paty. Z tribologického hlediska jsou významnými částmi kola okolek a běhoun. Diplomová práce se zabývá ději, které se odehrávají **v kontaktu mezi běhounem a temenem kolejnice.**



obr. 2-1 Významné části dvojice kolo – kolejnice a jejich pojmenování.

Materiál kola a kolejnice je volen s ohledem na míru opotřebení povrchů obou třecích členů. Materiálovou vlastností s přímým vlivem na opotřebení je tvrdost. Obecně platí, že je vhodné použít materiál s vyšší tvrdostí pro kolejnici, aby docházelo k většímu opotřebení kola. Kolo je totiž snáze vyměnitelné. V Evropě se jedná převážně o perlitické oceli, zejména R260. Typickou ocelí pro výrobu kola je ER7 nebo ER8 [2]. V České republice, stejně tak jako například ve Spojeném království, však mají železnice a vlaky různého zřizovatele, a proto může být vzájemná koordinace materiálových vlastností kolejí a kol problémem.

## 2.1.2 Tření, trakce, adheze

Pojem **tření** obecně vyjadřuje odpor proti relativnímu pohybu dvou povrchů, které jsou spolu v kontaktu. V závislosti na situaci se jedná o žádoucí (brzdy) či nežádoucí (kluzná ložiska) jev. Na tření má vliv materiál a topografie povrchů, přítláčná síla a přítomnost nečistot [1]. Lze ho rozdělit do třech kategorií dle mechanismu vzniku: (1) tření vlivem deformace povrchových nerovností, (2) tření vlivem adheze a (3) tření vlivem abraze [3]. Míru tření popisuje součinitel tření  $f$ , který je dán podílem:

$$f = \frac{F_T}{F_N} \quad 2.1$$

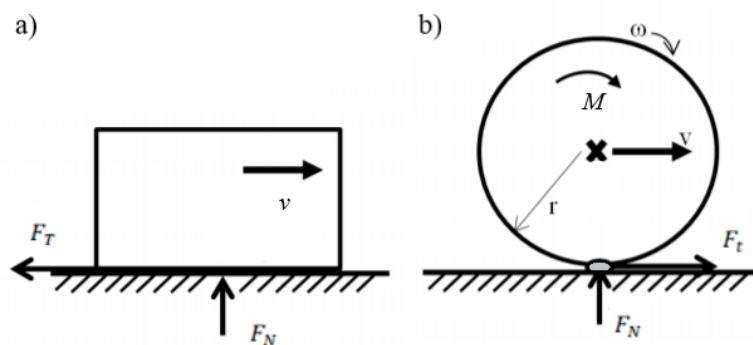
Kde:

- $f$  (-) součinitel tření
- $F_T$  (N) třecí síla
- $F_N$  (N) normálová síla

Jedná se o bezrozměrnou veličinu, která vždy popisuje dvojici těles, jež jsou spolu ve vzájemném kontaktu. Například pro dvojici ocel–ocel je  $f$  přibližně rovno 0,8 (uvedená hodnota platí pro statické tření) [4]. **Třecí a trakční síla** jsou pojmy velmi blízké, obecně lze říct, že třecí síla je spojována s negativními důsledky tření, zatímco přenos trakční síly je žádoucí a pro kolejovou dopravu nezbytný: díky trakční síle se lokomotiva pohybuje po kolejnici, naproti tomu vlivem třecí síly dochází k energetickým ztrátám v kontaktu kolejnice a okolku.

**Adheze** je v tribologii označení pro jev, během kterého dochází ke vzniku mikrosvarů typicky mezi povrchy kovových těles, která jsou spolu v kontaktu. Kovy totiž obsahují elektrony, které se mohou volně přemísťovat a za určitých podmínek (např. při absenci oxidové vrstvy na površích neušlechtilých kovů, za zvýšené teploty a tlaku) i pronikat do druhého tělesa. Vznikají spoje, jejichž porušováním dochází k poškození obou těles. Jedná se o běžný jev v kontaktu kola a kolejnice, který je označován jako **adhezní opotřebení**. V oblasti kolejové dopravy má však adheze ještě poněkud jiný význam – dá se

zjednodušeně chápat jako tření mezi kolem a kolejnicí. Rozdíl mezi třením (a) a adhezí (b) je patrný z obr. 2-2. V prvním případě (a) dochází k translačnímu pohybu tělesa tvaru kvádrů a obě kontaktní plochy se vzájemně smýkají. Dochází k tření, které je vyjádřené třecí silou  $F_T$  působící proti relativnímu pohybu. V případě (b) se kolo odvaluje po podložce a v kontaktu dochází ke vzniku reakční tečné síly  $F_t$ :



obr. 2-2 Rozdíl mezi (a) třením a (b) adhezí – upraveno [5].

Je zřejmé, že problematiku kola a kolejnice popisuje případ (b). Mohou nastat tři situace:

- Relativní rychlost obou kontaktních povrchů je stejná a nejsou přenášeny žádné tečné síly.
- Relativní rychlost povrchu kola je vyšší než rychlost povrchu podložky (např. při rozjezdu vlaku), v tom případě označujeme přenášené tečné síly jako **trakční síly**.
- Relativní rychlost kola je nižší než rychlost podložky (např. při brzdění vlaku), potom označujeme přenášené tečné síly jako **adhezní síly**.

Místo součinitele tření  $f$  je definován **součinitel adheze**  $\mu$  vyjadřující míru přenosu tečné síly (v dalším textu bude používáno jednotné označení „*adhezní síly*“ pro trakční i adhezní síly, protože rozdíly mezi oběma pojmy z hlediska zkoumané problematiky nejsou důležité) z kola na kolejnici [6]. Platí, že:

$$\mu = \frac{F_a}{F_N} \leq f \quad 2.2$$

Kde:

- $\mu$  (-) součinitel adheze  
 $F_a$  (N) adhezní síla  
 $F_N$  (N) normálová síla

Rozdíl mezi součinitelem tření a adheze je ten, že zatímco součinitel tření  $f$  je konstanta popisující tření mezi obecnou dvojicí kontaktních povrchů, adhezní součinitel  $\mu$  je proměnná

veličina, která nabývá hodnoty v rozmezí 0 až  $f$  v závislosti na skluzu. Udržování adheze v jistých mezích je pro bezpečnou a energeticky efektivní kolejovou dopravu naprosto zásadní. Příliš nízký součinitel adheze  $\mu$  totiž nejenom ztěžuje rozjezd vozidla, zároveň také prodlužuje brzdou dráhu [7]. Naproti tomu v důsledku příliš vysokého součinitele adheze dochází ke zvýšenému opotřebení kola a kolejnice [1].

### 2.1.3 Trakční křivka a bod saturace

Jak bylo uvedeno výše, při pohybu kola po kolejnici se může stát, že se relativní rychlost obou kontaktních povrchů vzájemně liší – v kontaktu dochází ke **skluzu**. To je veličina, která nabývá hodnot v intervalu 0–100 % a je dána vztahem:

$$\xi = \frac{\omega * r - v}{(\omega * r + v)} * 100 \% \quad 2.3$$

Kde:

$\xi$  (%) skluz

$\omega$  (rad/s) úhlová rychlost kola

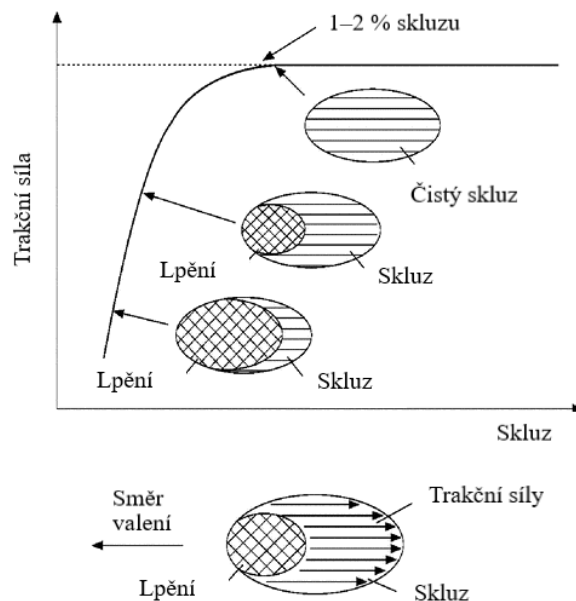
$r$  (m) poloměr kola

$v$  (m/s) rychlost kola

Při práci na experimentálních zařízeních se pro tribologická měření často používá podobná veličina označovaná jako **SRR** (*slide – roll ratio*), která nabývá hodnot 0–200 % [8]:

$$SRR = \frac{\omega * r - v}{\frac{1}{2}(\omega * r + v)} * 100 \% \quad 2.4$$

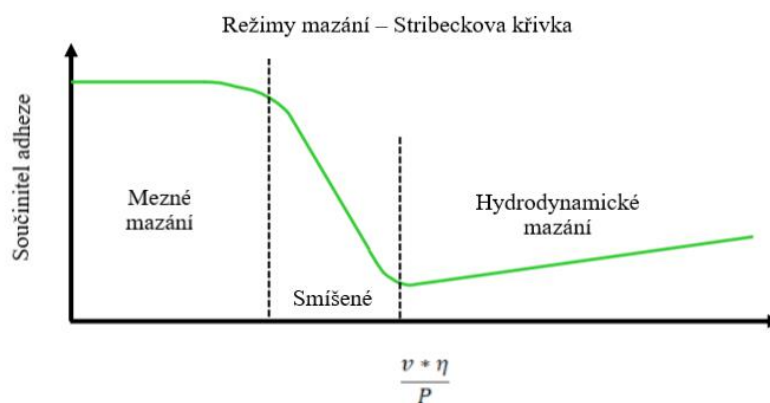
Velikost kontaktní plochy mezi kolem a kolejnicí se během jízdy mění, běžně se však pohybuje okolo 1 cm<sup>2</sup> [1]. Lze ji rozdělit na oblast **skluzu** a oblast **lpění**. V oblasti lpění nedochází k mikroskopickému prokluzu. S narůstajícím % skluzu se oblast lpění zmenšuje, a to až do tzv. **bodu saturace**, za kterým již celou kontaktní plochu tvoří pouze oblast skluzu. V tomto bodě je také součinitel adheze roven součiniteli tření a může dojít k prokluzu kola [1]. Z tohoto hlediska by bylo vhodné pohybovat se v průběhu jízdy před bodem saturace, toho však ale není možné vždy dosáhnout. Pokud součinitel adheze setrvá na stejné hodnotě i za bodem saturace, hovoříme o **neutrální třecí charakteristice**. Přítomnost cizích látek však může zapříčinit, že se bude součinitel adheze nadále zvyšovat i po dosažení tohoto bodu. V takovém případě se jedná o tzv. **pozitivní třecí charakteristiku** a naopak, když bude součinitel adheze po dosažení bodu saturace klesat, jedná se o **negativní třecí charakteristiku** [3]. Grafická závislost trakční síly na skluzu se nazývá **trakční křivka** (viz obr. 2-3).



obr. 2-3 Trakční křivka a znázornění oblastí lpění a skluzu – upraveno [1].

## 2.1.4 Režimy mazání

Jak již bylo řečeno, kolo a kolejnice tvoří otevřený tribologický systém. To znamená, že podmínky v kontaktu nejsou stálé a mohou se i v krátkém časovém úseku rapidně měnit. Součinitel adheze je ovlivněn nejenom přítomností vody, ale i jiných látek, jako je třeba listí nebo jílu. Ty na povrchu kolejnic tvoří vrstvu, která funguje jako mazací film a ovlivňuje nejenom adhezi, ale i opotřebení třecích členů [6]. Režim mazání se odvíjí nejenom od typu a množství přítomných kontaminantů, ale také od velikosti povrchových nerovností třecích členů. Lze ho stanovit na základě **Stribeckovy křivky**:



obr. 2-4 Stribeckova křivka s vyznačenými režimy mazání – upraveno [9].

V oblasti **hydrodynamického mazání (HD)** jsou třecí povrchy vzájemně odděleny tlustým mazacím filmem a nedochází k jejich vzájemnému styku. Díky tomu je tření a opotřebení

sníženo na minimum. Podskupinou hydrodynamického mazání je **elastohydrodynamické mazání (EHD)**, při kterém dochází k významným elastickým deformacím obou třecích povrchů. Oba režimy mazání se běžně vyskytují u kluzných (HD) resp. valivých (EHD) ložisek, v kontaktu kola a kolejnice jsou však spíše nepravděpodobné.

**Smíšené mazání** tvoří přechod mezi hydrodynamickým a mezním režimem. S klesajícím množstvím maziva se třecí povrchy k sobě přibližují a dochází k **meznému mazání**. Tloušťka mazacího filmu je pouze několik molekul a může docházet k přímému kontaktu třecích povrchů [10]. S těmito režimy mazání se v oblasti kolejové dopravy setkáváme nejčastěji [3]. Znalost režimů mazání je důležitá pro pochopení problematiky modifikace tření.

### 2.1.5 Opotřebení a hluk

Zvýšené opotřebení kola a kolejnice vede k častějším servisním výměnám, proto je snaha ho snížit na minimum. Opotřebení třecích povrchů může být způsobeno kontaminací tvrdými abrazivními částicemi, které se v kontaktu vyskytují přirozeně vlivem enviromentální kontaminace, nebo jsou aplikovány záměrně – například během pískování. **Abrazivní částice** jsou vtlačeny do měkčího tělesa z třecí dvojice (kola) a následně rýhují těleso tvrdší (kolejnici), viz obr. 2-5:



obr. 2-5 Poškození vzniklé v důsledku přítomnosti abrazivních částic písku [11].

Druhým mechanismem opotřebení je **oxidace povrchů** vlivem přítomnosti atmosférického kyslíku, v důsledku čehož vznikají železné oxidy a rez. Zatížení kontaktu hmotností vozidla vede k vysokému tření, což má za následek nárůst teploty. Ta urychluje oxidaci a dále také způsobuje **termální opotřebení** [12].

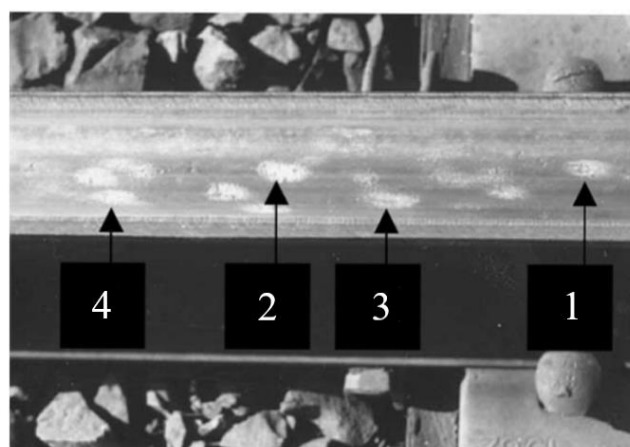
Mezi důležité mechanismy opotřebení patří také **kontaktní únava**. Každý přejezd kola představuje jeden cyklus. Při valení se maximální napětí nachází pod povrchem v objemu materiálu. Působením adhezní síly se však místo maximálního napětí posouvá blíže k povrchu. Tam se nachází méně okolního materiálu než ve zbytku objemu tělesa, takže dochází k menší disipaci napětí, a tím pádem k větší plastické deformaci. **Kumulace plastických deformací vede k opotřebení a může vyústit ve vznik únavové trhliny** [12].

**Vlnkovité opotřebení** je jev, ke kterému dochází typicky na temeni vnitřní kolejnice v obloucích s nízkým poloměrem a projevuje se zvlněním povrchu kolejnice, viz. obr. 2-6. Tyto vlny se obvykle pohybují v rozmezí 8–30 cm (vzdálenost vrcholů) a mohou dosahovat hloubky až 1,2 mm [13]. Mechanismus vzniku vlnkovitého opotřebení je následující: při průjezdu vozidla traťovým obloukem se každé z kol pohybuje po kolejnici o jiném poloměru zakřivení. Protože jsou však obě kola pevně uložena na jedné ose, musí se nutně pohybovat stejnou úhlovou rychlostí, kolo na vnější kolejnici však musí oproti kolu na vnitřním poloměru urazit větší dráhu. To zapříčiňuje prokluz kola na vnitřní kolejnici a iniciuje vznik vlnkovitého opotřebení. Při průjezdu vozidla po takto poškozené kolejnici je pak kolu udělováno vertikální zrychlení, které způsobuje vibrace celé nápravy. Řešením tohoto problému je nejenom broušení povrchu kolejnice, ale i modifikace tření.



obr. 2-6 Vlnkovité opotřebení – upraveno [13].

Při průjezdu vozidla traťovým obloukem dochází ke kontaktu okolku s pojezdovou hranou kolejnice. Vzniká tření, které způsobuje **kvílivý hluk**. Dobře ho znají obyvatelé domů v blízkosti tramvajových točen, kde nezdědky dochází k překračování hygienických hlukových limitů.



obr. 2-7 Poškození kolejnice vzniklé v důsledku oscilací v blízkosti bodu saturace – upraveno [14].

Druhý mechanismus vzniku hluku souvisí se sklonem trakční křivky za bodem saturace. Již dříve bylo vysvětleno, že rozeznáváme tři druhy třecích charakteristik: (1) pozitivní, (2) negativní a (3) neutrální. Pokud součinitel adheze po dosažení bodu saturace klesá, hovoříme o negativní třecí charakteristice. Jedná se o jev, při kterém jedné hodnotě součinitele adheze odpovídají dvě různé hodnoty skluzu. To zapříčiňuje **vznik oscilací**, které dále mohou iniciovat vibrace způsobující hluk a opotřebení, viz. obr 2-7 [14].

## 2.2 Modifikace tření mazivy pro temeno kolejnice

Předchozí text popisoval problémy spojené se třením, se kterými je nutno v oblasti kolejové dopravy počítat. Následující část kapitoly pojednává o způsobech modifikace tření se zaměřením na maziva pro temeno kolejnice, která jsou hlavním tématem této diplomové práce. Vhodnou úpravou tření je možné snižovat hluk a opotřebení, provozní náklady a v neposlední řadě také zvyšovat energetickou účinnost kolejové dopravy.

### 2.2.1 Adheze v kolejové dopravě

Adheze vyjadřována pomocí součinitele adheze je jedním z nejdůležitějších parametrů popisujících kontakt kola a kolejnice. Obecně platí, že by tření v kontaktu kola a kolejnice mělo být natolik nízké, aby nedocházelo k příliš vysokým energetickým ztrátám a k opotřebení třecích ploch při současném zachování adheze nezbytné pro přenos tečných sil spojovaných s rozjezdem a brzděním vozidla. Optimální hodnota součinitele adheze se odvíjí od % skluzu v kontaktu. Obecně se rozlišují následující kategorie [15]:

- 1) Vysoká adheze pro  $\mu > 0,4$
- 2) Optimální adheze pro  $\mu$  mezi 0,2–0,4
- 3) Nízká adheze pro  $\mu$  mezi 0,2–0,15
- 4) Velmi nízká adheze pro  $\mu < 0,15$

Hodnoty se vztahují ke skutečnému kontaktu kola a kolejnice, pro laboratorní zařízení s modelovým zkreslením se budou lišit. **Nízká adheze** může nastat, dostanou-li se do kontaktu částice třetích těles v takovém množství, že utvoří mazací film. Konvenční metodou používanou k překonání tohoto problému je **pískování**. Písek je pískovací jednotkou vpravován pod kola jedoucí lokomotivy a svými abrazivními účinky odstraňuje nečistoty pryč z povrchu kolejníc. O obnově adheze pískováním při různých procesních parametrech je pojednáno např. v [11]. Pískování s sebou však přináší řadu problémů. Písek působí jako elektrický izolant, a tak může způsobit problémy při traťové detekci vlaku [16]. Ta se používá k určení polohy vlaku a na základě toho jsou pak nastavovány automatizované výhybky a semaforey. Tvrdé částice písku kromě vrstvy kontaminantů rýhují i materiál kola a kolejnice, v důsledku čehož dochází k opotřebení jejich povrchů, a tedy k častějším

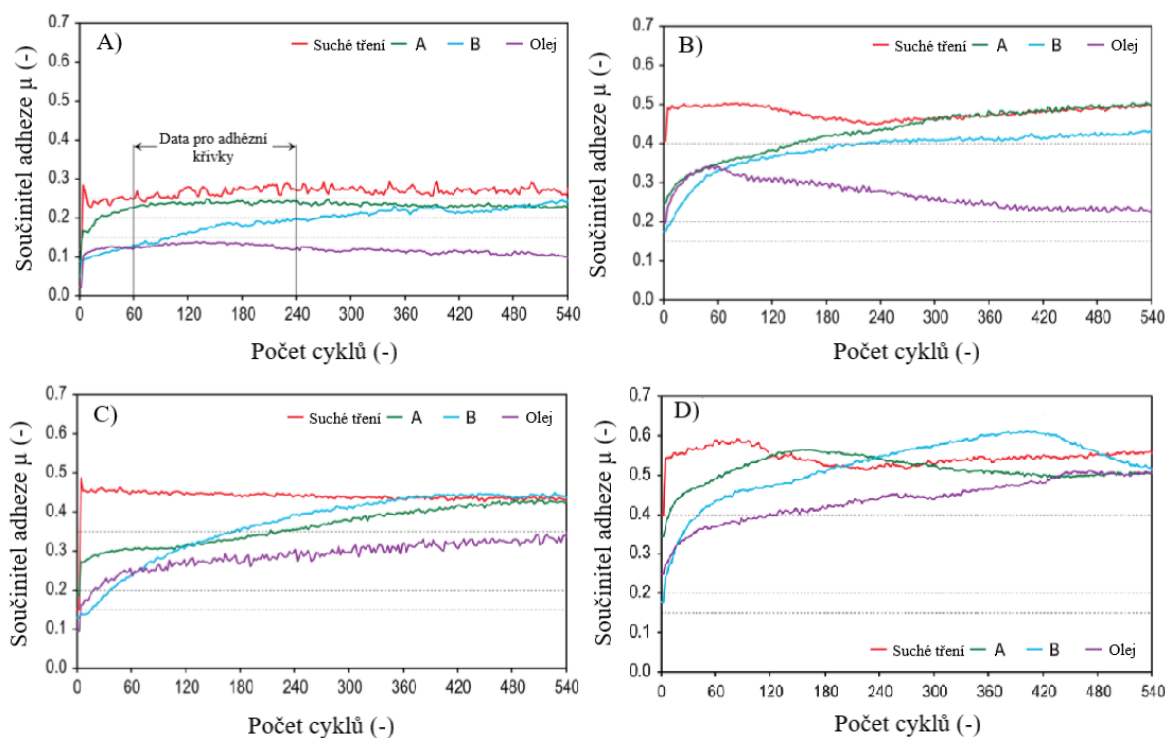
servisním výměnám [17]. Alternativou k pískování jsou tzv. **trakční gely**. Jedná se o směsi abrazivních částic (např. oxidů hliníku) s částicemi o nižší tvrdosti (např. oxid titaničitý). Jejich podrobné složení a účinky na adhezi a opotřebení popisují patenty [18, 19].

Naopak při podmínkách suchého tření se součinitel adheze pohybuje v intervalu **vysoké adheze**, což s sebou přináší řadu problémů – například zvýšenou míru opotřebení obou třecích povrchů. Z tohoto důvodu byly vyvinuty tzv. „**TOR produkty**“ (z anglického „*top of rail*“ – temeno kolejnice). Mezi nejvýznamnější patří **modifikátory tření** (z anglického „*friction modifiers*“) a **TOR maziva**, která však budou dále v této práci označována českým názvem **maziva pro temeno kolejnice** (nebo jen „maziva“). Jedná se o tekuté či polotekuté směsi obsahující základovou bázi (olej, vodu) a částice modifikující tření. Hlavním rozdílem mezi oběma produkty je to, že zatímco modifikátory tření po aplikaci vysychají (vodní báze), maziva pro temeno kolejnice zůstávají polotekutá (olejová báze), a díky tomu mohou být roznesena koly vozidla na delší vzdálenost.

## 2.2.2 Řízení adheze

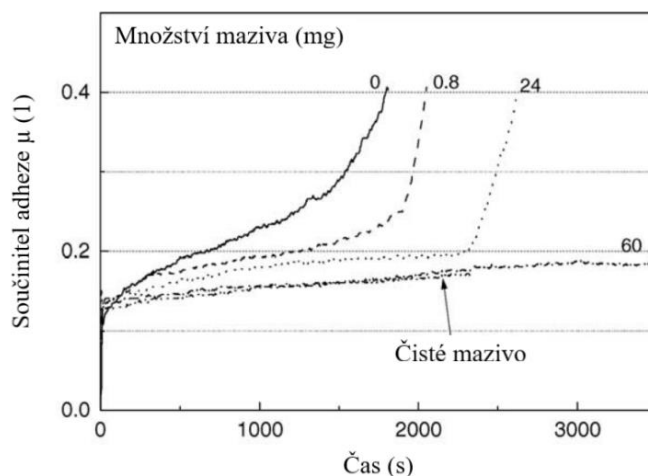
Pod pojmem **řízení adheze** rozumíme cílenou úpravu součinitele adheze do intervalu hodnot mezi 0,15–0,4 (reálný kontakt). Předtím, než mohla být maziva pro temeno kolejnice uvedena do ostrého provozu vlakových a tramvajových linek, bylo potřeba provést řadu laboratorních experimentů, které by potvrdily jejich schopnost účinně optimalizovat součinitel adheze. Výzkumem těchto maziv se již v minulosti zabývala skupina kolejové dopravy odboru tribologie na VUT v Brně. Studie [15] popisuje měření adheze v laboratorních podmínkách. Byl zkoumán vliv dvou různých maziv označovaných jako maziva „A“ a „B“. Mazivo A obsahovalo částice mědi a zinku, mazivo B směs částic mědi a hliníku. Velikost částic byla 4–10  $\mu\text{m}$ . Podrobnější složení nebylo uvedeno. Měření probíhalo na zařízení MTM (*Mini traction machine*). Třecími členy v tomto případě byl disk o průměru 46 mm a kulička o průměru 19,05 mm. Pro měření byl vyvozen kontaktní tlak 750 MPa a k aplikaci maziva byla použita mikropipeta. Výsledky třecích testů pro 1%, 3%, 5% a 10% skluz jsou zaznamenány v grafech na obr. 2-8. Pro srovnání byly naměřeny hodnoty součinitele adheze pro suché tření a pro kontakt zaplavený olejem.

Ihned po aplikaci maziva docházelo k propadu součinitele adheze do nízkých hodnot, postupem času však součinitel adheze vystoupal do optimálního rozmezí. O tom, jak dlouho v něm setrvává, rozhoduje kromě složení maziv i % skluzu. Z obr. 2-8 je vidět, že čím vyšší je skluz, tím kratší je doba účinku maziva na adhezi. S vyšším % skluzu je totiž rychleji odstraňován mazací film. Autor práce dále identifikoval, že pokud je maziva menší množství, převládá vliv částic obsažených v mazivu a směs má tendenci zvyšovat přenos adhezních sil, při větším množství maziva naopak začne převládat vliv základového oleje a směs má tendenci „více mazat“ [15, 20]. Z měření lze dále vyvodit intuitivní závěr, že vyšší množství maziva pro temeno kolejnice vede k delšímu mazacímu účinku.



obr. 2-8 Časové testy pro různé procento skluzu: A) 1 %, B) 5 %, C) 3 %, D) 10 % – upraveno [15].

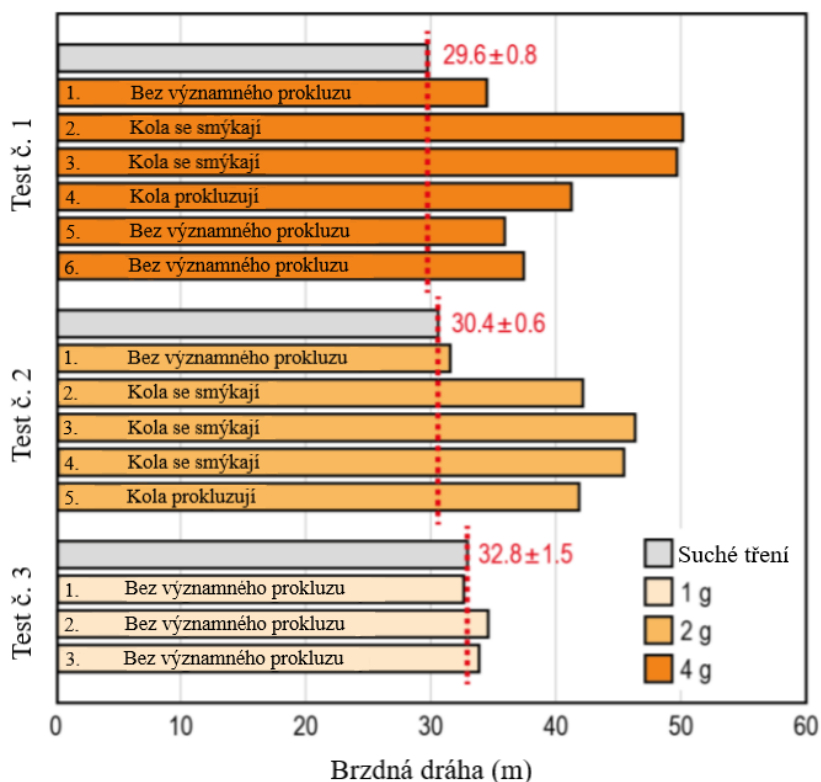
Článek [21] popisuje, jakým způsobem ovlivní účinky modifikátoru tření na vodní bázi příměs plastického maziva. Měření probíhalo na dvoudiskovém zařízení za 3% skluzu. Oba disky byly vyrobeny z reálných železničních materiálů a jejich průměry byly 48 mm a 45 mm. Pro adhezní testy byl použit vodní modifikátor tření KELTRACK® a plastické mazivo s příměsí disulfidu molybdenu a grafitu. Experiment probíhal následovně: nejprve byl na povrch horního disku nanesen modifikátor tření v množství 2–3 mg. Mazivo bylo nanášeno štětcem na povrch spodního disku v množství 0–60 mg. Pro srovnání byly také provedeny testy čistě jen s mazivem či modifikátorem tření. Výsledky měření součinitele adheze jsou zachyceny v grafu na obr. 2-9:



obr. 2-9 Vliv příměsi plastického maziva v modifikátoru tření na adhezi – upraveno [21].

Samotné mazivo vedlo k poměrně stabilnímu součiniteli adheze, který se ustálil okolo hodnoty 0,17. Při měření modifikátoru tření docházelo v prvních 100 s k prudkému nárůstu součinitele adheze, ten se však následně stabilizoval a dalších cca 1000 s se pohyboval v intervalu požadovaných hodnot. Nakonec však došlo k porušení mazacího filmu a součinitel adheze vystoupal na hodnotu 0,4, kde byl experiment ukončen. Následně byly testovány směsi modifikátoru tření s 0,8; 24 a 60 mg maziva. Z adhezních křivek je zřejmé, že příměs plastického maziva v modifikátoru tření prodlužuje dobu setrvání součinitele adheze v intervalu optimálních hodnot.

Kromě laboratorních měření byly adhezní účinky maziv testovány i v podmínkách reálného tramvajového provozu. Článek [20] dokumentuje měření brzdné dráhy tramvají po aplikaci maziva na povrch kolejnice. Pro měření byl vybrán traťový oblouk o poloměru 200 m. Na kolejnicích byl instalován stacionární systém pro aplikaci maziva. Jako částice pro modifikaci tření byly do maziva přimíchány částice mědi a zinku s velikostí 4–10 µm. Proběhly dva typy testů: (1) test brzdné dráhy a (2) test distribuce maziva. Výsledky měření jsou patrné z obr. 2-10:

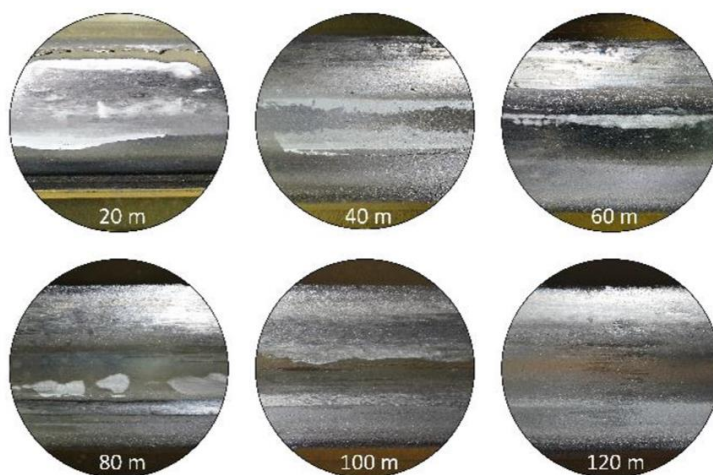


obr. 2-10 Vliv množství TOR maziva na brzdou dráhu tramvaje – upraveno [20].

Při prvním testu byl zkoumán vliv maziva na brzdou dráhu tramvaje. Tramvaj brzdila z rychlosti 40 km/h, která je typická pro městskou hromadnou dopravu, a bylo očekáváno prodloužení brzdé dráhy v důsledku přítomnosti oleje. Mazivo bylo dávkováno v množství 4, 2 a 1 g/kolejnice [20]. Nejdelší brzdá dráha nastala v případě, kdy byly na kolejnici aplikovány 4 g maziva. Pouze nepatrný nárůst byl zaznamenán po aplikaci 1 g. Je zajímavé,

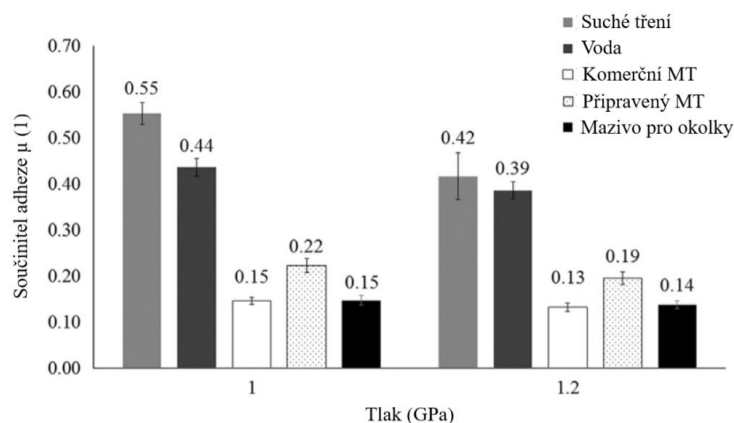
že problémy s brzděním nastaly až u druhého a třetího přejezdu tramvaje, nikoliv u prvního. V nejhorším případě došlo k prodloužení brzdné dráhy o dvacet metrů, což by mohlo mít v ostrém provozu fatální následky. Kola se začala smýkat, což znamená, že se tramvaj stala neovladatelnou. Výsledky tohoto experimentu naznačují, že existuje hraniční dávka maziva, po jejímž překročení již riziko nebezpečí pro pasažéry převáží benefity plynoucí z nízkého tření mezi kolem a kolejnici.

Druhý typ testu se zabýval vzdáleností, na kterou je kolejové vozidlo schopno mazivo roznést a na které má ještě prokazatelné účinky. Podle měření [20] se dráha, na kterou může být mazivo koly tramvaje rozneseno, pohybuje v řádu desítek až stovek metrů. Jak ukazuje obr. 2-11, mazivo bylo viditelné lidským okem přibližně do vzdálenosti 100 m od místa aplikace. Oblast, na které má mazivo požadované účinky, je však zpravidla menší. Pro aplikaci maziva na povrch kolejnice může být použita buď stacionární jednotka nacházející se v blízkosti tratě, nebo tzv. „on board“ jednotka nainstalovaná přímo ve vozidle.



obr. 2-11 Úseky trati v různé vzdálenosti od aplikační jednotky – upraveno [20].

Areiza a kol. provedli traťové měření součinitele adheze pomocí ručního tribometru, jehož parametry jsou specifikovány v [21]. Experiment probíhal na traťovém oblouku o poloměru 90 m, relativní vzdušná vlhkost se pohybovala v rozmezí 40–60 % a teplota vzduchu byla 15–25 °C. Byly zkoumány následující scénáře: suché tření, kontaminace vodou, komerční modifikátor tření na vodní bázi, modifikátor tření na vodní bázi připravený autory článku a mazivo pro mazání okolků. Dávkování produktů bylo v souladu s doporučením výrobce v rozmezí 1–3 ml/m a experimenty byly provedeny za dvou různých kontaktních tlaků: 1 GPa a 1,2 GPa. Graf na obr. 2-12 znázorňuje průměrné hodnoty součinitelů adheze a jejich směrodatné odchylky získané z 20 měření. Průměrný součinitel adheze se pohyboval mezi 0,42–0,55 pro suché tření a mezi 0,39–0,44 pro kolejnice kontaminované vodou v závislosti na vyvozeném kontaktním tlaku. Všechny testované produkty dosahovaly více než dvojnásobné redukce adheze oproti hodnotám suchého tření.

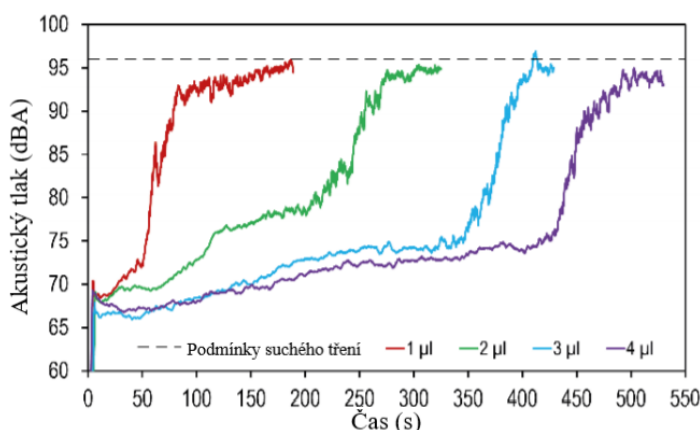


obr. 2-12 Průměrný součinitel adheze dosahovaný za různých podmínek – upraveno [21].

Z pohledu redukce součinitele adheze oproti hodnotám suchého tření si nejlépe počínal komerční modifikátor tření s průměrnými součiniteli adheze 0,15 a 0,13 pro kontaktní tlaky 1 GPa resp. 1,2 GPa. Mazivo pro mazání železničních okolků si vedlo podobně a nejmenší redukce adheze bylo dosaženo pomocí připraveného modifikátoru tření.

### 2.2.3 Redukce hluku

Již dříve bylo uvedeno, že jedním z problémů, se kterými se městská hromadná kolejová doprava potýká, je **hluk**. Příčiny vzniku kvilivého hluku souvisí se vznikem oscilací způsobených negativní třecí charakteristikou a jsou blíže popsány v [14]. Jednou z funkcí částic obsažených v mazivech pro temeno kolejnice je proměna negativní/neutrální třecí charakteristiky v pozitivní. Díky tomu nalézají tato maziva využití nejenom jako prostředek k optimalizaci adheze, ale také jako účinné řešení problému vysokého hluku městské hromadné dopravy.

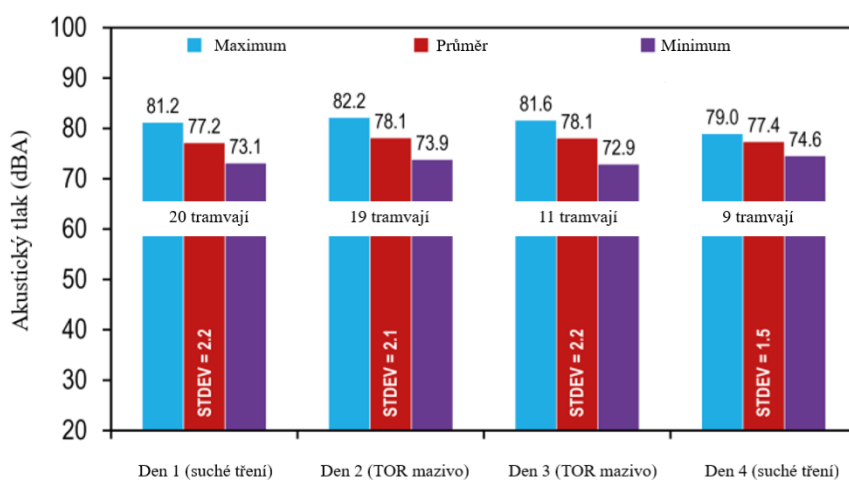


obr. 2-13 Vliv TOR maziva na akustický tlak, laboratorní podmínky – upraveno [20].

Účinky maziv pro temeno kolejnice v souvislosti s redukcí hluku se zabývá práce [20]. Měření probíhalo jak v terénu, tak v laboratorních podmínkách. Pro simulaci jízdy bylo

v laboratoři použito dvoudiskové zařízení. Průměr obou disků byl 40 mm a oba byly vyrobeny z ložiskové oceli 100CrMn6 s tvrdostí 60 HRC a drsností 0,4 μm. Mikrofon měřicího zařízení byl umístěn ve vzdálenosti 50 cm od kontaktu obou disků. Z výsledků laboratorního měření, které jsou vidět v grafu na obr. 2-13, lze vyvodit, že po aplikaci maziva došlo k redukci hluku vyjádřeného akustickým tlakem až o 30 dBA a také to, že doba účinku je výrazně závislá na aplikovaném množství maziva.

Při terénním měření byl mikrofon umístěn ve vzdálenosti 7,5 m od středu tratě a ve výšce 1,2 m nad zemí. Vzhledem k výsledkům předešlých měření byla aplikována dávka 1 g/kolejnice, při větších dávkách totiž docházelo k nebezpečnému prodloužení brzdné dráhy tramvaje [20]. Výsledky měření jsou v grafu na obr. 2-14:



obr. 2-14 Vliv TOR maziva na akustický tlak, terénní měření – upraveno [20].

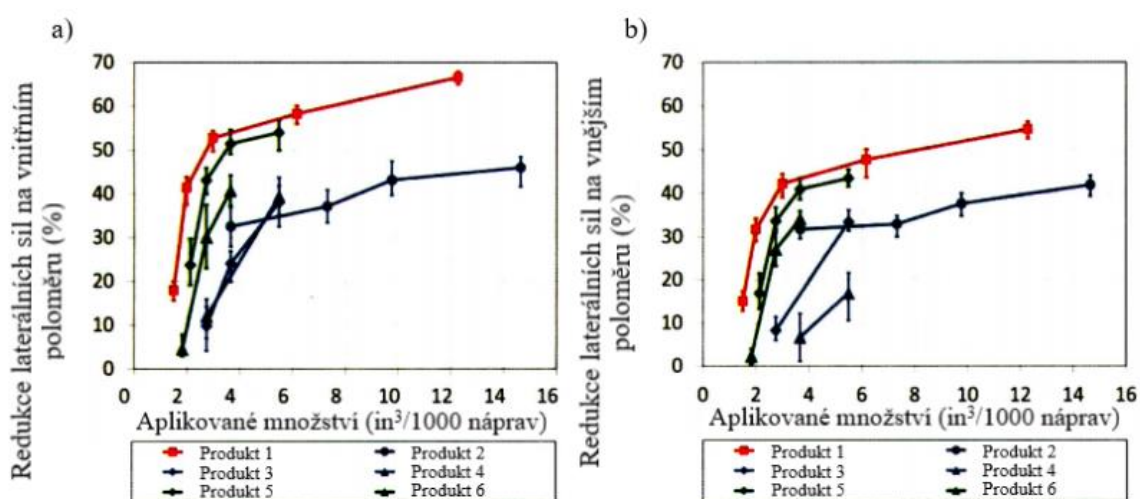
V kontrastu s laboratorními testy lze říct, že při dávkování 1 g/kolejnice nebyl zaznamenán žádný viditelný účinek na redukci hluku. Výraznějšího snížení hluku by bylo pravděpodobně dosaženo aplikací větší dávky maziva, což by však mohlo prodloužit brzdovou dráhu kolejového vozidla. Zdá se, že požadavky na redukci hluku a bezpečnou jízdu jdou vzájemně proti sobě, a tak je důležité kromě samotného složení maziva stanovit i jeho vhodné aplikované množství.

## 2.2.4 Redukce laterálních sil

Při pohybu vozidla po zakřivené trajektorii nastává situace, při které musí kolo na vnějším poloměru zakřivení urazit delší dráhu než kolo na poloměru vnitřním. V automobilech je tento problém řešený pomocí diferenciálu, který umožňuje oběma kolům pohyb nezávisle na sobě. V případě kolejových vozidel jsou však obě kola uložena na jedné ose, rozdíl v rychlostech obou kol je tak vyrovnáván pomocí jejich konického tvaru. Při průjezdu vozidla traťovým obloukem dochází ke skluzu kol po kolejnici ve směru normály na tečnu oblouku, což zapříčiňuje vznik **laterálních sil**. Ty se mohou pohybovat v závislosti

na naložení vagonů v desítkách až stovkách kN a v krajním případě mohou způsobit až vykolejení. Častěji však dochází pouze k opotřebením třecích povrchů, k únavovému poškození a ke vzniku hluku [22]. Jednou z možností redukce laterálních sil je modifikace tření pomocí vhodných TOR produktů, například pomocí maziv [1].

Společnost Transportation Technology Inc. provedla počítačovou analýzu benefitů plynoucích z redukce laterálních sil pomocí mazání temena kolejnice. Analýza probíhala na dvou různých nákladních vlcích přepravujících automobily a její závěry byly následující: o cca 14 % nižší spotřeba paliva při současném navýšení přepravovaného množství aut o 18 kusů, průměrná energetická úspora 10–20 % a redukce hluku 20–50 % [22]. Výsledky počítačové analýzy dále potvrzuje měření na reálné trati ve městě Pueblo v Coloradu [23]. Měření se odehrávalo na 2,7 mil dlouhé trati převážně v nočním provozu. Pro porovnání byly kromě maziv použity i modifikátory tření na vodní bázi – oba typy produktů byly aplikovány ze stacionární traťové jednotky, která se nacházela před traťovým obloukem. Testovací vlak byl plně naložen a čítal několik desítek vagonů.



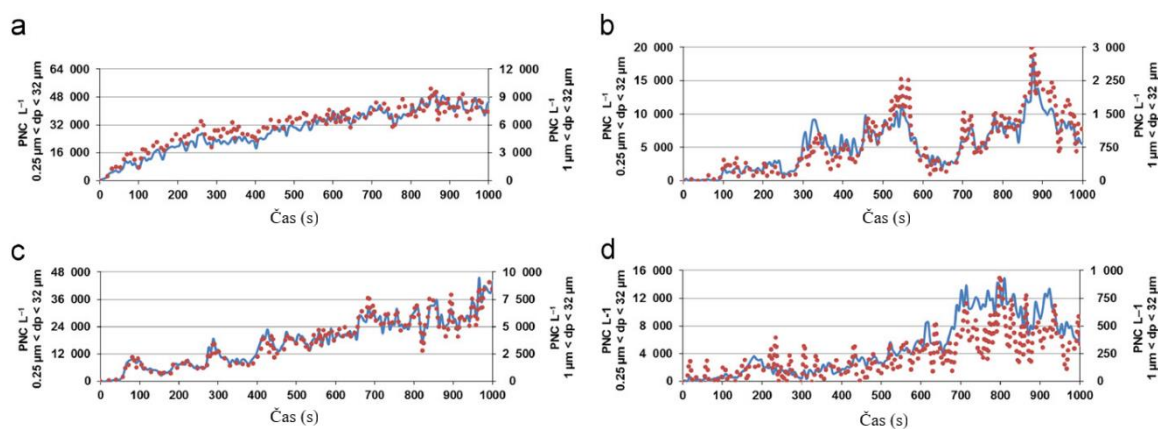
obr. 2-15 Vliv TOR maziva na redukci laterálních sil – upraveno [23].

V grafech na obr. 2-15 vidíme výsledky měření pro a) vnitřní kolejnici a b) vnější kolejnici. Výsledné snížení laterálních sil je udáváno v procentech oproti podmínkám suchého tření (bez aplikace TOR produktů). Produkty 1–4 byly blíže nespecifikované modifikátory tření na vodní bázi, produkty 5–6 byly maziva pro temeno kolejnice. Maximální redukce laterálních sil pomocí vodního modifikátoru tření byla 67 % pro vnitřní kolejnici a 55 % pro vnější. V případě maziva bylo dosaženo 54% redukce pro vnější kolejnici a 43% redukce pro vnitřní. Oproti vodním modifikátorům tření dosahovala maziva horších výsledků v redukci laterálních sil, autoři studie ovšem uvádějí, že tato skutečnost byla vyvážena déletrvajícím účinkem maziv – zatímco modifikátory tření na vodní bázi vysychají, maziva zůstávají po celou dobu v tekuté/polotekuté formě.

## 2.2.5 Maziva pro temeno kolejnice a jejich vliv na vznik prachových částic

Poslední benefit, který bude v rámci této kapitoly rozebírán, je vliv maziv pro temeno kolejnice na vznik a rozptyl prachových částic (z angl. „*airborne particles*“). Vysoký tlak a teplota v kontaktu kola a kolejnice zapříčiňují vznik prachových částic. Jedná se o částice, které se vlivem opotřebení oddělily z třecích povrchů a dále se šíří vzduchem v okolí tratě [1]. Dlouhodobé vdechování takto znečištěného vzduchu může mít za následek zdravotní problémy nejenom traťových pracovníků, ale i obyvatel žijících v blízkosti tratě [24].

Výzkum [25] ukazuje, že by možným řešením problému prachových částic mohla být právě aplikace maziva pro temeno kolejnice. Pro experimentální měření byl použit tribometr v konfiguraci pin-on-disc a vzorky zhotovené z reálných železničních materiálů – ocel R7 pro kolo a UIC 60 pro kolejnici. Pro detekci částic byla využita celkem tři zařízení umožňující detekovat částice o velikostech od několika desítek nanometrů až po stovky mikrometrů. Kontaktní tlak byl 550 MPa a relativní rychlost 0,1 m/s. Bylo porovnáváno množství vzniklých částic v (a) suchých a mazaných kontaktech. Mazané kontakty obsahovaly (b) mazivo pro temeno kolejnice na bázi rostlinného oleje, (c) modifikátor tření na vodní bázi a (d) mazivo pro železniční okolky. Výsledky měření jsou patrné z grafů na obr. 2-16:



obr. 2-16 Počet částic (PNC) uvolněných ze vzorků v průběhu experimentu – upraveno [24].

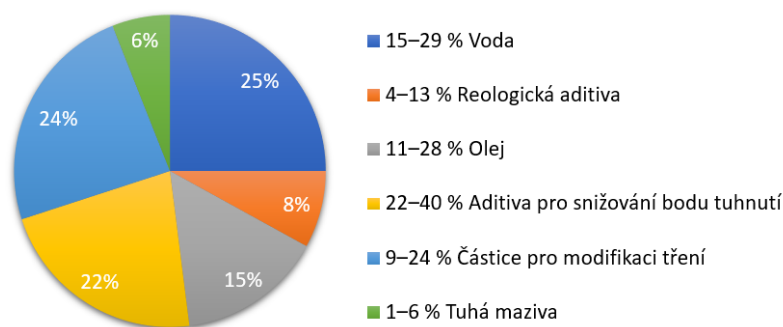
Graf a) znázorňuje generované množství částic v čase. Levá svislá osa udává počet částic o velikosti od  $0,25 \mu\text{m}$  do  $32 \mu\text{m}$  a pravá svislá osa od  $1 \mu\text{m}$  do  $32 \mu\text{m}$ . Nárůst počtu částic na litr vzduchu byl v průběhu experimentu přibližně konstantní – můžeme pozorovat téměř lineární nárůst. Grafy b), c) a d) znázorňují mazané kontakty. V případě b) maziva pro kolejnice počet nově vzniklých částic v čase kolísal, v průměru však došlo k jejich redukci o 70 %. Modifikátor tření na vodní bázi (c) vedl ke snížení počtu nově vzniklých částic přibližně o 30 % a mazivo pro okolky (d) dokonce až o 90 % [24].

Z uvedených výsledků je patrné, že modifikace tření významným způsobem redukuje množství prachových částic, a to ze dvou důvodů. Díky mazacímu filmu dochází k menšímu opotřebení třecích povrchů, a tedy vzniká méně částic. Druhý důvod je zjevný, porovnáme-li vzájemně účinky produktů na vodní a olejové bázi – účinek vodních modifikátorů tření je v porovnání s mazivy méně než poloviční. Olejové produkty totiž na rozdíl od vodních nevysychají a zůstávají tak v tekuté/polotekuté formě přítomny na povrchu třecích těles delší dobu. Svou konzistencí zachytávají vzniklé částice opotřebením, čímž jim brání přejít do okolního vzduchu.

## 2.3 Složení maziv pro temeno kolejnice

Maziva pro temeno kolejnice (slovo „mazivo“ v dalším textu odkazuje vždy na mazivo pro temeno kolejnice, není-li výslovně uvedeno jinak či nevyplývá-li z kontextu něco jiného) jsou směsi na olejové bázi, jejichž hlavním cílem je optimalizovat tření mezi povrchy kola a kolejnice. Svou funkcí jsou blízká modifikátorům tření, hlavní rozdíl spočívá ve složení báze – tu tvoří v případě modifikátorů tření voda. Přestože již na trhu několik těchto maziv existuje, dostupných informací o jejich složení je velmi málo a jediným zdrojem jsou katalogové listy ke komerčním produktům, např. [26, 27]. Ty ale kromě typu a vlastností základového oleje většinou nic dalšího neuvádí. Nicméně maziva pro temeno kolejnice by měla mít, alespoň co se obsahu částic týče, velmi podobné složení jako modifikátory tření. Potřebné informace tedy lze hledat i v patentech pro modifikátory tření.

Patent [28] popisuje hybridní směs určenou pro modifikaci tření na železnici. Produkt je sice klasifikován jako modifikátor tření, kromě vody však obsahuje i olej, a proto se řada poznatků o jeho složení dá využít i při návrhu složení maziva pro temeno kolejnice. Složení reprezentativní patentované směsi je patrné z obr. 2-17:



obr. 2-17 Složení vzorové směsi dle patentu [28].

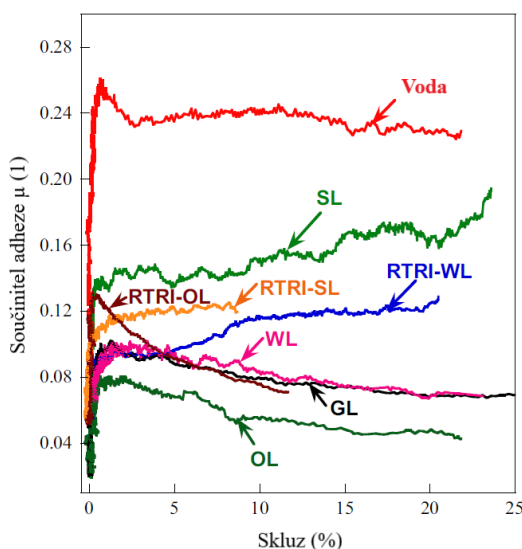
Směs obsahuje převážně vodní bázi s minoritní příměsí oleje, částice pro modifikaci tření, tuhá maziva a další aditiva. Pro návrh složení nového maziva pro temeno kolejnice lze z tohoto patentu převzít především bázi (olej), tuhá maziva a částice pro modifikaci tření,

což jsou nejdůležitější složky maziva pro temeno kolejnice. V úvahu by ještě mohla připadat aditiva pro snižování bodu tuhnutí, nicméně ta jsou do směsi zakomponována především kvůli vodě, jejíž bod tuhnutí je 0 °C. Ve směsi na olejové bázi však při uvažovaných provozních podmínkách postrádají smysl.

### 2.3.1 Olejová báze

Maziva pro temeno kolejnice podobně jako maziva pro okolky sestávají především z plastického maziva, při návrhu olejové **báze** lze tedy využít některé informace o složení maziv pro okolky. Z produktových katalogů [29, 30] lze vyčíst, že se jako základové oleje používají **syntetické estery**. Nutno však podotknout, že se maziva pro temeno kolejnice vyrábějí především v polotekuté formě jako plastická maziva, a proto je v **základovém oleji** obsaženo i **zpevňovadlo**. V [29] se jedná o **bentonit**, zpevňovadlem v [30] je **oxid křemíku**. Vysoký důraz je kladen na biodegradabilitu a šetrnost k životnímu prostředí [26].

O vlastnostech nejrůznějších lubrikantů vpravovaných do kontaktu kola a kolejnice pojednává článek [31]. Tým vedený Chen změřil pomocí dvoudiskového zařízení trakční křivky vody, oleje (OL), plastického maziva (GL), tuhých maziv (SL) a několika dalších lubrikantů/modifikátorů tření. Pro cíl diplomové práce jsou podstatné především trakční křivky oleje a plastického maziva, které lze použít v mazivu pro temeno kolejnice jako bázi, popřípadě ještě křivka tuhého maziva (článek zmiňuje grafit a disulfid molybdenu). Výsledky měření jsou patrné z grafu na obr. 2-18:



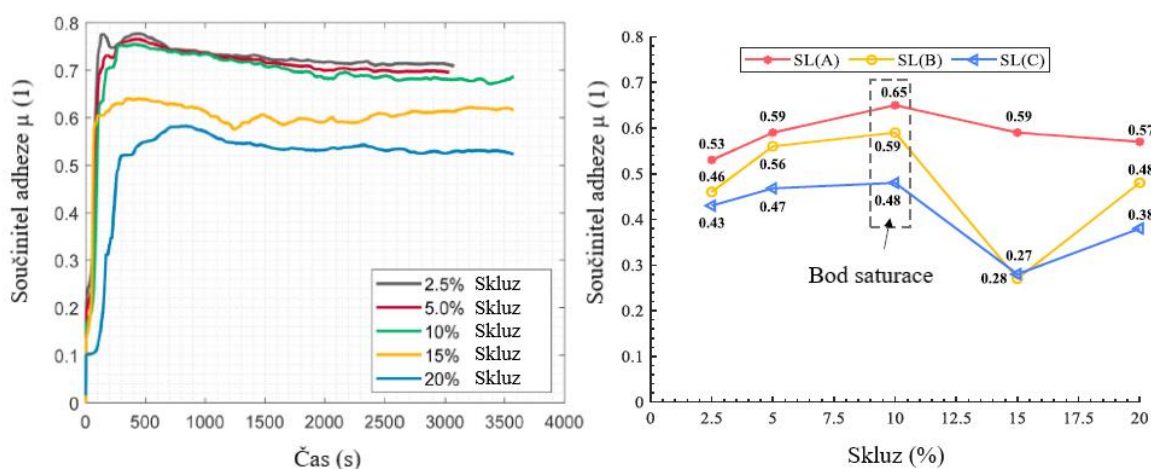
obr. 2-18 Trakční křivky různých druhů lubrikantů – upraveno [31].

Nejvyšší redukce součinitele adheze bylo dosaženo v kontaktech mazaných olejem a plastickým mazivem, naopak nejvyšší adheze bylo dosahováno v kontaktech s přítomností vody. Další podstatnou informací, kterou lze z měření získat, je že všechny tři zmiňované lubrikanty vedly k nežádoucí negativní třecí charakteristice. Tuhá maziva zajišťovala

součinitel adheze mezi vodou a olejem a na rozdíl od obou zmiňovaných také žádoucí pozitivní třecí charakteristiku. Za zmínku stojí také trojice modifikátorů tření/lubrikantů vyvinutých na Railway Technical Research Institute (RTRI). Modifikátory tření RTRI-SL a RTRI-WL vedou k přibližně neutrální třecí charakteristice a ke stabilnímu součiniteli adheze, který se však pohybuje pod hranicí 0,15; což je udáváno jako minimální hodnota nezbytná pro spolehlivé zastavení/rozjezd vozidla. RTRI-OL je označován jako tzv. „trakční olej“. Jedná se o lubrikant blíže popsáný v [32], který by měl zajišťovat dostatečné mazání kontaktu při současném udržování relativně vysokého součinitele adheze (v porovnání s jinými oleji). Toho však není dosaženo pomocí příměsí částic (jako u modifikátorů tření a maziv pro temeno kolejnice), nýbrž pomocí molekulové struktury oleje – molekuly se nemohou v zatíženém kontaktu volně pohybovat, a tím pádem jsou schopny přenést vyšší smykové zatížení. Nejvyšší součinitel adheze 0,14 dosažený pomocí tohoto oleje je však stále nedostatečný pro modifikaci tření na temeni kolejnice.

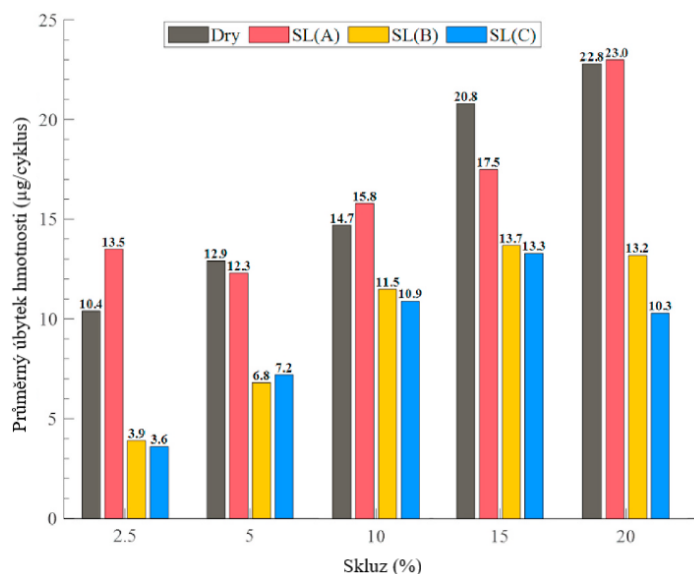
### 2.3.2 Tuhá maziva

**Tuhá maziva** se do směsi přidávají za účelem snižování tření a opotřebení. Jsou to látky s nízkou Mohsovou tvrdostí a smykovou pevností. Nejčastěji uváděným tuhým mazivem je grafit, dále se pak jedná o sulfidy kovů, jako je třeba disulfid molybdenu [33]. Komparační studii produktů založených na těchto mazivech provedl Fasihi a kol. [34]. Výzkum probíhal na dvoudiskovém zařízení a jeho předmětem bylo srovnání tří produktů z hlediska dosahovaného součinitele adheze a redukce opotřebení. Produkt SL(A) sestával dominantně z disulfidu molybdenu s příměsí grafitu a malého množství hliníku. Produkty SL(B) a SL(C) se skládaly převážně z grafitu s příměsí mědi (5–7 hm. %). Měď je známá jako měkký materiál s nízkou smykovou pevností, pro své dobré mazací účinky proto nalézá využití jako doplněk obou zmíněných produktů. V grafech na obr. 2-19 je zaznamenán účinek tuhých maziv na součinitel adheze v kontaktu:



obr. 2-19 Účinek grafitu a disulfidu molybdenu na adhezi – upraveno [34].

Graf vlevo zobrazuje referenční adhezní křivky suchého tření pro rozsah skluzů 2,5–20 %, graf vpravo trakční křivky. Z těch lze odečíst průměrný součinitel adheze mazaného kontaktu odpovídající daným skluzům. Ve všech třech případech došlo ke snížení součinitele adheze v mazaném kontaktu oproti hodnotám suchého tření, je však zřejmé, že produkty SL(B) a SL(C) sestávající dominantně z grafitu si počínaly lépe než produkt SL(A) sestávající převážně z disulfidu molybdenu. Redukce součinitele adheze produktu SL(C) byla až 54,8 % po ustálení a až 96 % bezprostředně po aplikaci maziva do kontaktu. Vliv jednotlivých maziv na opotřebení třecích povrchů vyjádřený úbytkem hmotnosti je patrný z grafu na obr. 2-20:



obr. 2-20 Účinek grafitu a disulfidu molybdenu na opotřebení – upraveno [34].

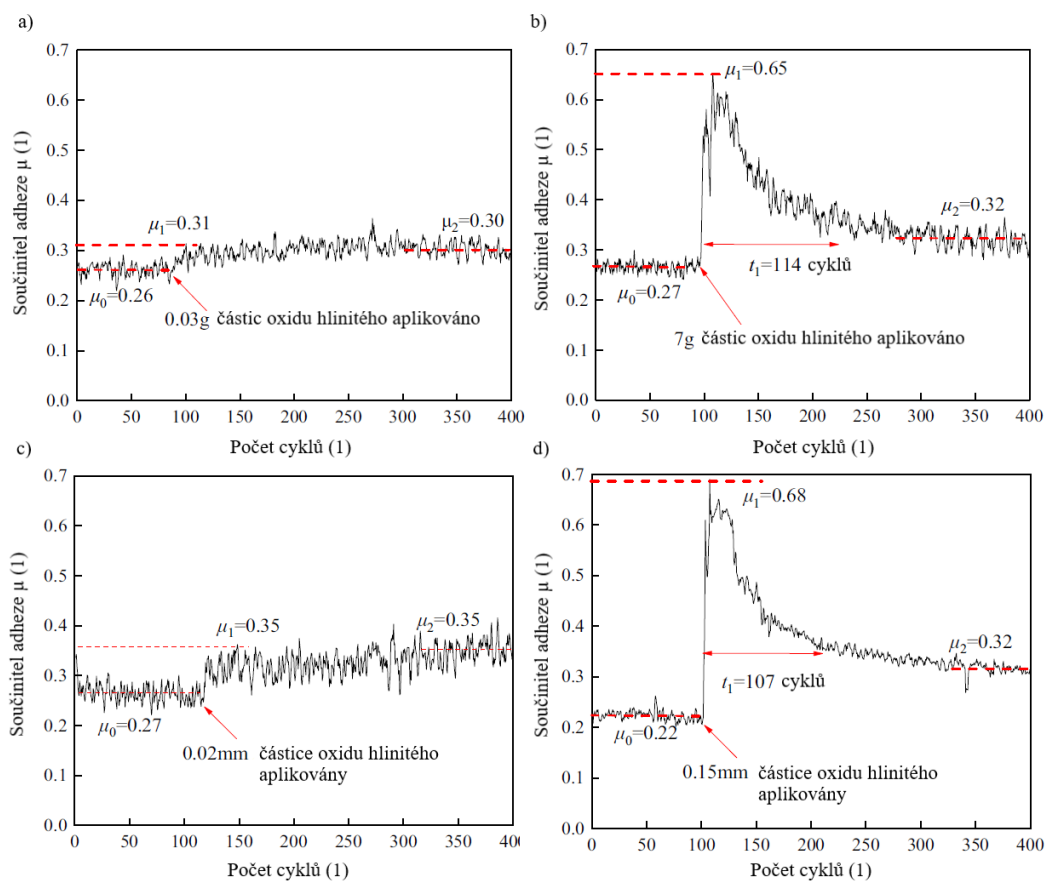
I v tomto případě bylo dosaženo lepších výsledků využitím maziv sestávajících převážně z grafitu – zatímco pokles v opotřebení kontaktů mazaných disulfidem molybdenu není příliš znatelný, redukce opotřebení v kontaktech mazaných převážně grafitem je signifikantní. Autoři v článku však uvádějí, že se vhodnost daného maziva odvíjí především od konkrétních provozních podmínek. Pozitivní tribologické vlastnosti disulfidu molybdenu jsou ovlivněny například přítomností kyslíku – za vyšších tlaků a teplot dochází k oxidaci povrchů, která snižuje mazací účinky maziva a naopak může zapříčinit vznik poškození abrazií. Tento závěr potvrzují provedené experimenty – zatímco u maziv SL(B) a SL(C) bylo detekováno převážně adhezivní opotřebení, v případě SL(A) docházelo navíc i k abrazivnímu poškození tvrdými částicemi.

### 2.3.3 Částice pro modifikaci tření

Jednou z funkcí **částic pro modifikaci tření** je přetvoření negativní (neutrální) třecí charakteristiky v pozitivní. Protože vedou k vyššímu tření než tuhá maziva, jejich dalším úkolem je obnova součinitele adheze z nízkých hodnot. Velikost částic se odvíjí

od požadované adheze, podle [33] leží ideálně mezi 1–2  $\mu\text{m}$ , ale může být i vyšší. Jedná se především o práškové minerály, zejména pak oxidy hliníku, křemíku, hořčíku, zinku nebo také o mastek a síran barnatý [28, 33].

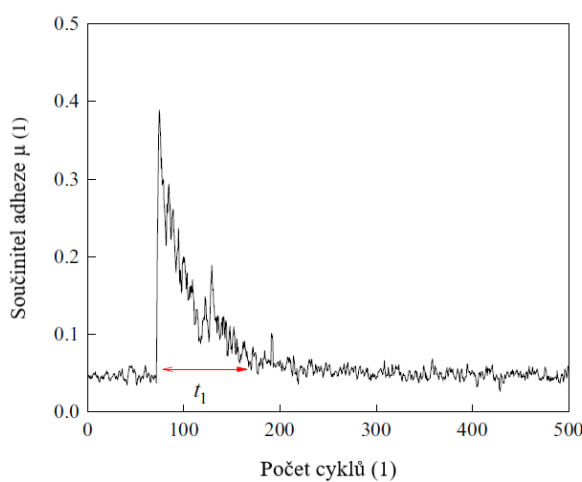
Možností aplikace částic oxidu hlinitého do kontaktu kola a kolejničky se zabýval Shi. V článku [35] popisuje schopnost zmíněných částic navýšit součinitel adheze v kontaktech kontaminovaných vodou či olejem na úroveň dostatečnou pro přenos adhezních sil. Výzkum probíhal na dvoudiskovém zařízení a byl zaměřený především na aplikované množství a velikost částic. Výsledky experimentů jsou patrné z grafů na obr. 2-21:



obr. 2-21 Vliv částic oxidu hlinitého na obnovu adheze – upraveno [35].

V prvním kroku byl zkoumán vliv množství částic na obnovu součinitele adheze. Byly porovnávány tři hodnoty součinitele adheze: (1) počáteční součinitel adheze v kontaktu mazaném vodou  $\mu_0$ , (2) špičková hodnota součinitele adheze  $\mu_1$  a (3) hodnota součinitele adheze po ustálení  $\mu_2$ . V případě a) bylo do kontaktu jednorázově vpraveno 0,03 g částic oxidu hlinitého a v případě b) 7 g. V obou případech došlo k navýšení adheze v kontaktu, při srovnání obou hodnot  $\mu_1$  je však zřejmé, že větší množství částic vede k výrazně rychlejší obnově adheze. Je však zajímavé, že po počátečním nárůstu dojde nakonec v obou případech k ustálení  $\mu_2$  na přibližně stejné hodnotě ( $\approx 0,31$ ). Podobné chování lze sledovat i v případě aplikace částic o různé velikosti: c) zatímco po aplikaci částic o velikosti 0,02 mm nedošlo k výraznému nárůstu součinitele adheze  $\mu_1$ , v případě částic

o velikosti 0,15 mm došlo k chvilkovému obnovení adheze až na úroveň suchého tření. I zde však nakonec došlo v obou případech k ustálení  $\mu_2$  na podobné hodnotě. Zjištěné výsledky tedy nasvědčují, že velikost/množství částic oxidu hlinitého ovlivňuje rychlost obnovy adheze z nízkých hodnot, nikoliv její následnou ustálenou hodnotu jako takovou. Pro srovnání byly provedeny i testy částic oxidu hlinitého v kontaktu mazaném olejem. Výsledky měření jsou zachyceny v grafu na obr. 2-22. Lze vidět, že ačkoliv jsou částice schopny obnovy adheze ihned po jejich aplikaci, po určité době jsou z kontaktu vytlačeny a prakticky není znatelný rozdíl mezi součinitelem adheze před aplikací částic a po ustálení. Autor článku nabízí vysvětlení, že toto chování může souviset se schopností oleje vytvořit tlustší mazací film než voda.



obr. 2-22 Vliv oxidu hlinitého na adhezi v kontaktu mazaném olejem – upraveno [35].

Částice oxidu hlinitého byly zkoumány i z hlediska opotřebení. Ukázalo se, že k největšímu poškození třecích povrchů docházelo bezprostředně po aplikaci. Tomu nasvědčuje i vývoj drsnosti – zatímco ihned po aplikaci částic docházelo ke zvýšení drsnosti obou povrchů, po zaběhnutí a ustálení součinitele adheze  $\mu_2$  dosahovala drsnost opět původních hodnot. Ihned po aplikaci dochází k drcení částic na menší kusy vlivem normálového zatížení, tyto úlomky jsou následně vtlačovány do povrchu obou kontaktních těles a tvoří vrypy. Po nějaké době jsou však vytlačeny z kontaktu pryč a nedochází k dalšímu výraznému opotřebení. Z dlouhodobého hlediska by tedy částice oxidu hlinitého neměly představovat výraznější problém pro životnost třecích povrchů.

## 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

### 3.1 Analýza problému

Kontakt kola a kolejnice je pravděpodobně nejdůležitějším tribologickým uzlem v oblasti kolejové dopravy. Váže se k němu však řada problémů, z nichž velká část souvisí s vysokým třením. Vysoké tření snižuje energetickou účinnost kolejové dopravy a také způsobuje opotřebení třecích povrchů, což má za následek častější servisní výměny kol či nutnost broušení kolejnic. Tření dále způsobuje vznik nepříjemného kvílivého hluku, který je patrný zejména při průjezdu vozidla traťovým obloukem. Modifikace tření pomocí maziv pro temeno kolejnice představuje řešení všech uvedených problémů. Laboratorní i terénní výzkumy ale ukázaly, že v případě nadměrné aplikace maziva na povrch kolejnice může dojít k přemazání, což může ohrozit bezpečnost přepravy. Účinky maziva jsou dány především jeho složením a aplikovaným množstvím. Zatímco vliv aplikovaného množství byl již spolehlivě popsán, informace o složení těchto maziv v literatuře chybí.

### 3.2 Analýza a zhodnocení rešerše

Ze studia literatury vyplývá, že není mnoho zdrojů, které by popisovaly složení maziv pro temeno kolejnice. Na trhu již sice existuje několik komerčních maziv a část informací lze vyčíst z katalogových listů, ty však neobsahují celkové složení směsí a většinou uvádí pouze typ základového oleje [26]. Z dohledaných patentovaných směsí má k těmto mazivům nejbližší směs popsána v [28]. Jedná se o hybridní modifikátor tření na vodní bázi obsahující příměs olejového maziva. Informace lze čerpat i z dalších patentů modifikátorů tření a také z produktových listů k mazivům pro okolky a výhybky [29, 30]. Na základě nich lze o složení maziva pro temeno kolejnice říci následující: Báze maziv je tvořena plastickým mazivem (základem je syntetický olej a zpevňovadlo, např. bentonit), do kterého jsou dále přimíchány částice pro modifikaci tření a tuhá maziva [30]. Tuhá maziva jsou většinou látky s nízkou Mohsovou tvrdostí a nízkou smykovou pevností, typicky se jedná o grafit nebo měkké kovy, například disulfid molybdenu nebo sulfid měďný [28, 33]. Účelem tuhých maziv je snižovat tření. Částice pro modifikaci tření mají obvykle vyšší tvrdost než tuhá maziva a díky nim je možné dosáhnout pozitivní třecí charakteristiky. Zároveň mají vyšší součinitel tření než tuhá maziva, a proto se používají k navyšování adheze z nízkých hodnot [35]. Příkladem částic pro modifikaci tření jsou oxidy hliníku nebo zinku [28].

Výsledné zastoupení jednotlivých komponent v mazivu pro temeno kolejnice je kompromisem mezi mazacími účinky (redukce hluku a opotřebení) a modifikací tření (zajištění přenosu adhezních/trakčních sil). Bude-li totiž v produktu významně převažovat

olejová složka, zlepši se mazací účinky, a to způsobí redukci hluku a opotřebení [22, 23]. Nicméně se celkově sníží adheze, což v konečném důsledku může způsobit například prodloužení brzdné dráhy kolejového vozidla [20]. Vyšší obsah částic pro modifikaci tření sice urychlí růst součinitele adheze z nízkých hodnot, na druhou stranu ale sníží mazací účinky směsi, díky kterým dochází k redukci hluku a opotřebení [35]. Vedle návrhu složení maziva je neméně důležité stanovení jeho vhodného aplikovaného množství. Jak bylo ukázáno v [9], účinky maziva pro temeno kolejnice jsou totiž silně závislé na jeho množství.

Parametry experimentů by měly být voleny tak, aby co nejdříve replikovaly podmínky reálné tratě. Hodnota rychlosti by měla být zvolena s ohledem na mezný či smíšený režim mazání, tyto dva režimy se totiž při modifikaci tření v kontaktu kola a kolejnice vyskytují nejčastěji. V případě skluzu to znamená držet se před bodem saturace, který nastává mezi 1–2% [1]. V práci [3], která se zabývala testováním modifikátoru tření na vodní bázi, byl pro měření na tribometru MTM vyvozen kontaktní tlak 750 MPa. Stejná hodnota byla použita i při testování maziva pro temeno kolejnice v článku [15]. Jedná se o hodnotu odpovídající tramvajovému provozu v městské hromadné dopravě.

### 3.3 Cíl práce

Cílem diplomové práce je vyvinout nové mazivo pro mazání temena kolejnice, které by po aplikaci do kontaktu zajišťovalo za valivě–skluzových podmínek součinitel adheze v intervalu hodnot 0,15–0,25 a zároveň by minimalizovalo dobu trvání adheze  $\mu < 0,1$ . S ohledem na ekologickou nezávadnost produktu je žádoucí použít jako bázi biodegradabilní mazivo, které bude minimalizovat dopad produktu na životní prostředí. Pro dosažení hlavního cíle je nezbytné splnění několika cílů dílčích:

- 1) Sestavení metodiky měření.
- 2) Analýza adhezních vlastností látek vybraných na základě literární rešerše.
- 3) Stanovení obecných pravidel popisujících vliv složení směsi na součinitel adheze v závislosti na množství a typu obsažených částic.
- 4) Návrh složení nového maziva pro temeno kolejnice.
- 5) Provedení komparačních testů s komerčními produkty.

Požadavky na složení a výkonnost maziva	
Báze	Biodegradabilní
Obsah částic (%)	Max. 40
Součinitel adheze (1)	0,15–0,25
Kriticky nízká adheze (1)	<0,1

tab. 3-1 Požadavky kladené na vyvíjené mazivo.

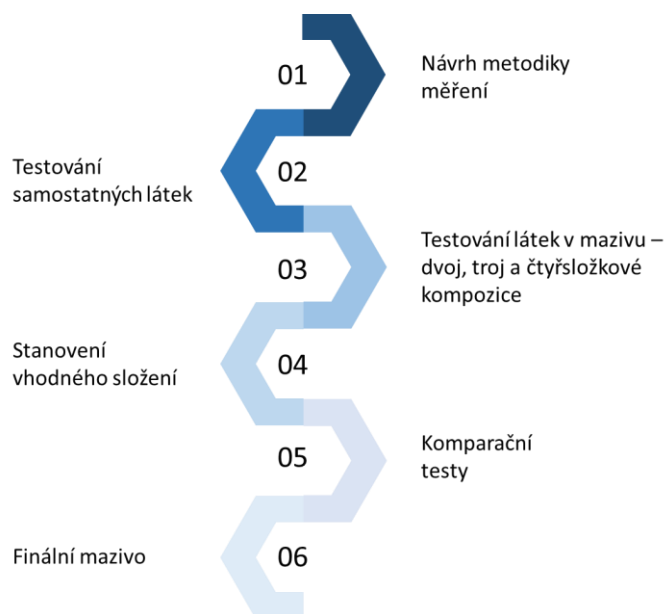
Požadavky kladené na vyvíjené mazivo jsou v tab. 3-1 a budou podrobněji vysvětleny v následující kapitole. Jedná se o experimentálně vývojovou práci, jejímž předpokládaným výstupem je publikační výsledek (J, D). Práce probíhá ve spolupráci s firmou Lubricant s. r. o.

## 4 MATERIÁL A METODY

Cílem této kapitoly je popsat proces návrhu složení maziva, použité látky, měřící zařízení a metodiku měření adhezních vlastností jednotlivých komponent a jejich směsí. Na základě výsledků měření bylo sestaveno několik možných složení budoucího maziva, z nichž tři nejlepší byly podrobeny komparačním testům s komerčními produkty.

### 4.1 Postup při vývoji maziva

Při vývoji maziva bylo nejprve nezbytné identifikovat látky, jejichž kombinace by vedla k žádoucím mazacím účinkům. Seznam těchto látek bude uveden dále v kapitole 4.2. Vybrané látky byly podrobeny sérii experimentů za účelem vyšetření jejich adhezních vlastností a stanovení obecných pravidel, na jejichž základě bylo možné odvodit, jakým způsobem je součinitel adheze v kontaktu závislý na množství částic obsažených v mazivu. Postup při vývoji maziva je schématicky zobrazen na obr. 4-1:



obr. 4-1 Schéma pracovního postupu při vývoji maziva.

Nejprve bylo potřeba navrhnout parametry, za kterých budou jednotlivé experimenty probíhat. Poté byly testovány vlastnosti jednotlivých látek, díky čemuž bylo objasněno jejich adhezní chování za sucha. Následně byly provedeny experimenty, při kterých byla každá z látek měřena v kombinaci s olejovou bází – především byl zkoumán vývoj součinitele adheze v závislosti na typu a množství obsažených částic. Na základě zjištěných poznatků byla testována možná složení budoucího maziva, z nichž byla vybrána tři, která byla porovnána s komerčními produkty.

## 4.2 Materiály použité pro vývoj maziva

Na základě literární rešerše bylo zjištěno, že by výsledná směs měla obsahovat především bázi, částice pro modifikaci tření a tuhá maziva. Zároveň bylo identifikováno několik látek z každé kategorie. Seznam látek, které byly použity při vývoji maziva uvádí tab. 4-1:

Typ	Název látky	Velikost částic ( $\mu\text{m}$ )	Mohsova tvrdost (–)
Báze	BEICHEM Ecorail 2009	–	–
Částice pro modifikaci tření	Oxid hlinitý	10, 44 (D99)	9
	Oxid zinečnatý	5 (D99)	4,5
Tuhá maziva	Grafit	7 (D90)	1–2
	Disulfid molybdenu	4,2 (D50)	–
Sulfidy kovů	Sulfid manganatý	12 (D90)	3,5–4
	Sulfid bismutitý	5 (D90)	2
	Sulfid cíničitý	9 (D90)	–
	Sulfid železnatý	$\approx 12$	4,5
	Sulfid měďný	$\approx 5$	2,5

tab. 4-1 Přehled použitých látek.

Báze nového maziva bude tvořena biodegradabilním mazivem pro železniční výhybky a okolky BEICHEM Ecorail 2009. Jako částice pro modifikaci tření byly zvoleny částice oxidů hlinitého a zinečnatého. Literatura uvádí jako nejčastěji používaná tuhá maziva grafit a disulfid molybdenu ( $\text{MoS}_2$ ). Ta byla dále doplněna o sulfidy kovů. Jmenovitě se jednalo o sulfid manganatý ( $\text{MnS}_2$ ), bismutitý ( $\text{Bi}_2\text{S}_3$ ), cíničitý ( $\text{SnS}_2$ ), železnatý ( $\text{FeS}$ ) a měďný ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ). Za účelem zjištění velikosti a tvaru částic uvedených látek byly pořízeny jejich snímky pomocí elektronového mikroskopu, které jsou přiloženy k této práci v rámci první přílohy.

## 4.3 Měřicí zařízení

Většina experimentů v této práci probíhala na tribometru Mini traction machine (MTM) od společnosti PCS Instruments. Pro kontrolu opotřebení třecích vzorků byl použit optický profilometr Bruker ContourGT-X. Na přípravu směsí byly použity laboratorní váha s přesností na 0,1 mg a stolní hřídelová míchačka. Pro čištění kontaktních těles byla použita ultrazvuková čistička.

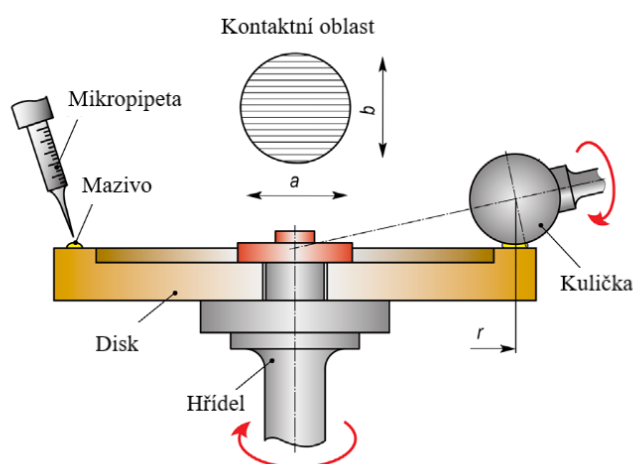
### 4.3.1 Mini traction machine

Tribometr MTM v konfiguraci *ball on disc* byl použit například v studiích [6, 15, 36, 37]. Jeho hlavní výhodou je reprodukovatelnost experimentů. Jedná se totiž o certifikované zařízení komerčního výrobce, což zaručuje, že jsou jednotlivá zařízení navzájem zaměnitelná. Při dodržení postupů uvedených v této práci by pak mělo být dosaženo stejných výsledků na libovolném pracovišti po celém světě. Tribometr rovněž disponuje vynikající přesností snímačů normálové a třecí síly  $\pm 0,3$  N. Rozsahy parametrů měření na MTM zaznamenává následující tabulka:

Parametr testu	Hodnota
Zatížení (N)	0–75
Kontaktní tlak (GPa)	0–1,25 (lze navýšit až na 3,1)
Rychlost ( $\text{ms}^{-1}$ )	0–4 (v obou směrech)
SRR (%)	0–200

tab. 4-2 Rozsah testovacích parametrů na zařízení MTM – upraveno [38].

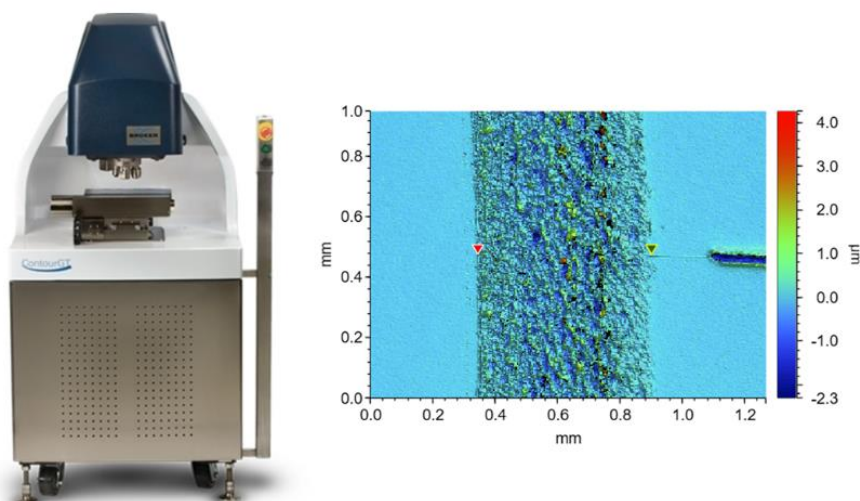
Základní konfigurace MTM sestává z kuličky o průměru 19,05 mm a disku o průměru 46 mm. Oba třecí členy jsou poháněny vlastním pohonem, úpravou jejich relativních rychlostí lze nastavit požadované % SRR v kontaktu. Zabudované senzory měří třecí sílu, zátěž, teplotu maziva a elektrickou vodivost [38]. Princip měření na MTM zachycuje schéma na obr. 4-2:



obr. 4-2 Schéma měření na zařízení MTM – upraveno [15].

### 4.3.2 Bruker ContourGT-X

Kontrola topografie povrchu probíhala na optickém profilometru Bruker ContourGT-X. Jedná se o zařízení pracující bezkontaktně na principu optické interference. Umožňuje měřit šikmé povrchy až do úhlu sklonu  $87^\circ$  (pro drsné povrchy) s horizontálním a vertikálním rozlišením až 0,01 nm [39]. Naměřené údaje se následně vyhodnocují v programu Vision64. V rámci diplomové práce bude pomocí tohoto zařízení kontrolována topografie povrchů třecích vzorků, konkrétně šířka, hloubka a drsnost drážky.



obr. 4-3 Analýza povrchu disku pomocí optického profilometru Bruker ContourGT-X – upraveno [40].

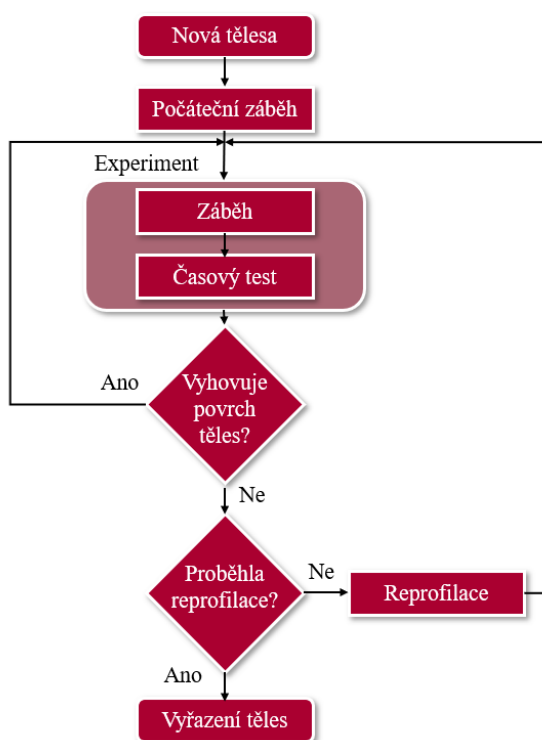
## 4.4 Metodika měření

Pro co možná nejlepší převedení podmínek reálné tratě do laboratorního prostředí bylo potřeba vyvinout komplexní metodiku měření, což zahrnovalo návrh jednotlivých experimentů a parametrů měření, přípravu směsí a jejich aplikaci, práci s kontaktními tělesy a způsob jejich reprofilace. Nalezení vhodné metodiky měření bylo jedním z dílčích cílů diplomové práce a pro jeho splnění bylo potřeba znát vývoj topografie povrchů kontaktních těles v průběhu měření. Pro přehlednost jsou zjištěné optimální hodnoty parametrů měření uvedeny bez důkazu již v rámci této kapitoly, popis procesu jejich stanovení bude podrobně rozebrán v kapitolách Výsledky a Diskuze.

### 4.4.1 Práce s kontaktními tělesy

V průběhu každého měření docházelo ke změně topografie povrchu kontaktních těles, která výrazným způsobem ovlivňovala naměřené výsledky. Pro zachování opakovatelnosti měření

byl navržen postup práce s kontaktními tělesy, který všechny negativní vlivy spojené s opotřebením třecích povrchu eliminuje, viz obr. 4-4:



obr. 4-4 Diagram managementu kontaktních těles.

Popis jednotlivých kroků:

- **Počáteční záběh** (wear-in) je „úvodní záběh“ nových kontaktních těles. Jedná se o 40 minutový časový test na MTM, jehož účelem je dostat kontaktní tělesa do oblasti stabilního opotřebením. Počáteční záběh probíhá při rychlosti 1000 mm/s, 2 % SRR a zatížení 18 N (0,8 GPa).
- **Záběh** (run-in) předchází každému experimentu s částicemi či mazivy. Jeho smyslem je zajistit stejné počáteční podmínky pro všechny experimenty. Probíhá na MTM při rychlosti 1000 mm/s, 2 % SRR a zatížení 18 N (0,8 GPa). Délka záběhu byla stanovena na 10 minut nebo do doby, než je dosaženo ustálení součinitele adheze v blízkosti hodnoty  $\mu = 0,39$ .
- **Časový test** je hlavní část experimentu a pro jednotlivé typy měření bude podrobně popsán dále.
- **Kontrola topografie povrchu.** V průběhu měření dochází k rozvoji drážky na obou kontaktních tělesech. Šířka a hloubka drážky jsou parametry ovlivňující kontaktní tlak, drsnost povrchu drážky má zase přímý dopad na režim mazání. Kontaktní tělesa vyhovují, je-li aritmetická úchylka drsnosti  $Ra$  v rozmezí 0,1–0,3  $\mu\text{m}$  a šířka drážky nepřekročí 1 mm.
- **Reprofilace** je proces obnovy parametrů drážky. V případě, že  $Ra$  překročí hodnotu 0,3  $\mu\text{m}$  nebo šířka drážky přesáhne 1 mm, dochází k celkovému zbroušení disku

a k obnově topografie povrchu na úroveň blízkou povrchu nových těles. Tento proces je však možné aplikovat nanejvýš jedenkrát, protože kuličku tímto způsobem ošetřit nelze (lze ji však jednou otočit). Klesne-li  $Ra$  drážky pod  $0,1 \mu\text{m}$ , dochází k „zdrsnění“ drážky prodloužením fáze záběhu na 20 minut.

Před každou kontrolou topografie povrchu na optickém profilometru, stejně tak jako před začátkem každého experimentu, byl povrch těles manuálně zbaven nečistot pomocí papírových utěrek a acetonu. Na začátku a na konci každého měření pak byla kontaktní tělesa čištěna v acetonové lázni po dobu 10 minut ultrazvukem.

#### 4.4.2 Parametry experimentu

Parametry experimentu byly zvoleny na základě literární rešerše a jejich hodnoty udává tabulka 4-3:

Parametr experimentu	Hodnota
SRR (%)	2
Rychlost ( $\text{mms}^{-1}$ )	1000
Přítlačná síla (N)	18
Kontaktní tlak (GPa)	0,8

tab. 4-3 Přehled parametrů experimentu.

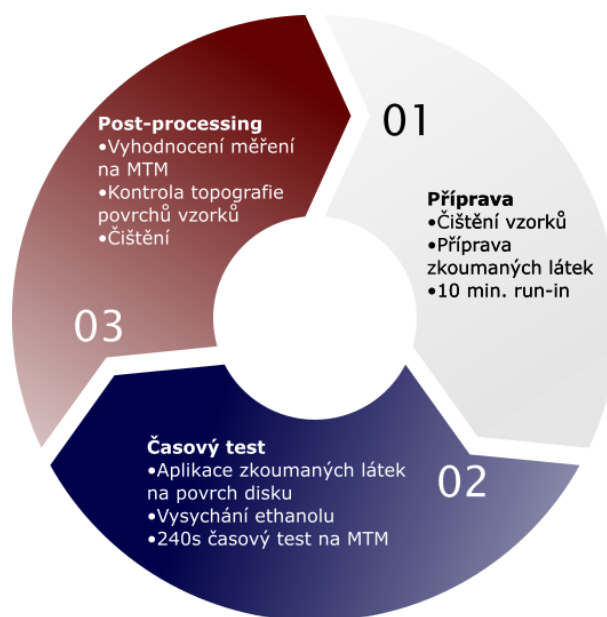
Prvním parametrem je **skluz**, ke kterému dochází mezi kolem a kolejnicí. S narůstajícím % skluzu roste také součinitel adheze, a to nejméně do bodu saturace, který se pohybuje mezi 1–2 % [1]. MTM však namísto skluzu pracuje s parametrem **SRR**. Byla zvolena 2 % SRR, což z hlediska trakční křivky znamená, že se experimenty pohybovaly před bodem saturace.

**Kontaktní tlak** se obvykle pohybuje v rozmezí 0,6–1,4 GPa mezi běhounem a temenem kolejnice, mezi okolkem a pojížděnou hranou však může přesáhnout i 2 GPa [1]. Zatížení bylo pro všechny experimenty stejné a bylo realizováno přítlačnou silou 18 N. Ta dle Hertzovy teorie odpovídá kontaktnímu tlaku přibližně 0,8 GPa, což je hodnota ležící ve vymezeném intervalu a je reálná pro tramvajový provoz.

Třetím zvoleným parametrem je **rychlost** otáčení kontaktních těles. S ohledem na režim mazání a také na délku trvání experimentů byla zvolena rychlost 1000 mm/s. Režim mazání je důležitý z hlediska replikace podmínek reálné tratě. Typ režimu lze určit na základě Stribeckovy křivky. Není však možné stanovit křivku přímo pro směs plastického maziva s částicemi, měření proto probíhalo na čistém základovém oleji. Volba rychlosti bude podrobněji zdůvodněna v kapitolách Výsledky a Diskuze.

### 4.4.3 Adhezní testy samostatných látek

Jako první byly analyzovány adhezní vlastnosti samostatných komponent vyvíjeného maziva. Plán měření ilustruje schéma na obr. 4-5:



obr. 4-5 Plán experimentů se samostatnými látkami.

Experiment lze rozdělit do tří fází:

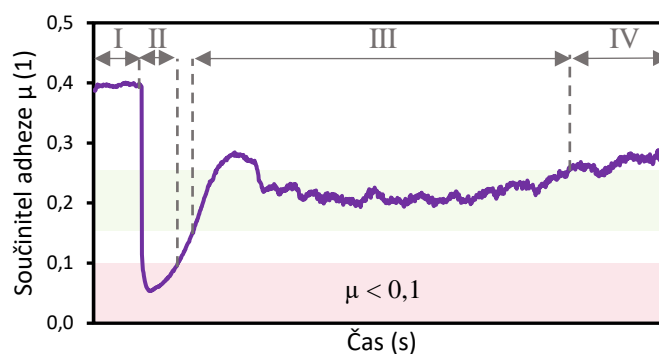
- 1) Fáze přípravy
- 2) Časový test
- 3) Post-processing

Nejprve bylo nutné zbavit kontaktní tělesa nečistot dle postupu popsáno dříve. Následoval záběh kontaktních těles. Ve druhé fázi byly částice pomocí ethanolu nanášeny na povrch disku. **Časový (adhezní) test o délce 240 s** byl spuštěn až po úplném vyschnutí ethanolu – doba schnutí byla stanovena na 5 minut. Po ukončení testu byla kontaktní tělesa očištěna a výsledky měření byly vyhodnoceny v programu Excel. Následovala kontrola topografie povrchu těles.

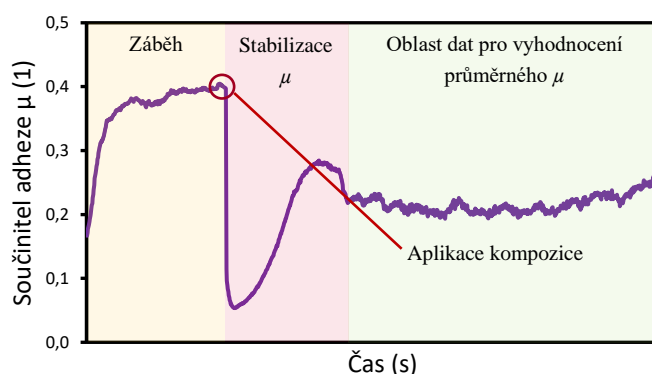
### 4.4.4 Adhezní testy kompozic

Po měření adhezních vlastností samostatných látek byly měřeny jejich dvoj, troj a vícesložkové kompozice. Sledované parametry jsou zaznačeny v grafu na obr. 4-6. Graf je rozdělen do čtyř oblastí: (I) oblast suchého tření před aplikací (záběh), (II) propad adheze bezprostředně po aplikaci maziva v důsledku přemazání (kriticky nízká adheze), (III) oblast optimálního působení maziva a (IV) oblast snížených účinků maziva. Plán experimentů s kompozicemi je pak znázorněn na obr. 4-7. Po dokončení záběhové fáze (žlutá oblast) byly kompozice aplikovány mikropipetou na povrch disku tzv. „za chodu“. Časové testy

probíhaly opět za podmínek uvedených v tab. 4-3, nicméně byly prodlouženy na 20 minut. Vlivem plastického maziva totiž dochází (oproti samostatným částicím) k pomalejšímu růstu součinitele adheze v čase. Propad a následný růst adheze v důsledku počátečního přemazání nebyl zahrnut do hodnocení průměrného součinitele adheze kompozice, při vyhodnocování tedy nebylo uvažováno prvních 200 s experimentu po aplikaci kompozice (červená oblast). Tento interval byl však důležitý pro hodnocení doby trvání kriticky nízké adheze.



obr. 4-6 Znárodnění adhezivního pásma optimální a kriticky nízké adheze.



obr. 4-7 Plán experimentů s kompozicemi.

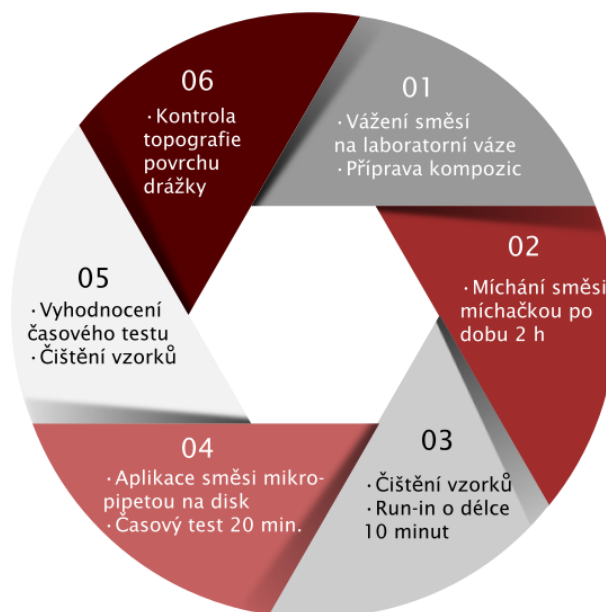
Po ukončení každého testu byly vzorky očištěny a následně byla provedena kontrola topografie povrchu drážky na optickém profilometru. Výsledky byly vyhodnoceny v Excelu. Mezi jednotlivými experimenty pak byly vzorky očištěny pouze manuálně pomocí papírových utěrek a acetonu.

Obr. 4-8 popisuje úplný cyklus měření součinitele adheze kompozic. Každá kompozice sestávala z plastického maziva BECHEM Ecorail 2009 a příměsi:

- 1) Částic pro modifikaci tření
- 2) Tuhých maziv
- 3) Kombinace částic pro modifikaci tření a tuhých maziv

Hmotnostní podíl částic v mazivu byl nejprve zvolen na základě literární rešerše a posléze byl na základě dosažených výsledků dále upravován. Rovněž byly testovány varianty stejné směsi s různým hmotnostním podílem jednotlivých komponent. Každá směs byla

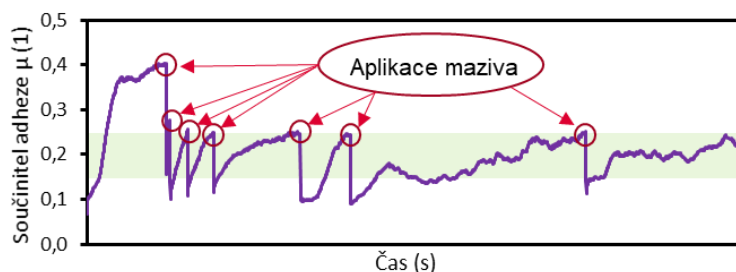
pro zajištění rovnoměrné distribuce částic v mazivu před každým měřením míchána po dobu 2 hodin na stolní hřídelové míchače.



obr. 4-8 Plán experimentů s vícesložkovými kompozicemi.

#### 4.4.5 Testy opotřebení

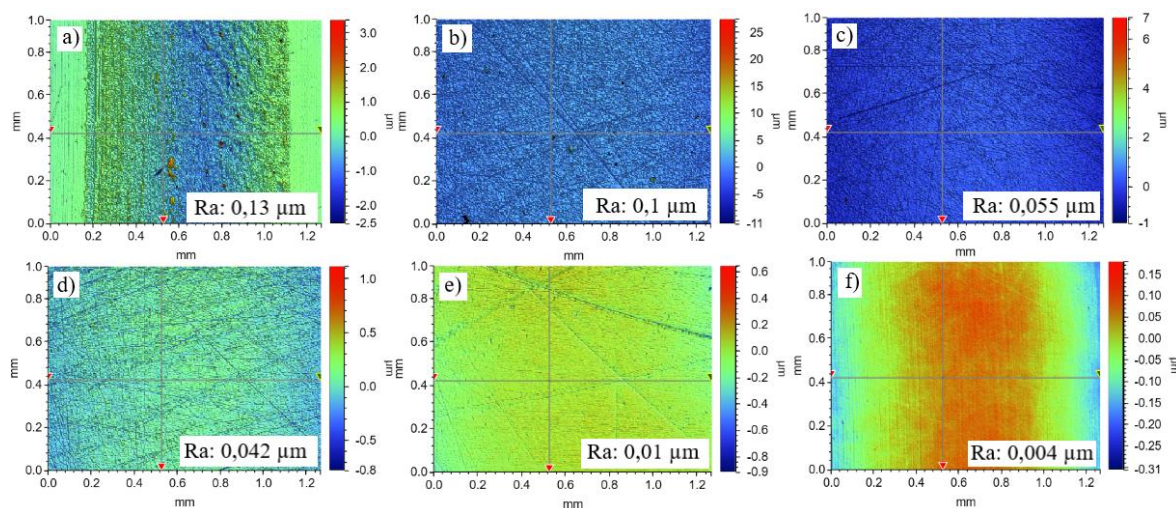
Posledním typem testů, které byly provedeny nad rámec původního zadání diplomové práce, byly **testy opotřebení**. Ty na rozdíl od adhezních testů, pro které byla použita kontaktní tělesa vyrobená z ložiskové oceli AISI 52100, probíhaly na oceli C12, jež je svou tvrdostí bližší skutečným železničním materiálům. Testy trvaly 60 minut a každému z nich předcházela 8 minutový záběh. Směs byla do kontaktu aplikována při překročení součinitele adheze 0,25 a aplikované množství bylo 2  $\mu\text{l}$ , viz obr. 4-9. Byly vyhodnocovány parametry drážky, jmenovitě: šířka, hloubka a  $R_a$  povrchu a dále pak průměrný součinitel adheze, počet aplikací maziva a hmotnostní úbytek disku.



obr. 4-9 Aplikace maziva v průběhu testů opotřebení.

#### 4.4.6 Reprofilace povrchu disku

Za účelem snížení ekonomických nákladů byla ověřena možnost reprofilace disku. Disk na hraně životnosti byl broušen brusným papírem s různou hrubostí, popořadě: 600, 1000, 2000 a 5000 zrn na  $\text{cm}^2$ . Poté byl disk upnut do soustruhu a vyleštěn pomocí diamantové pasty. Drsnosti povrchu po jednotlivých etapách reprofilace lze vidět na obr. 4-10. Ukázalo se, že tímto postupem lze vrátit povrch disku téměř do původního stavu, a díky tomu odpadá nutnost nakupovat nové vzorky.



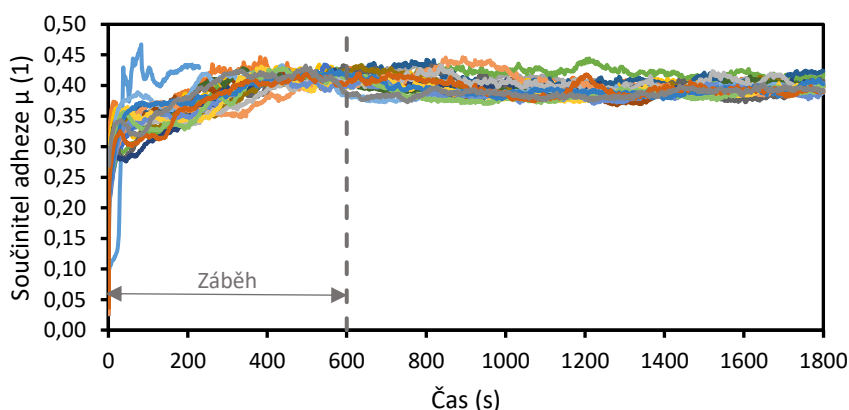
obr. 4-10 Reprofilace povrchu disku brusným papírem a diamantovou pastou.

## 5 VÝSLEDKY

V rámci této kapitoly budou shrnuty výsledky, kterých bylo dosaženo v experimentální části diplomové práce. Měření bylo komplikováno absencí jednotné metodiky testování top of rail produktů. Jako první byly proto provedeny experimenty, které měly za cíl definovat parametry nezbytné pro správný návrh metodiky testování jednotlivých složek maziva pro temeno kolejnice a stejně tak maziva jako celku. Následně byly zjištěny adhezní vlastnosti jednotlivých složek. V hlavní části práce byly zkoumány jejich dvoj, troj a čtyř složkové kompozice a v samotném závěru byly provedeny komparační testy s komerčními produkty.

### 5.1 Vývoj topografie povrchu kontaktních těles

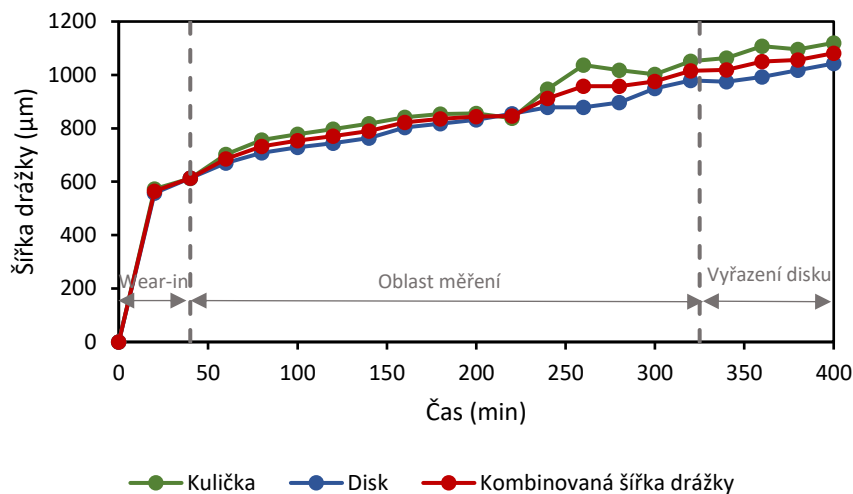
V rámci výzkumné skupiny kolejové dopravy odboru tribologie Ústavu konstruování na VUT v Brně byla provedena série experimentů, jejichž cílem bylo stanovit základní hodnotu součinitele adheze nekontaminovaného kontaktu, resp. dobu potřebnou pro záběh kontaktních těles. Měření probíhala pro 2 a 3 % SRR a byla motivována snahou zajistit stejné počáteční podmínky všech experimentů provedených v hlavní části diplomové práce. Podíl autora diplomové práce na provedených měřeních je 50 %. Experimentů se 2 % SRR proběhlo celkem dvacet jedna a jejich průběhy jsou patrné z grafu na obr. 5-1:



obr. 5-1 Stanovení doby záběhu kontaktních těles. 1000 mm/s, 2 % SRR, 18 N.

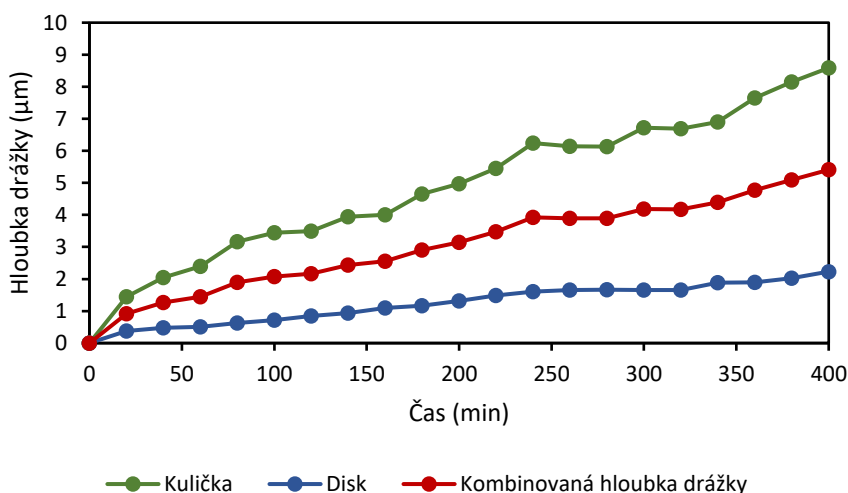
Experimenty vykazovaly poměrně dobrou opakovatelnost. Z grafu 5-1 je dále patrné, že ve všech experimentech došlo po cca 10 minutách k relativnímu ustálení všech křivek. Na základě toho byla minimální doba nezbytná pro záběh kontaktních těles stanovena na 10 minut. Rovněž byla určena základní hodnota součinitele adheze pro „zaběhnutý“ nekontaminovaný kontakt  $\mu = 0,39$ . Kontaktní tělesa byla považována za zaběhnutá, dojde-li k ustálení součinitele adheze v blízkosti této hodnoty. Kromě součinitele adheze byl

dále studován vývoj topografie povrchu kontaktních těles, jednalo se především o parametry drážky: šířka, hloubka a drsnost (aritmetická úchylka drsnosti  $R_a$ ) drážky. Vývoj šířky drážky v průběhu měření ilustruje graf na obr. 5-2:



obr. 5-2 Vývoj šířky drážky v čase.

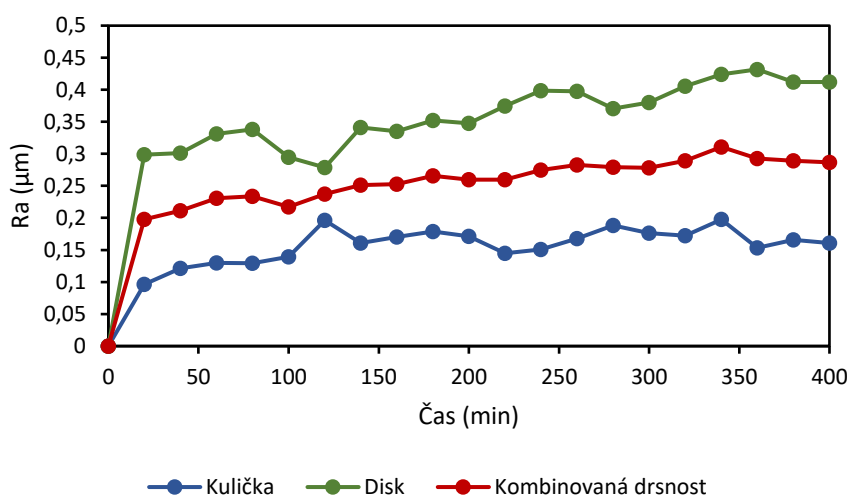
Z grafu je patrné, že v prvních cca 40 minutách měření docházelo k rapidnímu opotřebení a rozšíření drážky. Poté však křivka ukazuje již poměrně stabilní trend. Pojmeme „kombinovaná šířka“ je myšlena průměrná hodnota mezi šířkou drážky kuličky a disku. Je zřejmé, že rapidní opotřebení, ke kterému dochází na začátku životnosti vzorků, by mohlo ovlivnit výsledky měření částic a maziva, a proto byla zavedena fáze počátečního záběhu. Jedná se o prvotní čtyřicetiminutový záběh nových kontaktních těles, který má za cíl provést prvotní opotřebení. Pozdější měření částic a maziva díky tomu probíhala za stabilních podmínek. Graf na obr. 5-3 zobrazuje vývoj hloubky drážky kontaktních těles:



obr. 5-3 Vývoj hloubky drážky v čase.

Ukázalo se, že vlivem opotřebení dochází v průběhu měření ke změně kontaktní oblasti obou těles. Vstupním parametrem zatížení je v případě MTM přítláčná síla, parametrem experimentu je ovšem kontaktní tlak. Ten se bude vlivem změny kontaktní oblasti rovněž měnit – s rostoucí kontaktní oblastí bude kontaktní tlak klesat. Z toho důvodu bylo nutné stanovit, při jaké míře opotřebení (vyjádřené parametry drážky) budou kontaktní tělesa vyřazena z dalšího měření. Po vyhodnocení průběhu šířky a hloubky drážky kuličky a disku byla jako hranice „použitelnosti“ stanovena kombinovaná šířka drážky 1 mm. Po překročení této hodnoty budou kontaktní tělesa z dalšího měření vyřazena.

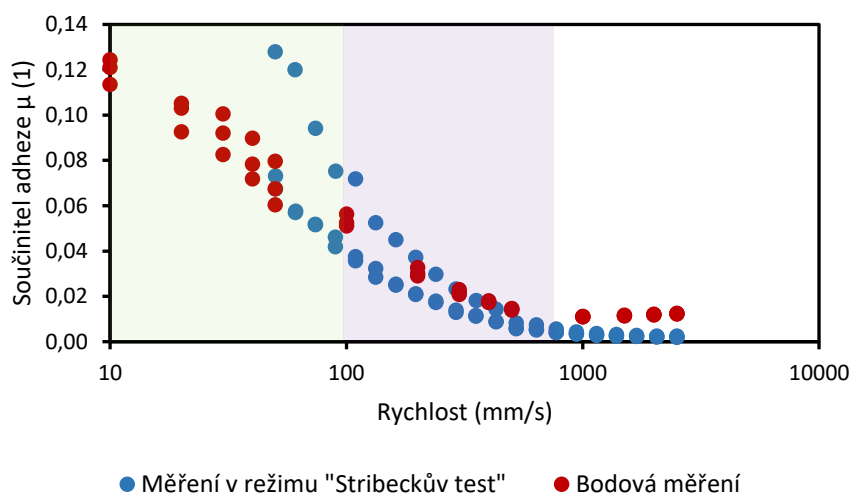
Posledním parametrem, který byl v souvislosti se změnou topografie povrchů kontaktních těles zkoumán, byla aritmetická úchylka drsnosti  $R_a$ . Její vývoj v průběhu měření je zaznamenán v grafu na obr. 5-4:



obr. 5-4 Vývoj aritmetické úchylky drsnosti povrchu  $R_a$  v čase.

Lze vidět, že drsnost v průběhu měření narůstá. Drsnost povrchu drážky je parametr, který významným způsobem ovlivňuje režim mazání, pro zachování relevantních podmínek experimentu je tedy jeho znalost nezbytná.

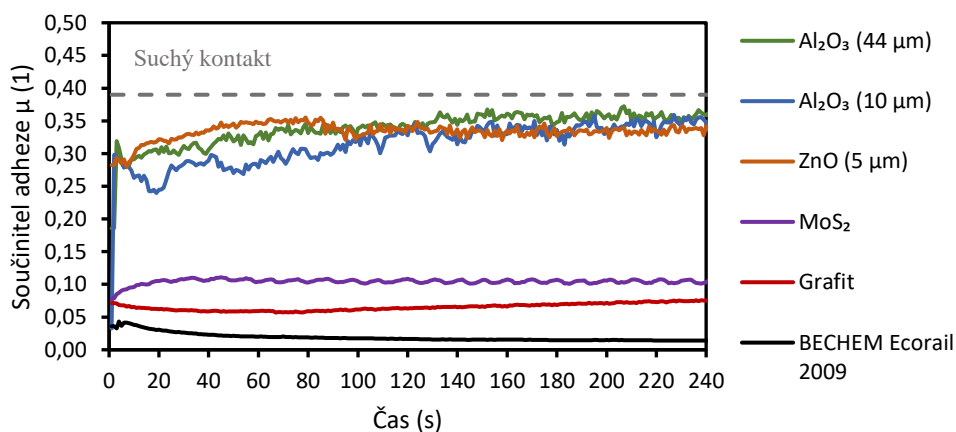
Dále bylo provedeno experimentální měření Stribeckovy křivky na MTM a numerická predikce parametru mazání v prostředí MATLAB. Měření probíhalo na základovém oleji plastického maziva BECHEM Ecorail 2009, a to jak pomocí přednastavených režimů, tak pomocí časového měření. Predikce nemohla být provedena přímo pro plastické mazivo (olej se zpevňovadlem) nebo pro mazivo obsahující částice, protože pro tyto směsi nebylo možné stanovit viskozitu a tlakově–viskózní index. Tyto parametry byly pro olej zjištěny pomocí vysokotlakého viskozimetru. V grafu na obr. 5-5 jsou barevně zvýrazněny oblasti mezního (zelená) a smíšeného (fialová) režimu mazání. Tyto režimy mazání jsou v případě mazání mazivy pro temeno kolejnice nejpravděpodobnější [3] a je zřejmé, že se pro zkoumaný základový olej vyskytují v širokém rozmezí rychlostí. V případě směsi plastického maziva s částicemi lze očekávat posun intervalů mezního a smíšeného mazání více doprava.



obr. 5-5 Experimentální měření Stribeckovy křivky základového oleje – závislost na rychlosti.

## 5.2 Měření samostatných složek

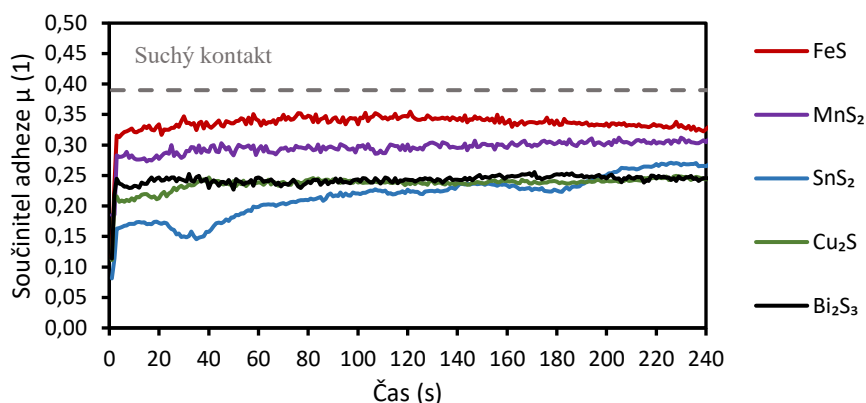
Měření probíhalo na MTM za dodržení postupů specifikovaných v kapitole Materiály a metody. Zatímco plastické mazivo bylo do kontaktu vpravováno mikropipetou v množství 4  $\mu\text{l}$ , dávka 0,5 ml směsi částic a ethanolu byla aplikována pomocí injekční stříkačky. Poměr dílu částic k ethanolu byl pro všechna měření 1:6. Díky tomuto postupu aplikace vytvořily částice na povrchu disku rovnoměrný film. Ten byl sice z větší části v prvních vteřinách po spuštění testu vlivem skluzu odstraněn, nicméně v drážce se udrželo dostatečné množství částic na to, aby mohl být zkoumán jejich vliv na adhezi.



obr. 5-6 Součinitel adheze částic pro modifikaci tření, plastického maziva a tuhých maziv.

Graf na obr. 5-6 zobrazuje výsledky časových testů. Na základě hodnoty součinitele adheze lze velmi dobře rozlišit částice pro modifikaci tření a maziva – zatímco se součinitel adheze částic pro modifikaci tření pohybuje v ustálené části křivky mezi hodnotami 0,3–0,4;

v kontaktech s přítomností maziva výrazně nepřesáhne hodnotu 0,1. Z částic pro modifikaci tření byl testován oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ve dvou velikostech (44  $\mu\text{m}$  a 10  $\mu\text{m}$ ) a oxid zinečnatý ( $\text{ZnO}$ ). Z maziv byla použita kromě plastického maziva pro mazání železničních výhybek BECHEM Ecorail 2009 ještě tuhá maziva grafit a disulfid molybdenu ( $\text{MoS}_2$ ). Graf na obr. 5-7 znázorňuje výsledky měření částic sulfidů kovů:



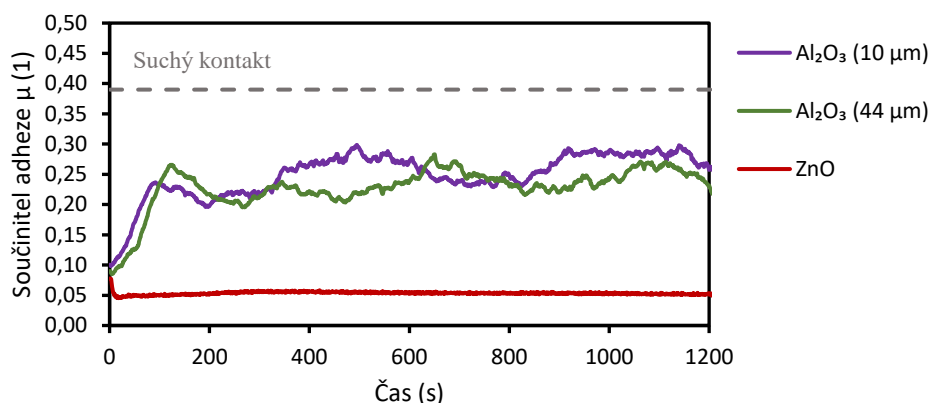
obr. 5-7 Výsledky měření adhezních vlastností částic sulfidů kovů.

Okamžitě po spuštění experimentu se částice projevovaly stabilní hodnotou součinitele adheze, který byl nejvyšší pro sulfid železnatý ( $\text{FeS}$ ) a nejnižší pro sulfid měďný ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ). Výjimku tvořily pouze částice sulfidu cíničitého ( $\text{SnS}_2$ ), které i při opakovaném měření vykazovaly stabilní hodnotu součinitele adheze až po cca 220s záběhu, a to přibližně 0,25. Z hlediska adhezních vlastností spadají tyto částice do oblasti mezi částicemi pro modifikaci tření a tuhými mazivy.

### 5.3 Měření částic v mazivu

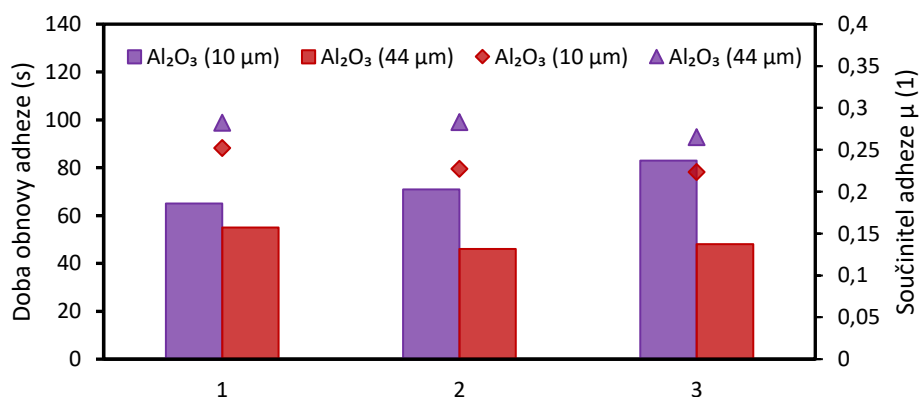
Parametry experimentů byly stejné, jako v případě měření samostatných látek a byly podrobně popsány v předchozí kapitole. Směs plastického maziva BECHEM Ecorail 2009 s částicemi byla před každým experimentem po dobu dvou hodin míchána na stolní hřídelové míchačce. Jako první bylo testováno, jakým způsobem se bude projevovat příměs částic pro modifikaci tření v plastickém mazivu. Patent [28] uvádí jako optimální obsah částic pro modifikaci tření množství mezi 9–24 %. Na základě toho byla pro měření zvolena hodnota ze středu tohoto intervalu – 15 %. Byly testovány dvě velikosti částic (10 a 44  $\mu\text{m}$ ) oxidu hlinitého a jedna velikost částic oxidu zinečnatého. Výsledky měření jsou zaznamenány v grafu na obr. 5-8. Po aplikaci směsí obsahujících částice  $\text{Al}_2\text{O}_3$  došlo k očekávanému prvotnímu propadu adheze do nízkých hodnot. Během prvních 100–200 sekund experimentu však součinitel adheze vystoupal do intervalu optimálních hodnot 0,15–0,25 a okolo horní hranice tohoto rozmezí osciloval po zbytek experimentu – ani po dvaceti minutách nedošlo k obnovení adheze na původní hodnoty.

Na druhou stranu u částic ZnO nebyla schopnost obnovy adheze ani při opakovaném měření prokázána, a proto byly částice ZnO z dalšího měření vyloučeny jako částice nevhodné pro obnovu adheze.



obr. 5-8 Výsledky měření 15% směsi částic pro modifikaci tření s plastickým mazivem.

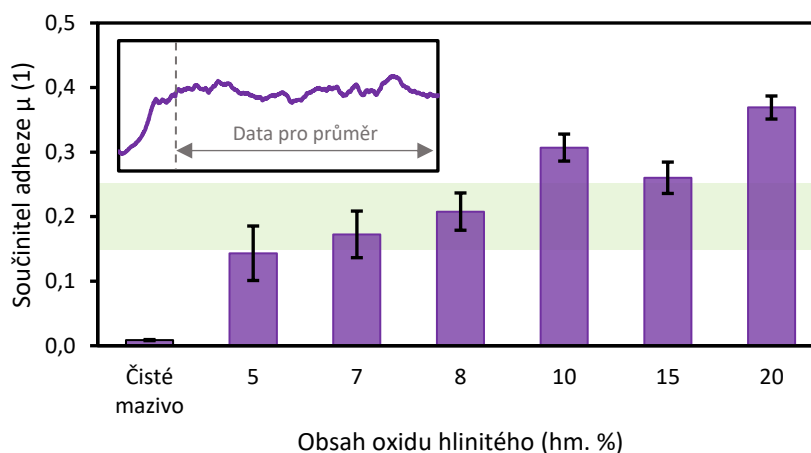
Následně bylo zkoumáno, jaký vliv má velikost částic oxidu hlinitého na rychlost obnovy adheze v kontaktu zaplaveném mazivem. Pro ověření opakovatelnosti měření byly testy provedeny třikrát za stejných podmínek. Schopnost větších částic oxidu hlinitého rychleji obnovit adhezi z kriticky nízkých hodnot byla prokázána ve všech třech případech. Časy obnovy součinitele adheze nad úroveň 0,15 byly popořadě: 65, 71, 83 sekund pro částice o velikosti 10 μm a 55, 46 a 48 sekund pro částice o velikosti 44 μm. Výsledky měření jsou znázorněny v grafu na obr. 5-9 – bodově je znázorněn maximální dosažený součinitel adheze a ve sloupcích je pak znázorněna doba potřebná pro dosažení spodní hranice intervalu požadovaných hodnot součinitele adheze ( $\mu \geq 0,15$ ). Lze vidět, že při všech experimentech vystoupal součinitel adheze do vyšších hodnot při použití větších částic oxidu hlinitého. Je však nutné poznamenat, že po ustálení již nebyl sledován výraznější rozdíl mezi součinitelem adheze částic o velikostech 10 μm a 44 μm.



obr. 5-9 Rychlost obnovy adheze v závislosti na velikosti částic Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

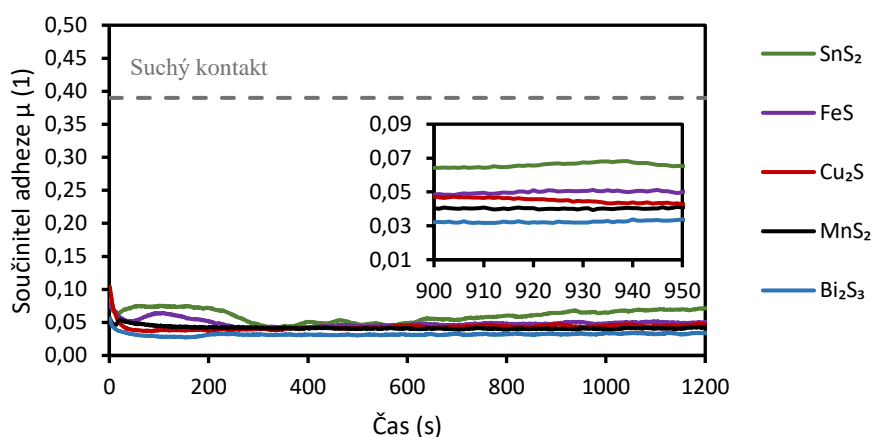
V dalším kroku byl zkoumán vliv množství částic Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na součinitel adheze. Byly testovány směsi plastického maziva s částicemi o velikosti 10 μm v množství 0–20 hm. %.

Průměrné hodnoty součinitele adheze (nebylo započítáno prvních 200 sekund, stejně je postupováno u všech následujících grafů znázorňujících průměrnou hodnotu součinitele adheze, viz také podkapitola 4.4.4) jsou znázorněny v grafu na obr. 5-10:



obr. 5-10 Součinitel adheze v závislosti na množství částic Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> v mazivu.

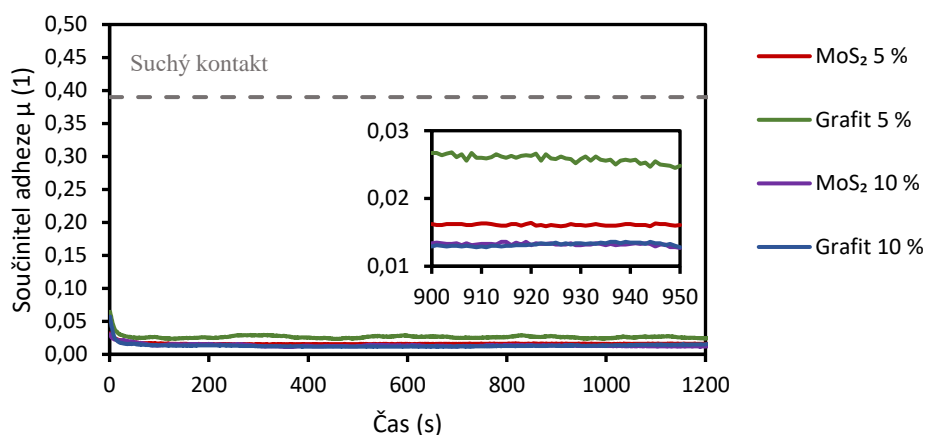
V grafu lze sledovat obecný trend nárůstu průměrného součinitele adheze se zvyšujícím se obsahem částic oxidu hlinitého. Tento nárůst je výrazný zejména mezi 0–10 hm. % částic, nad 10 hm. % již není tak znatelný. Poté byly testovány sulfidy kovů, popořadě: FeS, SnS<sub>2</sub>, Cu<sub>2</sub>S, MnS<sub>2</sub> a Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub>. Pro první měření byl stanoven 30% podíl částic v kompozici – dvakrát vyšší množství oproti částicím pro modifikaci tření bylo zvoleno proto, aby se výrazněji projevilo chování částic v plastickém mazivu. Výsledky experimentů jsou zaznamenány v grafu na obr. 5-11:



obr. 5-11 Výsledky měření kompozic obsahujících sulfidy kovů.

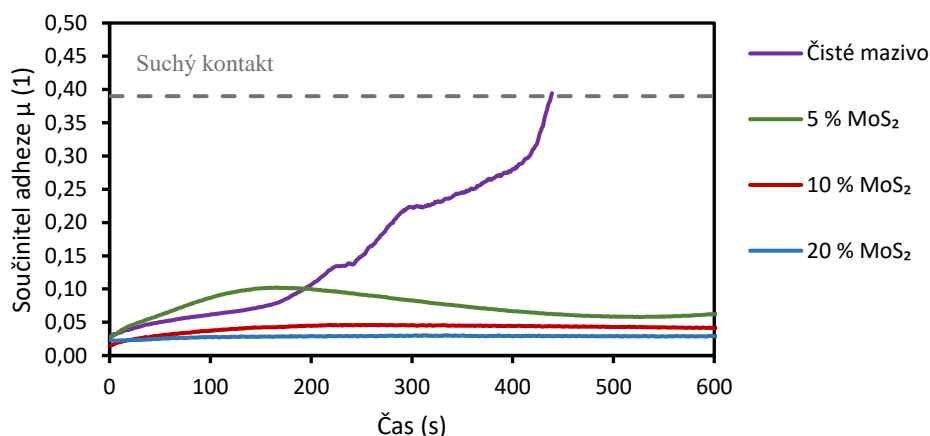
Měření všech kompozic obsahujících sulfidy kovu vedla na velmi nízkou adhezi. Ukázalo se, že přestože některé z částic (např. FeS) za sucha zajišťují podobnou adhezi jako částice pro modifikaci tření, v plastickém mazivu je jejich chování zcela odlišné. Vliv tuhých maziv ve směsi s plastickým mazivem na adhezi v kontaktu byl studován jako poslední.

Patent [28] uvádí jako doporučený obsah tuhých maziv v hybridním modifikátoru tření 1–6 %. Pro měření byla proto vybrána hodnota 5 hm. % spadající do tohoto intervalu a pro srovnání ještě dvojnásobná hodnota 10 hm. %. Z tuhých maziv byl testován vločkový grafit a disulfid molybdenu. Výsledky experimentů jsou patrné z grafu na obr. 5-12:



obr. 5-12 Výsledky měření dvojsložkových kompozic s příměsí tuhých maziv.

Obecně lze říct, že všechny testované směsi vedly k velmi nízkému (méně než 0,03) a v čase poměrně stabilnímu součiniteli adheze. Byla potvrzena domněnka, že příměs malého množství tuhých maziv výrazně neovlivní součinitel adheze směsi v porovnání s čistým plastickým mazivem. Dále byl zkoumán možný vliv tuhých maziv na dobu trvání mazacích účinků. Za tím účelem bylo provedeno několik experimentů, při kterých byly měřeny směsi obsahující různé hm. % disulfidu molybdenu. Výsledky těchto měření jsou v grafu na obr. 5-13:



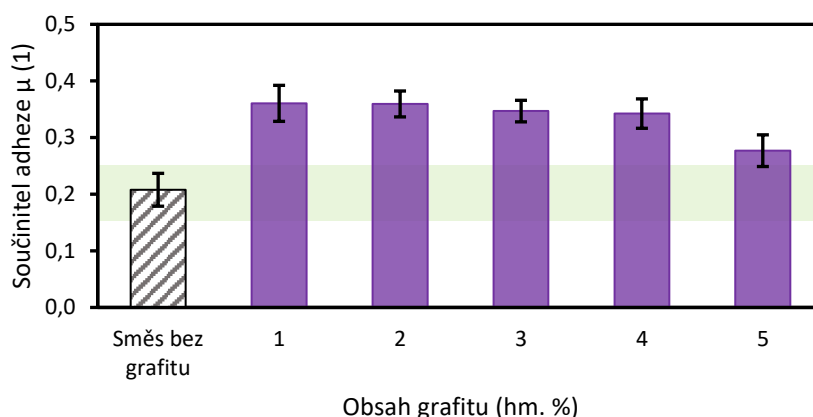
obr. 5-13 Vliv příměsí tuhých maziv na délku trvání mazacích účinků.

Experimenty probíhaly při 15% SRR a aplikovaná dávka směsi byla 2 μl. Výsledky naznačují, že existuje souvislost mezi obsahem tuhých maziv a délkou trvání mazacích účinků – zatímco při použití čistého maziva došlo k obnově původní adheze přibližně

po 430 s, v případě směsí obsahujících disulfid molybdenu se součinitel adheze i po deseti minutách držel na hodnotách nižších než 0,1.

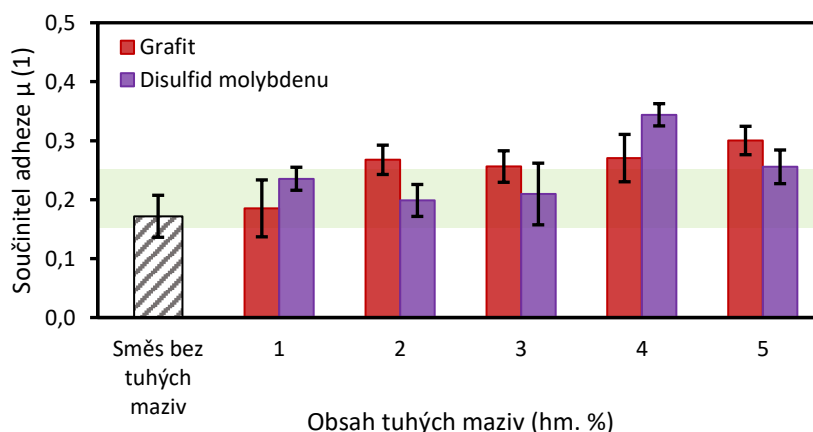
## 5.4 Vliv typu a množství částic v mazivu na adhezi

Dalším krokem bylo zjistit, jaké jsou optimální skladba a množství zkoumaných látek v mazivu pro temeno kolejničky. Pozornost byla věnována především tomu, jakým způsobem se navzájem ovlivňují částice pro modifikaci tření a tuhá maziva. Jako první bylo testováno chování směsí s nízkým obsahem částic (méně než 15 hm. %). Graf na obr. 5-14 zachycuje vliv 1–5 hm. % grafitu na směs plastického maziva s 8 hm. % částic oxidu hlinitého (10  $\mu\text{m}$ ):



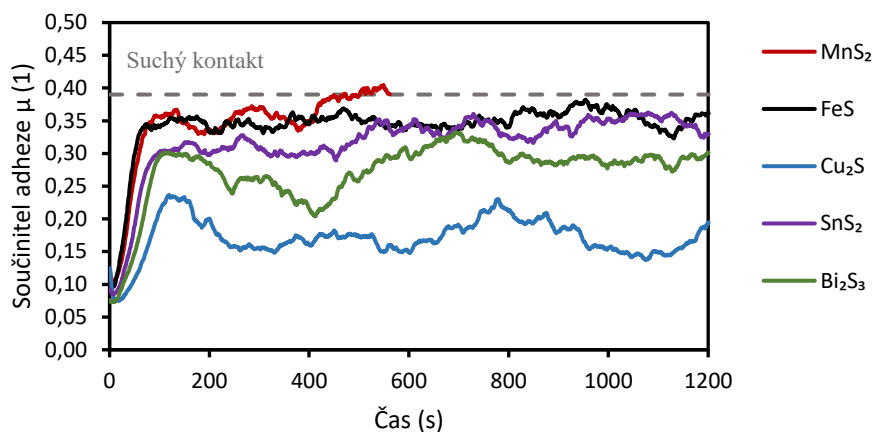
obr. 5-14 Vliv příměsí různého množství grafitu na 8% směs oxidu hlinitého.

V grafu je možné pozorovat mírný pokles součinitele adheze s rostoucím hm. % grafitu. Následně byly testovány směsi obsahující 7 hm. % oxidu hlinitého a 1–5 hm. % grafitu či disulfidu molybdenu:



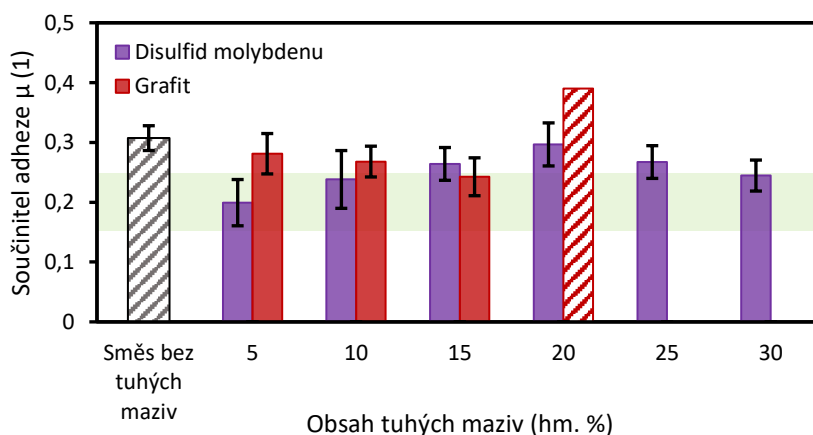
obr. 5-15 Vliv příměsí různého množství tuhých maziv na 7% směs oxidu hlinitého.

V případě měření směsí obsahujících 7 hm. % oxidu hlinitého nebyla pozorována žádná jednoznačná závislost mezi součinitelem adheze a zvyšujícím se množstvím tuhých maziv. Mazací účinky disulfidu molybdenu byly ve třech případech lepší než grafitu a také téměř všechny směsi založené na tomto tuhém mazivu spadaly do intervalu optimálních hodnot součinitele adheze 0,15–0,25. Některé směsi (především 1 a 4 hm. % grafitu a 3 hm. % disulfidu molybdenu) vykazovaly poměrně velké směrodatné odchylky. Dále byly testovány 7% směsi oxidu hlinitého s 3% příměsí sulfidů kovů:



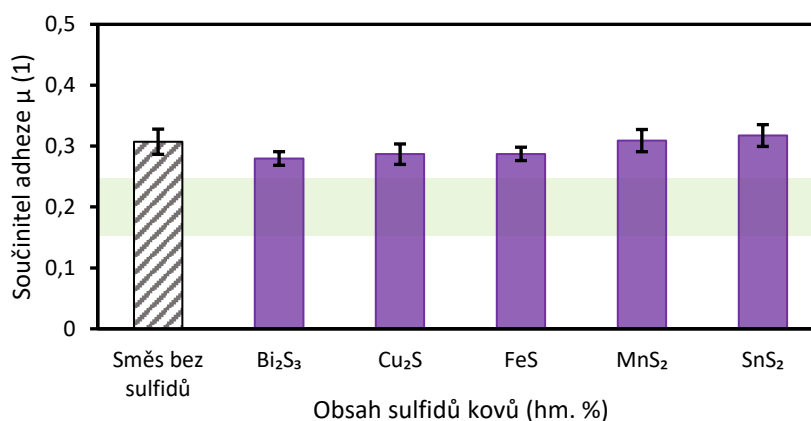
obr. 5-16 Vliv 3% příměsí sulfidů kovů na 7% směs oxidu hlinitého.

V grafu na obr. 5-16 lze sledovat rozdílné průběhy adhezních křivek jednotlivých sulfidů: zatímco při testování sulfidu manganatého došlo k obnově adheze na počáteční úroveň a experiment byl přerušen, v případě sulfidu měďného se součinitel adheze ustálil v intervalu optimálních hodnot. Mazací účinky jednotlivých částic přibližně odpovídají výsledkům získaným v předchozích etapách měření. Po měření nízkoprocentních směsí následovalo měření směsí s vysokým obsahem částic (vyšší než 15 hm. %). Jako první byl posuzován vliv různého množství grafitu a disulfidu molybdenu na směsi obsahující 10 hm. % částic oxidu hlinitého. Výsledky experimentů jsou patrné z grafu na obr. 5-17:



obr. 5-17 Vliv příměsí různého množství tuhých maziv na 10% směs oxidu hlinitého.

Vlivem rozdílného tvaru a velikosti částic a také hustoty záleží množství tuhého maziva, které je možné do směsi přimíchat, na jeho druhu. Zatímco v případě grafitu dochází k nasycení směsi při hmotnostním podílu 20 %, v případě disulfidu molybdenu se jednalo o 35 hm. %. Při překročení této hranice se z maziva stává kaše, která není již schopna vytvořit souvislý mazací film a je jen obtížně aplikovatelná skrz mikropipetu. V důsledku toho dochází k výraznému snížení mazacích účinků, které se v případě směsi obsahující 20 hm. % grafitu a 10 hm. % částic oxidu hlinitého projevilo obnovou adheze na počáteční úroveň chvíli po spuštění experimentu. Je zřejmé, že nad vymezenou hranici nemá smysl dále navyšovat množství daného maziva ve směsi. Také tyto experimenty prokázaly nepatrně lepší mazací účinky disulfidu molybdenu z hlediska dosahovaného součinitele adheze. Jako poslední byl v rámci této etapy zkoumán vliv příměsi 20 hm. % sulfidů kovů v 10% směsi částic oxidu hlinitého. Výsledky experimentů jsou znázorněny v grafu na obr. 5-18, v grafu je zobrazeno i referenční měření směsi bez příměsí sulfidů:



obr. 5-18 Vliv 20% příměsí sulfidů kovů na 10% směs oxidu hlinitého.

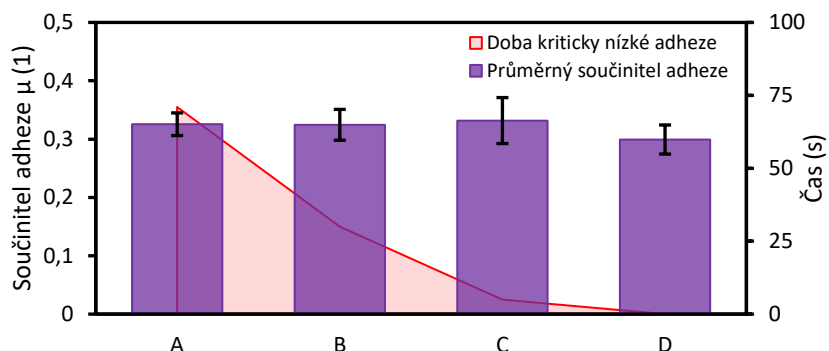
Všechny experimenty se vyznačovaly poměrně stabilním průběhem s nízkou směrodatnou odchylkou, na druhou stranu se nezdá, že by příměs sulfidů výrazným způsobem ovlivňovala adhezi – směsi obsahující sulfidy dosahovaly podobného součinitele adheze jako referenční směs obsahující pouze oxid hlinitý. Všechny testované směsi ležely mimo interval optimálních hodnot.

## 5.5 Návrh složení nového maziva

Návrh složení nového maziva probíhal na základě výsledku prezentovaných v předešlém textu. Z hlediska obsahu částic lze maziva rozdělit na kompozice s nízkým (do 15 hm. %) a vysokým (nad 15 hm. %) obsahem částic. Kompozice dále obsahují plastické mazivo BECHEM Ecorail 2009, 1–2 tuhá maziva a oxid hlinitý (není-li uvedeno jinak, jedná se o částice o velikosti 10  $\mu\text{m}$ ). Prvotním kritériem pro hodnocení byl průměrný součinitel

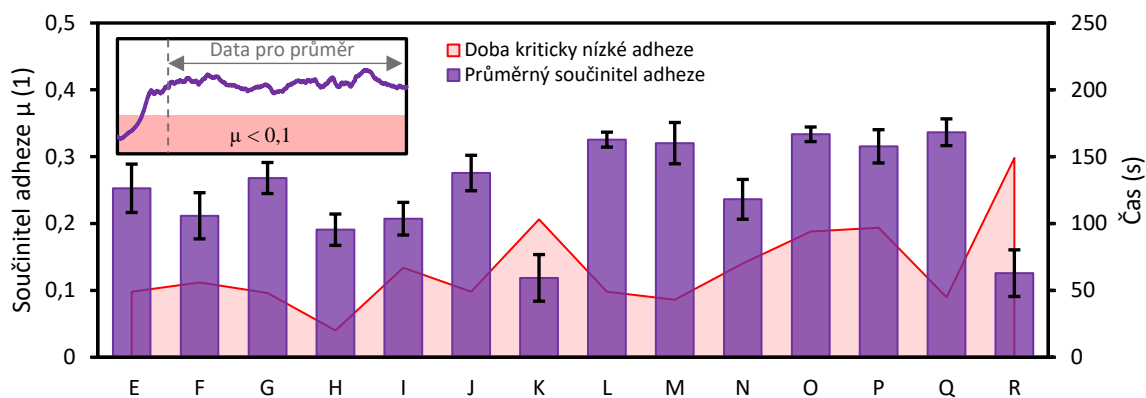
adheze, který byl počítán z hodnot po ustálení (po prvních 200 s). Vyhovující kompozice byly dále hodnoceny na základě průběhu adhezní křivky (stabilita, délka mazacích účinků, délka propadu adheze v důsledku prvotního přemazání). Podrobné složení všech testovaných kompozic je uvedeno v Příloze 2.

Jako první byly testovány kompozice založené na patentu [28]. Dosažené průměrné součinitele adheze testovaných kompozic a dobu potřebnou pro obnovu adheze z kriticky nízkých hodnot ( $\mu < 0,1$ ) lze vidět v grafu na obr. 5-19:



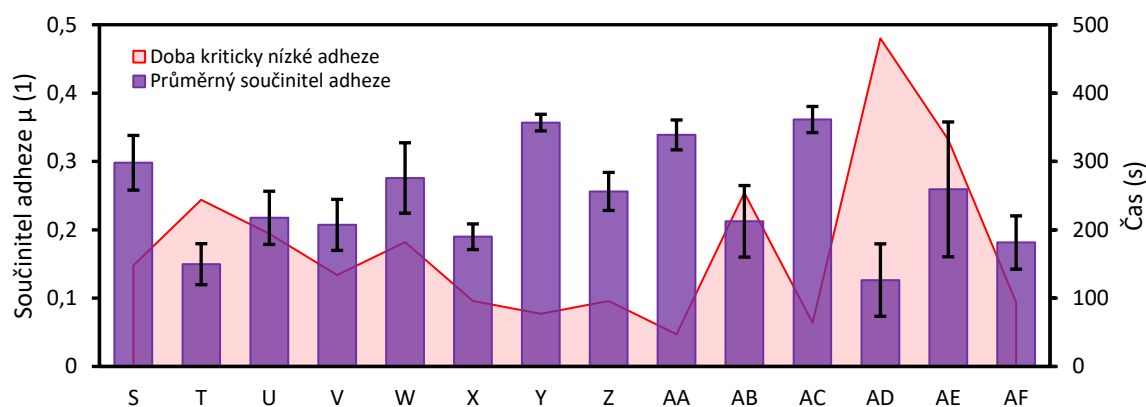
obr. 5-19 Testování kompozic A–D založených na patentu [28].

Testované kompozice obsahovaly 10–25 hm. % oxidu hlinitého a 5 hm. % grafitu. Průměrný součinitel adheze všech kompozic je však příliš velký, v dalším kroku byly proto testovány kompozice obsahující nižší množství částic (do 15 hm. %), viz obr. 5-20 a 5-21:



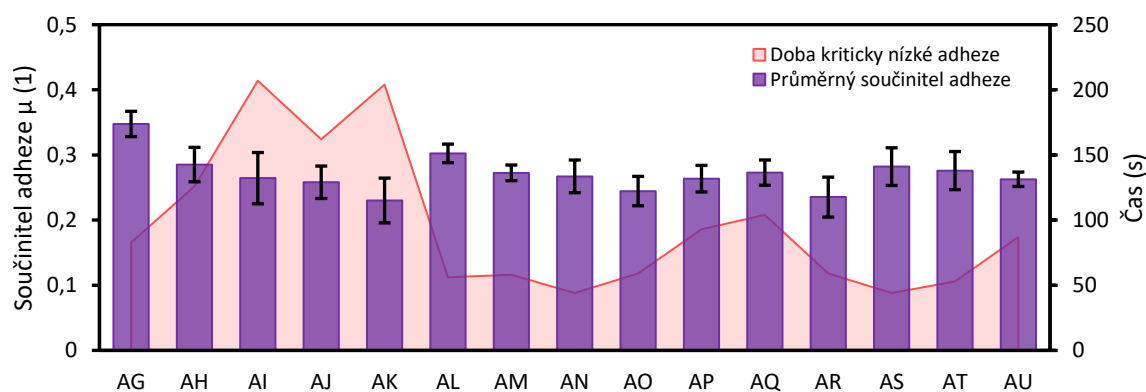
obr. 5-20 Testování kompozic s nízkým obsahem částic E–R.

Celkem 9 z 28 testovaných kompozic vedlo k průměrnému součiniteli adheze ležícímu v intervalu 0,15–0,25. Kompozice K, R, T a AD se vyznačovaly velmi nízkou adhezí, zbylé kompozice naopak příliš vysokou. V průběhu měření kompozice AC došlo k obnově adheze na původní úroveň a experiment byl přerušen. Nejvyšší směrodatné odchylky dosáhla kompozice AE, což bylo dáno pomalým nárůstem součinitele adheze. Zdaleka nejdelší doby obnovy adheze z kriticky nízkých hodnot dosáhla směs AD sestávající z 2 hm. % oxidu hlinitého, 3 hm. % sulfidu cínického a 2,5 hm. % disulfidu molybdenu.

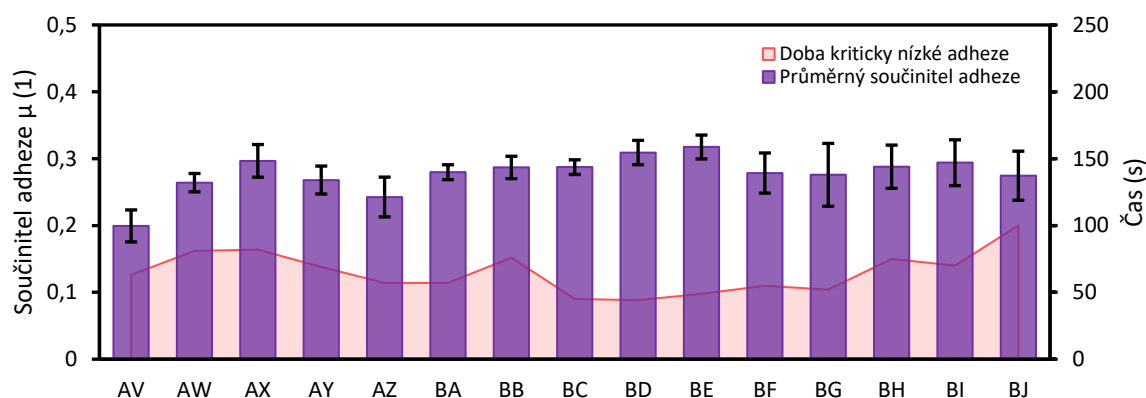


obr. 5-21 Testování kompozic s nízkým obsahem částic S–AF.

V další fázi byly testovány kompozice s vysokým obsahem částic. Výsledky měření celkem třiceti směsí jsou patrné z grafů na obr. 5-22 a 5-23. Ukázalo se, že množství částic, které je možné v plastickém mazivu rozmíchat, je omezené a záleží na typu částic.



obr. 5-22 Testování kompozic s vysokým obsahem částic AG–AU.

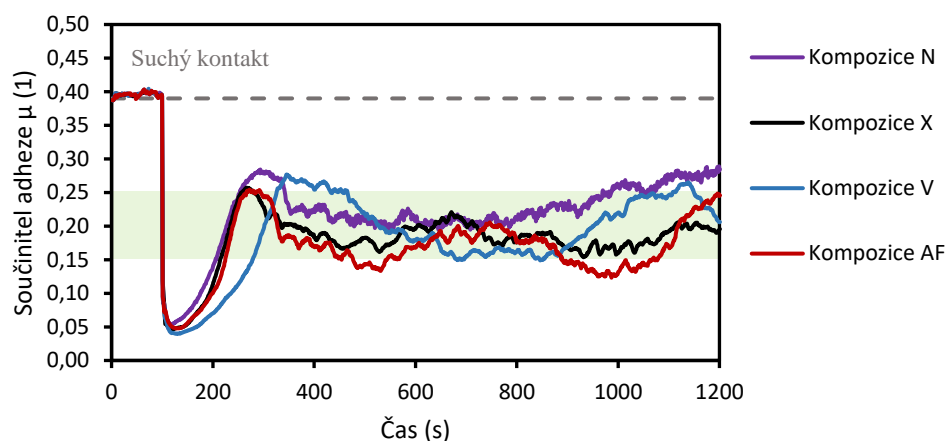


obr. 5-23 Testování kompozic s vysokým obsahem částic AV–BJ.

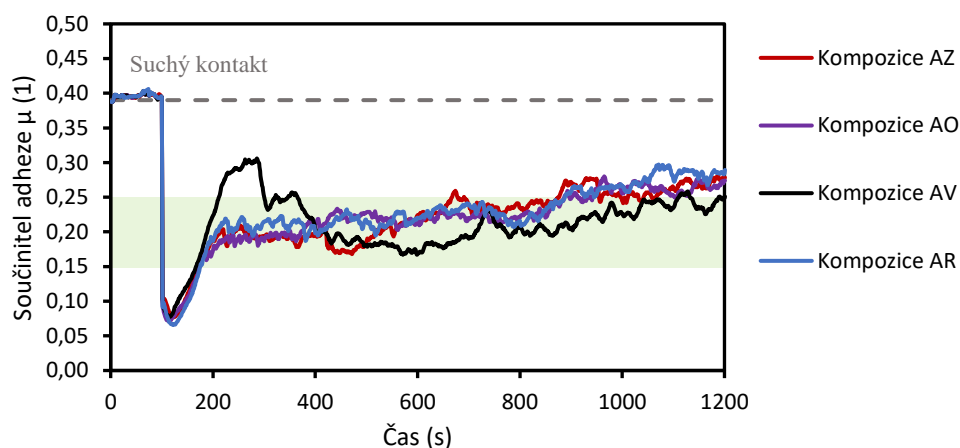
Po překročení určité hranice se z maziva stává směs natolik viskózní, že už není dále schopna vytvořit souvislý mazací film. Navyšování obsahu částic nad tuto hranici je tedy kontraproduktivní. Oproti kompozicím s nízkým obsahem částic vedou vysokoprocenní

kompozice obecně k vyšší adhezi, průběh součinitele adheze je však stabilnější a drží jasný trend. S průměrným součinitelem adheze 0,35 dosáhla nejhorsích mazacích účinků směs AG. Nejdělnějších časů obnovy adheze z kriticky nízkých hodnot dosáhly kompozice AI, AJ a AK.

Na základě prezentovaných výsledků byly do užšího výběru zařazeny čtyři nízkoprocentní a čtyři vysokoprocentní směsi, z nichž byla vybrána tři možná finální složení nového maziva. Kromě průměrného součinitele adheze a doby obnovy adheze byly kompozice hodnoceny s ohledem na individuální průběhy adhezních křivek, které jsou pro všechny vybrané směsi zaznamenány v grafech na obr. 5-24 a 5-25:



obr. 5-24 Adhezní křivky vybraných nízkoprocentních kompozic.



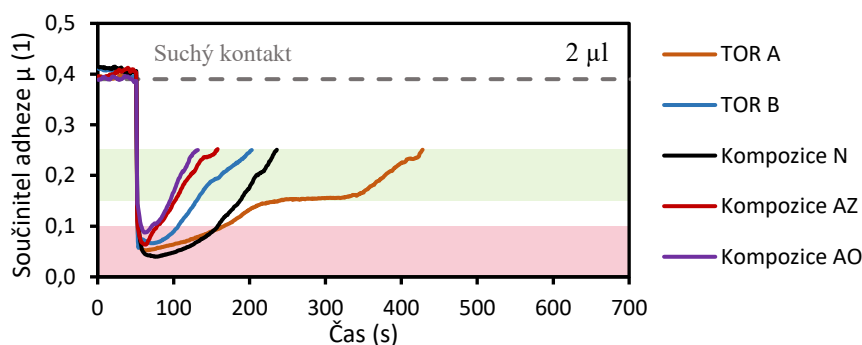
obr. 5-25 Adhezní křivky vybraných vysokoprocentních kompozic.

Z nízkoprocentních směsí dosahovala nejstabilnějšího součinitele adheze a také nejkratšího času obnovy adheze z kriticky nízkých hodnot kompozice N (3 hm. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 7 hm. %  $\text{Cu}_2\text{S}$  + 1 hm. %  $\text{MoS}_2$ ). Z vysokoprocentních směsí došlo k nejrychlejší obnově adheze v případě kompozice AV (10 hm. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 5 hm. %  $\text{MoS}_2$ ), z hlediska stability průběhu dosahovaly však lepších výsledků kompozice AZ (10 hm. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 15 hm. % grafit) a AO (10 hm. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 30 hm. %  $\text{MoS}_2$ ). Jako možné finální složení nového maziva pro temeno

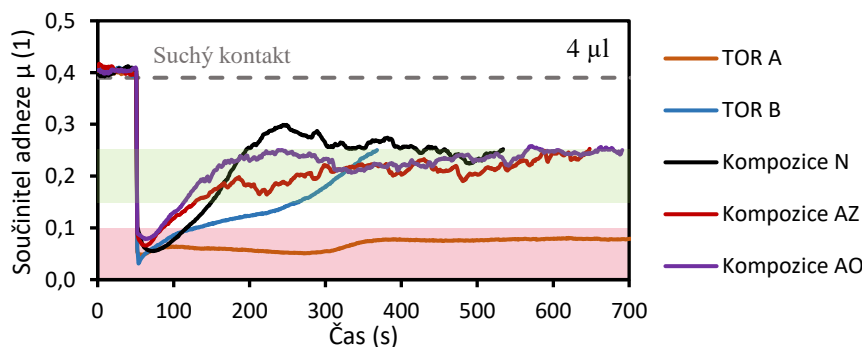
kolejnice byly na základě prezentovaných výsledků a zvolených kritérií vybrány kompozice N, AZ a AO.

## 5.6 Komparační testy

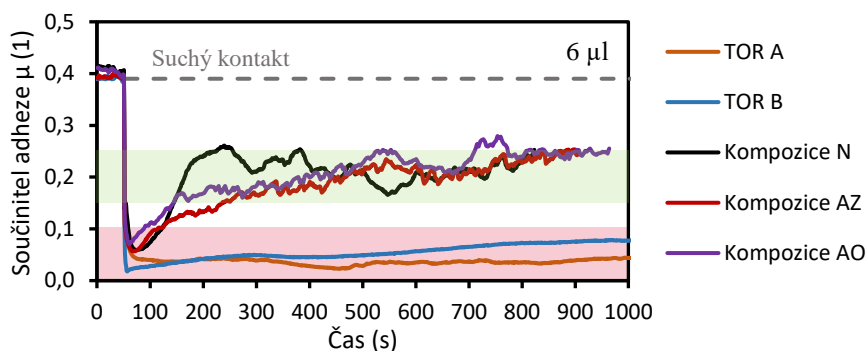
Vybrané kompozice byly porovnány se dvěma komerčními mazivy, která budou dále v této práci označována jako „TOR A“ a „TOR B“. Maziva byla porovnáována z hlediska dosahované adheze a nad rámec původního cíle diplomové práce také z hlediska redukce opotřebení. Adhezní testy probíhaly za stejných podmínek jako všechny předešlé testy, kromě množství 4  $\mu\text{l}$  však byly provedeny testy i pro množství 2  $\mu\text{l}$  a 6  $\mu\text{l}$ . Průběhy všech experimentů jsou zachyceny v grafech na obr. 5-26, 5-27 a 5-28. Měření bylo přerušeno při překročení horní hranice intervalu požadovaných hodnot součinitele adheze 0,25. Sledována byla jednak doba trvání optimálních adhezních podmínek, ale i doba, po kterou byl součinitel adheze nižší než 0,1. Z grafů je patrné, že zatímco komerční maziva vykazovala nejlepší výsledky při aplikovaném množství 2 nebo 4  $\mu\text{l}$ , účinek navržených kompozic byl nejlepší při 6  $\mu\text{l}$ .



obr. 5-26 Srovnání kompozic s komerčními mazivy – 2  $\mu\text{l}$ .

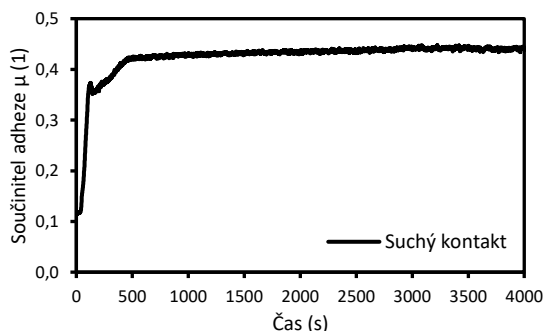


obr. 5-27 Srovnání kompozic s komerčními mazivy – 4  $\mu\text{l}$ .

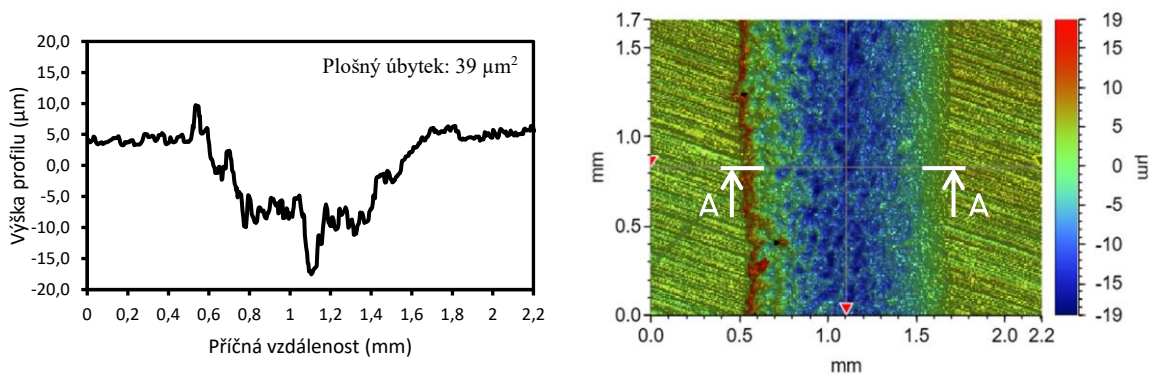


obr. 5-28 Srovnání kompozic s komerčními mazivy – 6  $\mu$ l.

Pro testy opotřebení bylo vybráno mazivo TOR A, které při množství 2  $\mu$ l vykazovalo nejlepší výsledky ze všech maziv, nízkoprocenní kompozice N a vysokoprocenní kompozice AO. Pro urychlení opotřebení probíhaly testy na discích z měkké oceli C12, která je zároveň svými vlastnostmi bližší skutečným železničním materiálům. Experimenty trvaly 60 minut a každému z nich předcházel 8 minutový záběh. Mazivo bylo do kontaktu vpravováno v množství 2  $\mu$ l pro navržené kompozice a v množství 1  $\mu$ l pro komerční mazivo (toto množství se ukázalo jako optimální pro daný produkt), a to vždy při překročení hodnoty součinitele adheze 0,25. Nejprve byl proveden referenční experiment se suchým kontaktem:

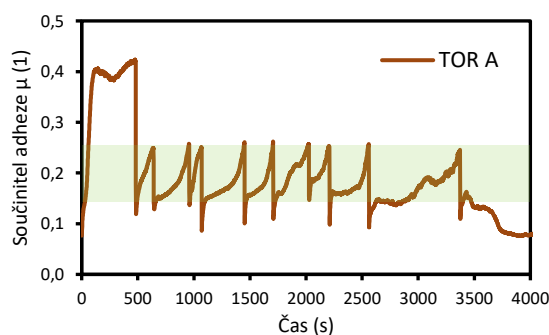


obr. 5-29 Součinitel adheze v průběhu testu opotřebení – suchý kontakt.

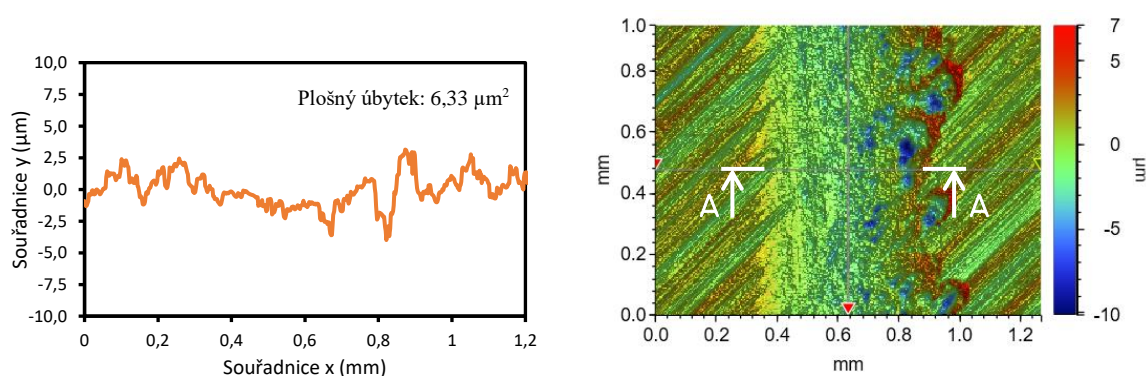


obr. 5-30 Testy opotřebení pro suchý kontakt – profil drážky (vlevo) a snímek povrchu disku (vpravo).

V grafu na obr. 5-29 lze vidět vývoj součinitele adheze v průběhu testu, na obr. 5-30 pak lze pozorovat drážku, která se utvořila v průběhu testu na povrchu disku a její příčný řez. Analytickým výpočtem byl v tomto řezu zjištěn plošný úbytek  $39 \mu\text{m}^2$ , šířka drážky byla stanovena na 1,09 mm. Hmotnostní úbytek na celém disku činil 17,5 mg. Součinitel adheze byl po čas měření poměrně stabilní a jeho ustálená hodnota se pohybovala jen nepatrně nad ustálenou hodnotou pro ložiskovou ocel. Tyto naměřené hodnoty budou nadále sloužit jako reference pro měření maziv. Jako první bylo měřeno mazivo TOR A:



obr. 5-31 Součinitel adheze v průběhu testu opotřebení – TOR A.

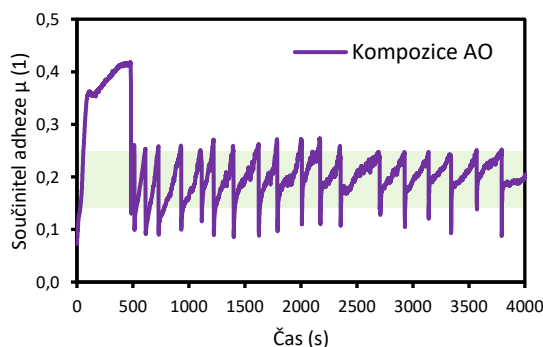


obr. 5-32 Testy opotřebení pro mazivo TOR A – profil drážky (vlevo) a snímek povrchu disku (vpravo).

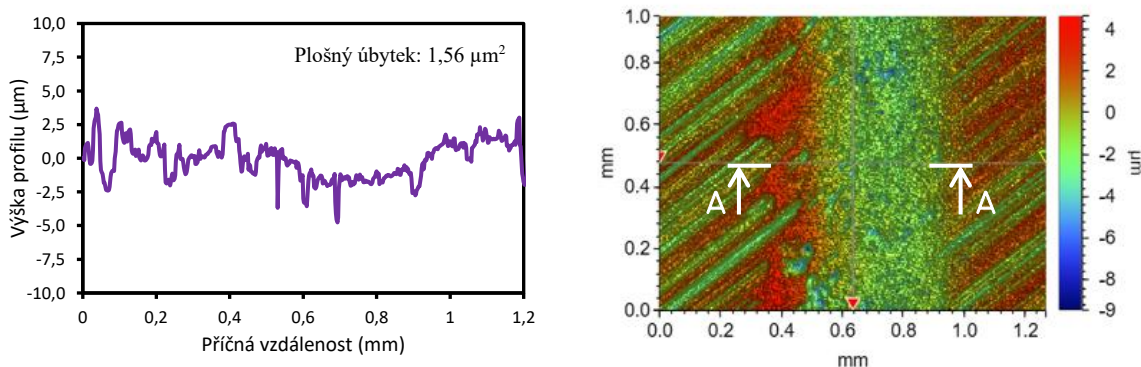
Mazivo bylo do kontaktu aplikováno celkem desetkrát. Po čas testu měl součinitel adheze tendenci růst, při desáté aplikaci však došlo k přemazání a zbytek experimentu probíhal za podmínek nízké adheze. Maziva TOR A výrazně snížilo parametry drážky oproti podmínkám suchého kontaktu: plošný úbytek ve vyznačeném řezu byl  $6,33 \mu\text{m}^2$ , šířka drážky 0,52 mm a hmotnostní úbytek na celém disku 5,3 mg.

Dále byla testována vysokoprocenní kompozice AO. Kompozice AO je vysoce viskózní a z počátku měla problém se v úzké drážce udržet – vlivem rychlosti a skluzu byla směs odstraněna z povrchu drážky prakticky před tím, než stihla vytvořit souvislý mazací film. Tento problém se však s rostoucí šířkou drážky zmenšoval. V případě kompozice AO nedošlo v průběhu měření k přemazání, viz graf na obr. 5-33. Z výsledků na obr. 5-34 lze vidět, že v tomto případě byl plošný úbytek nižší (oproti TOR A i suchém kontaktu),

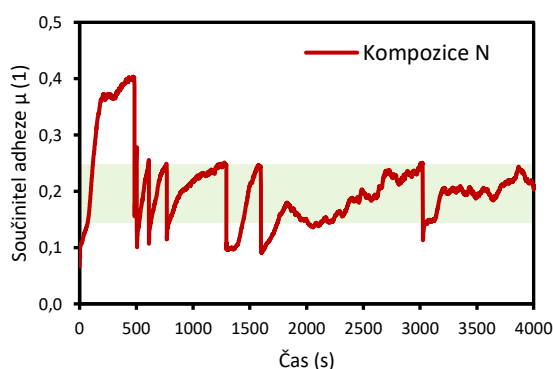
a to  $1,56 \mu\text{m}^2$ . Šířka drážky byla rovněž nižší –  $0,45 \text{ mm}$ , na druhou stranu hmotnostní úbytek na celém disku byl  $5,8 \text{ mg}$ . Výraznější rozdíl lze pozorovat v počtu aplikací maziva, viz graf na obr. 5-33:



obr. 5-33 Součinitel adheze v průběhu testu opotřebení – Kompozice AO.



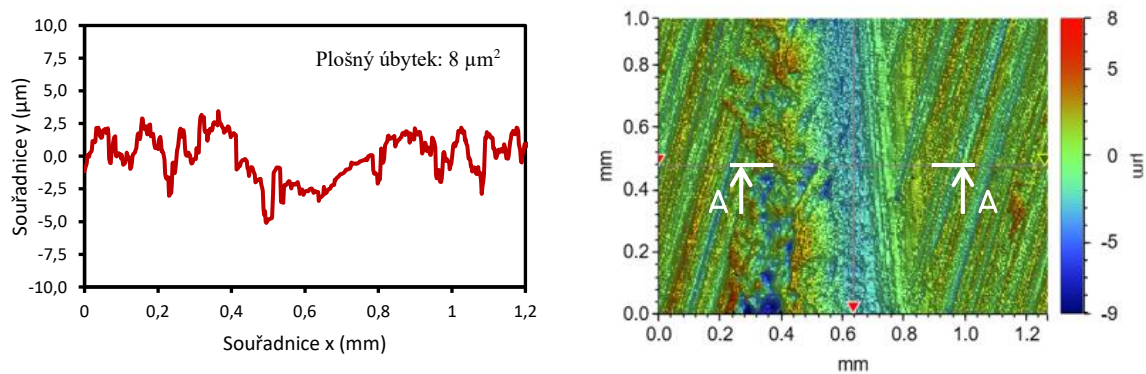
obr. 5-34 Testy opotřebení pro kompozici AO – profil drážky (vlevo) a snímek povrchu disku (vpravo).



obr. 5-35 Součinitel adheze v průběhu testu opotřebení – Kompozice N.

Na závěr byla testována nízkoprocentní kompozice N. Vývoj součinitele adheze po čas měření je v grafu na obr. 5-35. V tomto případě bylo oproti TOR A potřeba o dvě aplikace více – celkem byla kompozice N aplikována do kontaktu 7 krát. Díky nižší viskozitě však

v porovnání s kompozicí AO lépe přilnula k povrchu drážky a po čtvrté aplikaci již navozovala dlouhotrvající efekt. Snímek povrchu drážky a její profil lze vidět na obr. 5-36:



**obr. 5-36** Testy opotřebení pro kompozici N – profil drážky (vlevo) a snímek povrchu disku (vpravo).

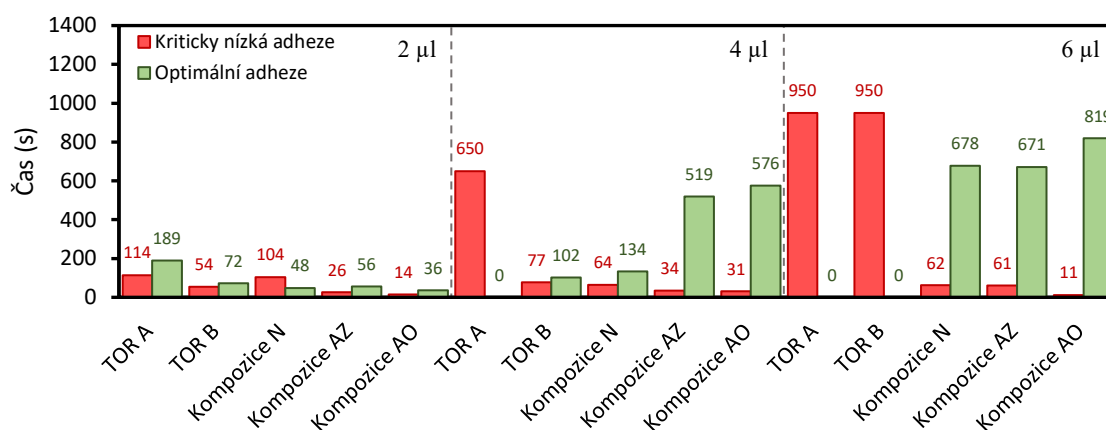
V tomto případě byl plošný úbytek ze všech testovaných maziv nejvyšší –  $8 \mu\text{m}^2$ . Na druhou stranu šířka drážky 0,41 mm a hmotnostní úbytek 6,6 mg jsou srovnatelné s ostatními mazivy.

## 6 DISKUZE

V rámci kapitoly Diskuze bude nejprve provedeno srovnání navržených kompozic s komerčními produkty. Následně bude rozebrán vliv jednotlivých složek na mazivo jako celek. Závěr kapitoly se bude věnovat limitům zvoleného experimentálního přístupu.

### 6.1 Srovnání s komerčními produkty

Ze 62 navržených kompozic byly vybrány nízkoprocentní kompozice N a dvě vysokoprocentní kompozice AO a AZ. Ty byly srovnány se dvěma komerčními mazivy, která jsou v této práci označována jako TOR A a TOR B. Jak je vidět v článku [9], účinky maziva pro temeno kolejnice jsou silně závislé na jeho aplikovaném množství. Z toho důvodu byly provedeny tři série adhezních testů, postupně pro 2, 4 a 6  $\mu\text{l}$ . Srovnání trvání kriticky nízké adheze ( $< 0,1$ ) a optimální adheze ( $0,15-0,25$ ) je v následujícím grafu:



obr. 6-1 Délky trvání sledovaných intervalů součinitele adheze při různých aplikovaných množstvích maziva.

Na základě grafu na obr. 6-1 je možné vyslovit několik závěrů:

- 1) Při aplikovaném množství 2  $\mu\text{l}$  dosahovalo nejlepších výsledků komerční mazivo TOR A.
- 2) Při 4  $\mu\text{l}$  došlo v případě maziva TOR A k přemazání. Toto množství se ukázalo jako optimální pro mazivo TOR B, které zajišťovalo součinitel adheze  $0,15-0,25$  po dobu 102 s. Na druhou stranu doba působení kompozic AZ a AO byla více než pětkrát delší při současné redukci kriticky nízké adheze na méně než polovinu.
- 3) Množství 6  $\mu\text{l}$  bylo pro komerční maziva naprosto nevhodné. Při tomto množství však bylo dosaženo vynikajících výsledků pro všechny navržené kompozice. Nejlépe si počínala kompozice AO, která zajišťovala požadovanou adhezi po dobu 819 s a současně doba kriticky nízké adheze činila pouze 11 s.

Tabulka 6-1 uvádí nejlepší dosažené výsledky pro každé mazivo/kompozici. Je zjevné, že nejlepších výsledků z hlediska adheze dosahovala kompozice AO při aplikovaném množství 6  $\mu\text{l}$ .

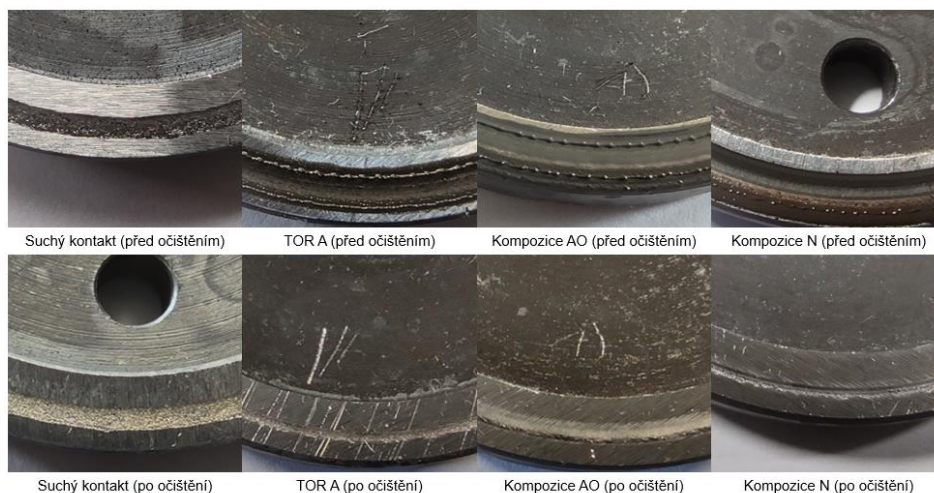
Označení	Aplikované množství ( $\mu\text{l}$ )	Požadovaná adheze (s)	Kriticky nízká adheze (s)
TOR A	2	189	114
TOR B	4	77	102
Kompozice N	6	678	62
Kompozice AZ	6	671	61
Kompozice AO	6	819	11

tab. 6-1 Přehled nejlepších dosažených výsledků pro všechna maziva/kompozice.

Testováním komerčních maziv, která podobně jako navržené kompozice obsahovala částice hliníku, mědi a zinku, se zabýval článek [15]. Výsledky jsou však porovnatelné pouze částečně, měření sice probíhalo na stejné aparatuře, ale za odlišných podmínek (viz také str. 22 a 23). Při 3% SRR a aplikovaném množství 1  $\mu\text{l}$  dosahovaly komerční produkty výdrže 180 a 220 cyklů a  $\mu < 0,1$  prakticky nenastal. Naproti tomu kompozice navržené v této práci udržovaly požadovanou míru adheze při aplikovaném množství 2  $\mu\text{l}$  a 2% SRR po dobu 800, 930 a 600 cyklů. Kriticky nízká adheze nastala v článku [15] pouze při experimentech s 1 % SRR. Z toho vyplývá, že se schopnost obnovy adheze zvyšuje s rostoucím skluzem (což je výhodné zejména při brzdění vozidla, při kterém je skluz vyšší než v průběhu jízdy).

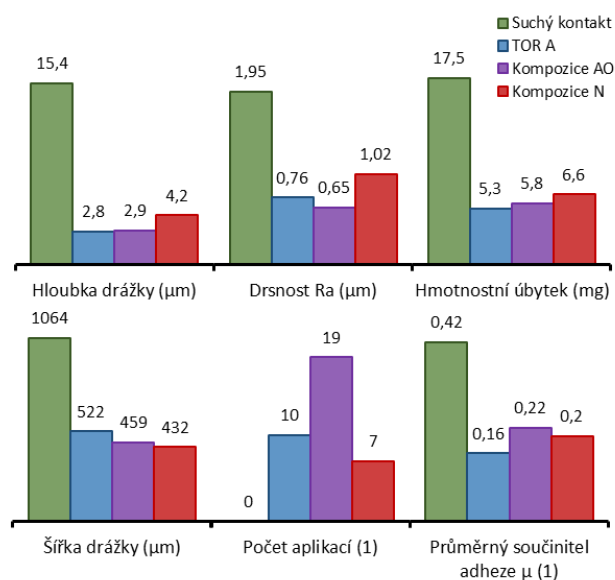
Všechny navržené kompozice prokázaly dobrou odolnost vůči přemazání (v rozsahu měřených aplikovaných množství 2–6  $\mu\text{l}$ ). Zdá se, že v případě komerčních produktů je kladen větší důraz na benefity, jako je redukce hluku, opotřebení a nižší spotřeba maziva na úkor zajištění adheze. Tomu nasvědčují například výsledky z článku [21], ve kterém byla měřena adheze komerčních modifikátorů tření na skutečné trati. Přestože hodnota suchého tření byla pro trať vyšší (0,42–0,55) než pro měření v této práci, po aplikaci produktů dosahoval průměrný součinitel adheze hodnot nižších než 0,15. Je si však nutné uvědomit, že na reálné trati kontakt neprobíhá opakovaně na jedné a té samé dráze – studie [20] ukázala, že vzdálenosti, na které jsou schopna kola vozidla mazivo roznést, dosahují řádově desítek až stovek metrů. Mazivo tedy není do kontaktu neustále doplňováno, jako v případě MTM, a riziko přemazání bude na reálné trati nižší. Ve stejné studii [20] však bylo zároveň dokázáno, že ke zhoršení schopnosti vozidla zabrzdit reálně dojít může. Aplikované množství maziva je tak neméně důležité, jako jeho složení.

V rámci testů opotřebení bylo hodnoceno šest hlavních parametrů: šířka, hloubka a  $Ra$  povrchu drážky, dále pak počet aplikací maziva, hmotnostní úbytek a průměrný součinitel adheze. Povrch kontaktních těles po skončení experimentu je vidět na obr 6-2:



obr. 6-2 Povrch disku po skončení experimentu.

Nejprve byl proveden referenční test pro suchý kontakt. Dle očekávání byly všechny parametry související s opotřebením pro suchý kontakt nejvyšší. Kontaktní tělesa byla vyrobena ze dvou materiálů: ložisková ocel AISI 52100 (kulička) a ocel C12 (disk). Ocel C12 by se měla díky nižší tvrdosti více blížit skutečným železničním materiálům. Průměrný součinitel adheze 0,42 pro kontaktní dvojici C12–AISI 52100 je v porovnání s 0,39 pro AISI 52100–AISI 52100 nepatrně vyšší. Podrobné výsledky jsou patrné z grafu na obr. 6-3:



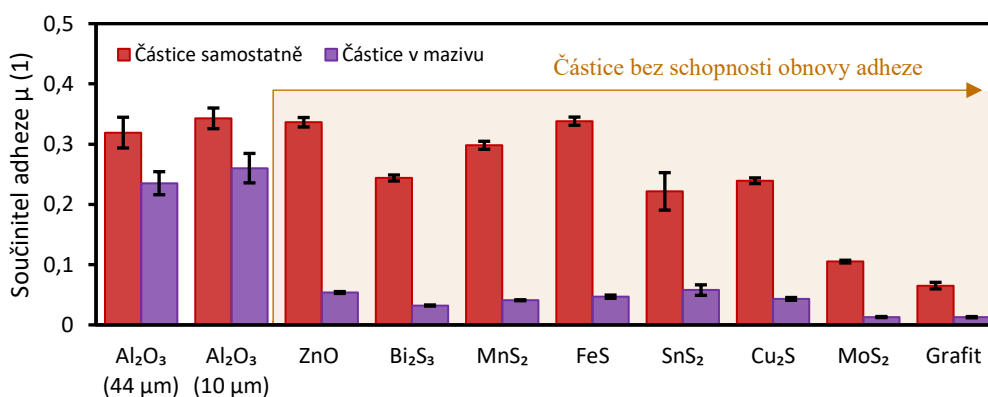
obr. 6-3 Výsledky testů opotřebení.

Po provedení referenčního testu se suchým kontaktem bylo následně testováno komerční mazivo TOR A, nízkoprocenní kompozice N a vysokoprocenní kompozice AO. Z hlediska

hodnocení opotřebení lze z grafu na obr. 6-3 vyčíst, že kompozice AO a mazivo TOR A dosahovaly podobných výsledků a v porovnání se suchým kontaktem pak všechny tři testované směsi výrazným způsobem redukovaly opotřebení z hlediska hmotnostního úbytku materiálu. Na druhou stranu ale přítomnost tvrdých částic zanáší do experimentu nový mechanismus opotřebení – abrazi. V případě suchého kontaktu za valivě–skluzových podmínek je dominantním mechanismem opotřebení adheze. Při vyhodnocení topografie povrchu disku však byly na jeho povrchu identifikovány rýhy, které odpovídají abrazivnímu opotřebení. Tvrdé částice  $\text{Al}_2\text{O}_3$  totiž rýhují povrch. To bylo ostatně pozorováno v článku [15] při použití maziv obsahujících částice hliníku a zinku, ale i také v případě maziva s obsahem  $\text{MoS}_2$  v [34] (abrazi nezpůsobil samotný disulfid molybdenu, ale až částice vzniklé oxidací v průběhu experimentu).

## 6.2 Vliv složek maziva na adhezi

Graf na obr. 6-4 srovnává průměrné součinitele adheze, kterých dosahovaly částice samostatně nebo v kombinaci s plastickým mazivem (částice  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{ZnO}$  byly v mazivu zastoupeny 15 hm. %, částice disulfidu molybdenu a grafitu 10 hm. % a zbylé sulfidy kovů 30 hm. %). Nejvyššího součinitele adheze bez přítomnosti základového maziva dosahovaly částice pro modifikaci tření, tedy částice hliníku a zinku. Toto zjištění je plně v souladu s literaturou – v [37] dosahoval  $\text{ZnO}$  nejvyššího součinitele adheze 0,5 ze všech částic (při  $\mu = 0,6$  pro suché tření). Článek [35] se zase zabýval částicemi  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – pro hodnotu suchého tření  $\mu = 0,6$  se součinitel adheze hliníkových částic pohyboval v rozmezí 0,4–0,5. Zároveň bylo prokázáno, že velikost částic nemá výrazný vliv na hodnotu ustálené adheze, jak je vidět i z grafu 6-4. Hodnoty z obou článků jsou oproti hodnotám uvedeným v grafu nepatrně vyšší, na druhou stranu i hodnota suchého tření 0,6 byla vyšší než  $\mu = 0,39$  stanovený při měření v této práci. Po zohlednění rozdílné aparatury a parametrů experimentu jsou výsledky v zásadě ve shodě.



obr. 6-4 Srovnání adheze v suchém a mazaném kontaktu.

Součinitel adheze grafitu byl téměř dvakrát nižší než MoS<sub>2</sub>. Podobných výsledků bylo dosaženo v článku [37], který probíhal na stejné aparatuře, ale při 5% SRR. Mazací účinky obou maziv dokládají testy komerčních produktů v [34], které zároveň ukázaly, že produkty založené na grafitu dosahují vyšší redukce adheze, než produkty obsahující MoS<sub>2</sub>. Ta však nebyla tak velká, hodnota  $\mu = 0,75$  pro suché tření byla snížena na 0,43 resp. 0,46 pro produkty založené na grafitu a 0,53 pro produkt obsahující MoS<sub>2</sub>. Nutno však dodat, že kromě uvedených maziv obsahovaly tyto produkty ještě další příměsi, například sulfidy mědi, které oproti grafitu dosahují více než trojnásobného součinitele adheze, viz. graf na obr. 6-4.

Součinitel adheze samotného maziva se pohyboval okolo hodnoty 0,2; viz graf na obr. 5-6 (strana 52). Podobných hodnot dosahovalo i olejové mazivo, které bylo měřeno v článku [36] na stejném tribometru MTM. Naproti tomu olej a plastické mazivo měřené na dvoudiskovém zařízení v [31] dosahovalo součinitele adheze 0,07 resp. 0,1. Lze však předpokládat, že hodnota suchého tření rovněž převyšovala hodnotu stanovenou pro tuto práci (článek neuvádí). V kombinaci s plastickým mazivem dosahovaly všechny částice výrazně nižší adheze než za sucha, což je dáno nízkou hodnotou  $\mu$  a dominantním hmotnostním podílem maziva. Jediné částice, u kterých byla prokázána schopnost obnovy adheze po počátečním přemazání, byly částice Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. V souladu s článkem [35] bylo také potvrzeno, že velikost a množství částic ovlivňují rychlost této obnovy, viz graf na obr. 5-9 (strana 54). Příměs částic hliníku o velikosti 44  $\mu\text{m}$  však nepřinesla výrazné zlepšení, které by ospravedlnilo použití více různých velikostí částic, viz graf na obr. 5-23 (strana 61). Ukázalo se, že parametrem, který rozhoduje o schopnosti obnovy adheze, není součinitel adheze dosahovaný částicemi za sucha. Zatímco částice ZnO a FeS dosahovaly adheze srovnatelné s částicemi Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, v kombinaci s plastickým mazivem byl jejich průměrný součinitel adheze více než 3x nižší. Patent [19] se zabývá alternativami ke klasickému pískování. Jako částice vhodné pro obnovu adheze uvádí látky s vysokou Mohsovou tvrdostí. To splňuje s Mohsovou tvrdostí 7 také písek, který se v dnešní době používá pro obnovu adheze v kontaminovaných kontaktech nejčastěji [17]. Při pohledu do tab. 4-1 (strana 40) je vidět, že tvrdost částic Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> je v porovnání s tvrdostí zbylých částic více než dvojnásobná. Na základě literatury a naměřených výsledků lze proto vyslovit závěr, že jedinými ze zkoumaných částic, které se hodí pro obnovu adheze, jsou částice Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a že o této schopnosti rozhoduje Mohsova tvrdost.

### 6.3 Limity studie

Jednou z odchylek laboratorního měření od podmínek reálné tratě byl materiál kontaktních těles. Ta byla vyrobena z ložiskové oceli AISI 52100, jejíž tvrdost se pohybuje okolo 800 HB pro kuličku a 700 HB pro disk [3]. Naproti tomu tvrdost železniční oceli se dle [1]

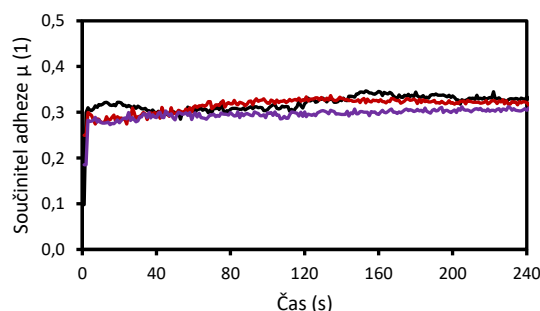
pohybuje mezi 250 HB (běžně) a 450 HB (pro speciálně ošetřené oceli). Ložisková ocel byla zvolena s ohledem na opotřebení kontaktních těles. V rámci prvotních měření bylo provedeno i několik experimentů s disky vyrobenými z měkké oceli. Po jednom či dvou experimentech však došlo k opotřebení, které již znemožňovalo další měření. Ložisková ocel sice není typickým železničním materiálem, na druhou stranu díky nižší míře opotřebení bylo možné provádět experimenty za stabilních kontaktních podmínek, jak bylo ukázáno během procesu návrhu metodiky měření. Podobný postup byl zvolen například v článku [37]. Nárůst parametrů drážky, jako je její šířka, hloubka nebo drsnost je v případě ložiskové oceli mnohem pozvolnější, a díky tomu bylo možné provést až 15–20 experimentů na jedné sadě kontaktních těles bez nutnosti jejich reprofilace a zároveň bylo zajištěno zachování stabilních a relevantních podmínek v průběhu každého experimentu.

Kromě materiálu se kontaktní tělesa od skutečnosti lišila i svou velikostí. Je zřejmé, že kontaktní oblast mezi kuličkou a diskem byla mnohonásobně menší, než mezi kolem a kolejnicí (kde se běžně pohybuje okolo 1 cm<sup>2</sup> [1]). Tato skutečnost byla zohledněna při výběru velikosti použitých částic. Zatímco například v [33] bylo pracováno s částicemi o velikosti v řádu stovek mikrometrů (měření probíhala na dvoudiskovém zařízení s větší kontaktní oblastí), velikost částic použitých v této práci až na výjimky nepřesahovala 10 μm. Velikost částic byla pro zachování relevantních podmínek přizpůsobena velikosti kontaktní oblasti na tribometru MTM. Pomocí elektronového mikroskopu bylo zjištěno, že částice v rozmezí 4–10 μm obsahovala i dvě komerční maziva, která byla testována na stejném tribometru MTM v článku [15].

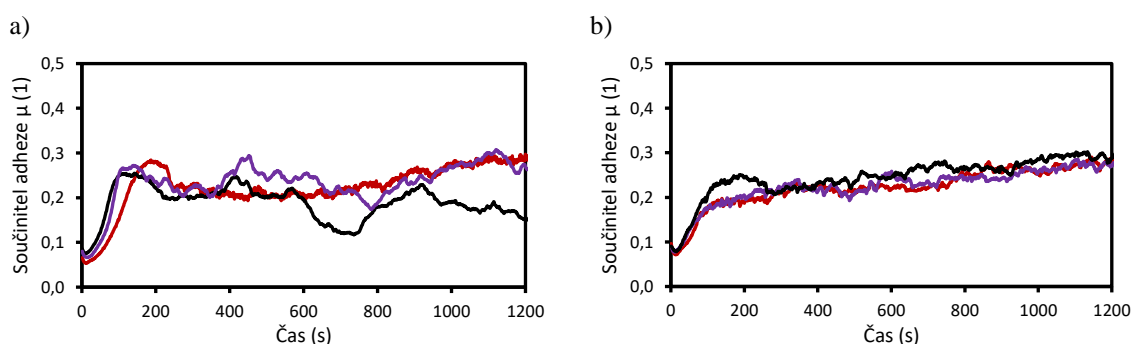
Rychlost byla volena s ohledem na režim mazání tak, aby co nejvěrněji replikovala podmínky reálné tratě (tedy aby byl zachován mezný či smíšený režim mazání). Typ režimu lze určit na základě Stribeckovy křivky, viz obr. 5-5 (strana 52). Nebylo však možné stanovit křivku přímo pro směs plastického maziva s částicemi, měření proto probíhalo na čistém základovém oleji. Parametr mazání vychází z velikosti nerovnosti třecích povrchů. Bylo uvažováno  $Rq = 0,2 \mu\text{m}$ . V průběhu měření se však  $Rq$  po většinu času pohybovala nad touto hodnotou v rozmezí 0,2–0,3 μm, což posouvá podmínky experimentu více do oblasti mezného režimu mazání. Při přepočítání parametru mazání pro podmínky reálné tratě se pak mezný režim mazání vyskytuje přibližně do rychlostí 1,2 m/s a smíšený režim mazání do rychlosti 8,5 m/s.

Pro potvrzení relevance naměřených výsledků byly provedeny testy opakovatelnosti. Vybrané experimenty byly třikrát zopakovány. Opakovatelnost měření samostatných komponent byla testována na částicích MnS<sub>2</sub>. Výsledky měření jsou zaznamenány v grafu na obr. 6-6. Zatímco nízkoprocentní kompozice N dosahovala průměrného součinitele adheze 0,22 se směrodatnou odchylkou 0,03; průměrný součinitel adheze vysokoprocentní kompozici AO byl 0,24 a měl směrodatnou odchylku 0,024, viz grafy na obr. 6-7. Při porovnání křivek v grafech na obr. 6-6 a 6-7 a jejich směrodatných odchylek lze vyvodit závěr, že se opakovatelnost měření zlepšuje s rostoucím podílem částic ve směsi – zatímco

při měření nízkoprocentní kompozice N (11 hm. % částic ve směsi) se průběhy adhezních křivek nepatrně lišily, v případě 40% kompozice AO nebo samostatných částic  $MnS_2$  byly křivky takřka identické.



obr. 6-6 Opakovatelnost měření částic  $MnS_2$ .



obr. 6-7 Opakovatelnost měření a) nízkoprocentní kompozice N a b) vysokoprocentní kompozice AO.

Navržené kompozice splňují požadavky na adhezi definované zadáním a redukuje opotřebení třecích povrchů. Před testováním maziva na reálné trati by však bylo na místě provést verifikační testy na dvoudiskovém zařízení, které oproti tribometru MTM disponuje menším modelovým zkreslením. Speciální pozornost by také měla být věnována testům opotřebení. Při testech provedených v této práci byly totiž používány koule z ložiskové oceli, která svou tvrdostí neodpovídá reálným materiálům. Tvrdé částice  $Al_2O_3$  mají tendenci pronikat do povrchu a iniciovat vznik trhlin. Zároveň také povrchy rýhují – abrazivní opotřebení představuje problém zejména u dávkovacích systému aplikačních jednotek. Z uvedených důvodů by bylo vhodné provést validační měření na vzorcích zhotovených ze skutečného kola či kolejniče.

Z hlediska složení by mazivo mohlo být doplněno o aditiva proti pění oleje a také o látky zajišťující sedimentační stabilitu. Rovněž by mohla být provedena finanční rozvaha – navržené kompozice obsahují různé množství a typ částic, kromě adhezních účinků a redukce opotřebení by v případě výběru jednoho finálního složení mohly sehrát roli i ekonomické náklady na výrobu maziva. Dalším možným pokračováním práce by mohlo být testování maziv za různých klimatických a environmentálních podmínek, což je oblast, která stále není v literatuře uspokojivě popsána.

## 7 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývala vývojem nového maziva pro mazání temena kolejnice. Modifikace tření v kolejové dopravě je téma aktuální zejména v dnešní době, kdy je kladen důraz na snižování uhlíkové stopy a šetrnost k životnímu prostředí. Přestože řada publikací potvrzuje pozitivní vliv maziv pro temeno kolejnice na optimalizaci adheze, redukci hluku a opotřebení, v době vzniku práce nebyl dohledatelný jediný článek, který by se podrobněji věnoval složení těchto maziv. Předložená diplomová práce si tedy kromě vyvinutí nového maziva klade za cíl zodpovědět otázky týkající se složení těchto maziv.

Teoretická část práce je založena na vědeckých článcích zabývajících se laboratorním i terénním testováním maziv. Poznatky o složení byly čerpány zejména z patentů a katalogů k příbuzným produktům, jako jsou modifikátory tření nebo maziva pro okolky. Na základě těchto literárních zdrojů byly identifikovány možné složky budoucího maziva. V první fázi měření se ukázalo, že volba parametrů experimentu výrazným způsobem ovlivňuje dosažené výsledky. Pro získání relevantních výsledků tedy bylo nejprve nezbytné vyvinout metodiku měření, která by definovala postup při měření, ale i parametry experimentu nebo práci s kontaktními tělesy.

Měření ukázalo, že by mazivo mělo sestávat především ze tří složek: olejové báze, částic pro modifikaci tření a tuhých maziv. S ohledem na šetrnost k životnímu prostředí bylo jako báze zvoleno biodegradabilní plastické mazivo pro mazání železničních okolků. Role částic pro modifikaci tření spočívá v obnově adheze z nízkých hodnot po počátečním přemazání. Nejlepších výsledků bylo dosaženo použitím částic oxidu hlinitého. Po tom, co je olejová báze vytlačena pryč z kontaktu, probíhá mazání nadále přes mezný mazací film, který zajišťují tuhá maziva. Jako nejvhodnější mazivo byl identifikován grafit a disulfid molybdenu.

Bylo navrženo přes šedesát různých složení, ze kterých byly vybrány tři nejlepší pro porovnání s komerčními mazivy. Maziva byla testována z hlediska adheze a nad rámec zadání práce i z hlediska redukce opotřebení. Cíle práce byly splněny v plném rozsahu. Navržená maziva prokázala odolnost vůči přemazání a z hlediska požadované adheze byly jejich účinky v porovnání s komerčními produkty delší. Na druhou stranu však vyžadovala vyšší aplikované množství. Z hlediska opotřebení byla navržená maziva srovnatelná s komerčními a v nejlepším případě bylo dosaženo redukce (vztaženo k hmotnostním úbytku materiálu) až o dvě třetiny (vůči suchému tření).

Možné pokračování práce by se mohlo zabývat vlivem maziv pro temeno kolejnice na redukci hluku. Jedná se o téma aktuální zejména v městské zástavbě, které nebylo doposud uspokojivě vyřešeno. Maziva jsou vyvíjena a testována v čistých laboratorních podmínkách. Bylo by také zajímavé zjistit, jakým způsobem jejich účinek ovlivňuje přítomnost různých kontaminantů, které se na trati běžně vyskytují.

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] LEWIS, Roger a Ulf OLOFSSON. *Wheel-rail interface handbook*. Cambridge: Boca Raton: Woodhead: CRC Press, 2009. ISBN 978-1-84569-412-8.
- [2] LEWIS, R., P. CHRISTOFOROU, W. J. WANG, A. BEAGLES, M. BURSTOW a S. R. LEWIS. Investigation of the influence of rail hardness on the wear of rail and wheel materials under dry conditions (ICRI wear mapping project). *Wear*. 2019, **430–431**(January), 383–392. ISSN 00431648.
- [3] KVARDA, D. *Vliv složení modifikátorů tření na trakci v kontaktu kola a kolejniče*. B.m., 2017. Vysoké učení technické v Brně.
- [4] *SOUČINITEL TŘENÍ - Portál pro strojní konstruktéry* [online]. [vid. 2020-05-31]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/soucinitel-treni>
- [5] ZHU, Y. *Adhesion in the wheel-rail contact. Doctoral thesis*. 2011. ISBN 9789175011813.
- [6] GALAS, R. Friction Modification within Wheel-Rail Contact. 2017, 110.
- [7] CHEN, Hua, Makoto ISHIDA, Akira NAMURA, Koan Sok BAEK, Tsunamitsu NAKAHARA, Bruno LEBAN a Massimiliano PAU. Estimation of wheel/rail adhesion coefficient under wet condition with measured boundary friction coefficient and real contact area. *Wear*. 2011, **271**(1–2), 32–39. ISSN 00431648.
- [8] SHIMIZU, Yasunori a Hugh A. SPIKES. The Influence of Slide–Roll Ratio on ZDDP Tribofilm Formation. *Tribology Letters*. 2016, **64**(2), 1–11. ISSN 10238883.
- [9] STOCK, R., L. STANLAKE a C. et al. HARDWICK. Material concepts for top of rail friction management – classification , characterization and application . *Wear*. 2016, **366–66 C.**, 225–232.
- [10] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE, Richard G. BUDYNAS, Martin HARTL a Miloš VLK. *Konstruování strojních součástí*. xxv. Brno: VUTIUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [11] OMASTA, Milan, Martin MACHATKA, David SMEJKAL, Martin HARTL a Ivan KŘUPKA. Influence of sanding parameters on adhesion recovery in contaminated wheel-rail contact. *Wear*. 2015, **322–323**, 218–225. ISSN 00431648.
- [12] HARMON, M. a R. LEWIS. Review of top of rail friction modifier tribology. *Tribology - Materials, Surfaces and Interfaces*. 2016, **10**(3), 150–162. ISSN 1751584X.
- [13] VALEHRACH, Jan, Petr GUZIUR, Tomas RIHA a Otto PLASEK. Assessment of rail long-pitch corrugation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, **236**(1). ISSN 1757899X.
- [14] EADIE, Donald T., Joe KALOUSEK a Kelvin C. CHIDDICK. The role of high positive friction (HPF) modifier in the control of short pitch corrugations and related phenomena. *Wear*. 2002, **253**(1–2), 185–192. ISSN 00431648.
- [15] GALAS, Radovan, Milan OMASTA, Ivan KRUPKA a Martin HARTL. Laboratory investigation of ability of oil-based friction modifiers to control adhesion at wheel-rail interface. *Wear*. 2016, **368–369**, 230–238. ISSN 00431648.

- [16] ARIAS-CUEVAS, O., Z. LI a R. LEWIS. Investigating the lubricity and electrical insulation caused by sanding in dry wheel-rail contacts. *Tribology Letters*. 2010, **37**(3), 623–635. ISSN 10238883.
- [17] LEWIS, R. a R. S. DWYER-JOYCE. Wear at the wheel/rail interface when sanding is used to increase adhesion. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2006, **220**(1), 29–41. ISSN 09544097.
- [18] KALOUSEK, JOSEPH ; SCOTT, ROBERT THOMAS ; LAMBA, HARINDER SINGH ; HOU, Keping. LOCOMOTIVE ADHESION ENHANCING MATERIAL MIXTURES. CA 2227351. 2003. Canada.
- [19] SCOTT, Robert Thomas., Harinder Singh LAMBA, Downers GROVE, Joseph KALOUSEK a Keping HOU. LOCOMOTIVE ADHESION ENHANCING MATERIAL MIXTURES. 5,919,295. 1999. Unites States of Americ.
- [20] GALAS, Radovan, M. OMASTA, M. KLAPKA, S. KAEWUNRUEN, I. KRUPKA a M. HARTL. Case study: The influence of oil-based friction modifier quantity on tram braking distance and noise. *Tribology in Industry*. 2017, **39**(2), 198–206. ISSN 03548996.
- [21] LU, X., J. COTTER a D. T. EADIE. Laboratory study of the tribological properties of friction modifier thin films for friction control at the wheel/rail interface. *Wear*. 2005, **259**(7–12), 1262–1269. ISSN 00431648.
- [22] ALDAJAH, Saud, Oyelayo O. AJAYI, George R. FENSKE a Sudhir KUMAR. Investigation of top of rail lubrication and laser glazing for improved railroad energy efficiency. *Journal of Tribology*. 2003, **125**(3), 643–648. ISSN 07424787.
- [23] SZABLEWSKI, Daniel, Joseph LOPRESTI a Tony SULTANA. Testing of latest top-of-rail friction modification materials at FAST Reproduced with permission of the copyright owner . Further reproduction prohibited without permission . *Railway Track and Structures*. 2015, **111**(3), 13.
- [24] ABBASI, Saeed, Anders JANSSON, Ulf SELLGREN a Ulf OLOFSSON. Particle emissions from rail traffic: A literature review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2013, **43**(23), 2511–2544. ISSN 10643389.
- [25] ABBASI, Saeed, Ulf OLOFSSON, Yi ZHU a Ulf SELLGREN. Pin-on-disc study of the effects of railway friction modifiers on airborne wear particles from wheel-rail contacts. *Tribology International*. 2013, **60**, 136–139. ISSN 0301679X.
- [26] IGRALUB. *HeadLub ® 90* [online]. 2015. Dostupné z: <https://www.sklenar-tribotechnika.cz/userfiles/files/Technický-list-HeadLub-90.pdf>
- [27] *TRAM-SILENCE 00 | Mazací tuky | FUCHS OIL CORP. (CZ), SPOL. S R. O* [online]. [vid. 2020-12-28]. Dostupné z: <https://www.fuchs.com/cz/cs/produkt/product/70779-tram-silence-00/>
- [28] CHIDDICK, Kelvin, Alejandro MEDRANO a Randall KRINKER. POSITIVE FRICTION CONTROL COMPOSITION FOR RAILWAYS. CA 2894931. 2014. Canada.
- [29] BECHEM, Carl. *BECHEM Ecorail 2009*. 6400009. 2016.
- [30] LUBCON. SINTONO TERRA HLK 1 [online]. 2016. Germany. Dostupné z: <http://www.lubcon.com>

- [31] CHEN, H., S. FUKAGAI, Y. SONE, T. BAN a A. NAMURA. Assessment of lubricant applied to wheel/rail interface in curves. *Wear*. 2014, **314**(1–2), 228–235. ISSN 00431648.
- [32] SONE, Yasutomo a Junichi SUZUMURA. Fundamental study on the application of traction oil as a wheel/rail lubricant. *Quarterly Report of RTRI (Railway Technical Research Institute) (Japan)*. 2010, **51**(1), 12–17. ISSN 00339008.
- [33] CHIDDICK, Kelvin. Solid lubricants and friction modifiers for heavy loads and rail application. 6,136,757. 2000. United states Patent.
- [34] FASIHI, Panahsadat, Olivia KENDALL, Ralph ABRAHAMS, Peter MUTTON, Quan LAI, Cong QIU a Wenyi YAN. Effect of graphite and MoS<sub>2</sub> based solid lubricants for application at wheel-rail interface on the wear mechanism and surface morphology of hypereutectoid rails. *Tribology International*. 2021, **157**(January), 106886. ISSN 0301679X.
- [35] SHI, L.B., Q. LI, D. KVARDA, R. GALAS, M. OMASTA, W.J. WANG, J. GUO a Q.Y. LIU. Study on the wheel/rail adhesion restoration and damage evolution in the single application of alumina particles. *Wear*. 2019, **426–427**(Elsevier B.V), 1807–1819. ISSN 00431648.
- [36] ZHU, Y., U. OLOFSSON a K. PERSSON. Investigation of factors influencing wheel-rail adhesion using a mini-traction machine. *Wear*. 2012, **292–293**, 218–231. ISSN 00431648.
- [37] GALAS, Radovan, Daniel KVARDA, Milan OMASTA, Ivan KRUPKA a Martin HARTL. The role of constituents contained in water-based friction modifiers for top-of-rail application. *Tribology International*. 2018, **117**(August 2017), 87–97. ISSN 0301679X.
- [38] PCS INSTRUMENTS. *MTM2 Mini-Traction Machine* [online]. 2017. Dostupné z: <https://pcs-instruments.com/wp-content/uploads/2017/01/MTM2-brochure-2017-Publisher-version-1.pdf>
- [39] DIVISION, Bruker Nano Surfaces. *ContourGT-X 3D Optical Microscope* [online]. 2013 [vid. 2020-03-31]. Dostupné z: [www.bruker.com](http://www.bruker.com)
- [40] *ContourGT-X - Overview - ContourGT-X / Bruker* [online]. [vid. 2020-11-22]. Dostupné z: <https://www.bruker.com/products/surface-and-dimensional-analysis/3d-optical-microscopes/contourg-t-x/overview.html>

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

### 9.1 Seznam použitých zkratk

SRR	Slide-to-roll ratio
MTM	Mini-Traction Machine
VUT	Vysoké učení technické
TOR	Top of rail

### 9.2 Seznam fyzikálních veličin

$f$	-	Součinitel tření
$F_T$	N	Třecí síla
$F_t$	N	Tečná (trakční) síla
$F_N$	N	Normálová síla
$\mu$	-	Součinitel adheze
$v$	m/s	Rychlost
$r$	m	Poloměr
$\omega$	rad/s	Úhlová rychlost
$\xi$	-	Skluž
$Ra$	$\mu\text{m}$	Průměrná aritmetická úchylka profilu povrchu
$Rq$	$\mu\text{m}$	Průměrná kvadratická úchylka profilu povrchu

## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

<b>obr. 2-1</b>	Významné části dvojice kolo – kolejnice a jejich pojmenování. ....	14
<b>obr. 2-2</b>	Rozdíl mezi (a) třením a (b) adhezí. ....	16
<b>obr. 2-3</b>	Trakční křivka a znázornění oblastí lpění a skluzu. ....	18
<b>obr. 2-4</b>	Stribeckova křivka s vyznačenými režimy mazání. ....	18
<b>obr. 2-5</b>	Poškození vzniklé v důsledku přítomnosti abrazivních částic písku. ....	19
<b>obr. 2-6</b>	Vlnkovité opotřebení. ....	20
<b>obr. 2-7</b>	Poškození kolejnice vzniklé v důsledku oscilací v blízkosti bodu saturace. ....	20
<b>obr. 2-8</b>	Časové testy pro různé procento skluzu. ....	23
<b>obr. 2-9</b>	Vliv příměsí plastického maziva v modifikátoru tření na adhezi ....	23
<b>obr. 2-10</b>	Vliv množství TOR maziva na brzdnou dráhu tramvaje. ....	24
<b>obr. 2-11</b>	Úseky trati v různé vzdálenosti od aplikační jednotky. ....	25
<b>obr. 2-12</b>	Průměrný součinitel adheze dosahovaný za různých podmínek. ....	26
<b>obr. 2-13</b>	Vliv TOR maziva na akustický tlak, laboratorní podmínky. ....	26
<b>obr. 2-14</b>	Vliv TOR maziva na akustický tlak, terénní měření. ....	27
<b>obr. 2-15</b>	Vliv TOR maziva na redukci laterálních sil. ....	28
<b>obr. 2-16</b>	Počet částic (PNC) uvolněných ze vzorků v průběhu experimentu. ....	29
<b>obr. 2-17</b>	Složení vzorové směsi dle patentu. ....	30
<b>obr. 2-18</b>	Trakční křivky různých druhů lubrikantů. ....	31
<b>obr. 2-19</b>	Účinek grafitu a disulfidu molybdenu na adhezi. ....	32
<b>obr. 2-20</b>	Účinek grafitu a disulfidu molybdenu na opotřebení. ....	33
<b>obr. 2-21</b>	Vliv částic oxidu hlinitého na obnovu adheze. ....	34
<b>obr. 2-22</b>	Vliv oxidu hlinitého na adhezi v kontaktu mazaném olejem. ....	35
<b>obr. 4-1</b>	Schéma pracovního postupu při vývoji maziva. ....	39
<b>obr. 4-2</b>	Schéma měření na zařízení MTM. ....	41
<b>obr. 4-3</b>	Analýza povrchu disku pomocí optického profilometru. ....	42
<b>obr. 4-4</b>	Diagram managementu kontaktních těles. ....	43
<b>obr. 4-5</b>	Plán experimentů se samostatnými látkami. ....	45
<b>obr. 4-6</b>	Znázornění adhezního pásma optimální a kriticky nízké adheze. ....	46

<b>obr. 4-7</b>	Plán experimentů s kompozicemi. ....	46
<b>obr. 4-8</b>	Plán experimentů s vícesložkovými kompozicemi.....	47
<b>obr. 4-9</b>	Aplikace maziva v průběhu testů opotřebení. ....	47
<b>obr. 4-10</b>	Reprofilace povrchu disku brusným papírem a diamantovou pastou.....	48
<b>obr. 5-1</b>	Stanovení doby záběhu kontaktních těles. ....	49
<b>obr. 5-2</b>	Vývoj šířky drážky v čase.....	50
<b>obr. 5-3</b>	Vývoj hloubky drážky v čase. ....	50
<b>obr. 5-4</b>	Vývoj aritmetické úchylky drsnosti povrchu $R_a$ v čase. ....	51
<b>obr. 5-5</b>	Experimentální měření Stribeckovy křivky základového oleje.....	52
<b>obr. 5-6</b>	Součinitel adheze částic a maziva.....	52
<b>obr. 5-7</b>	Výsledky měření adhezních vlastností částic sulfidů kovů.....	53
<b>obr. 5-8</b>	Výsledky měření 15% směsí částic p s plastickým mazivem. ....	54
<b>obr. 5-9</b>	Rychlost obnovy adheze v závislosti na velikosti částic.....	54
<b>obr. 5-10</b>	Součinitel adheze v závislosti na množství částic $Al_2O_3$ v mazivu.....	55
<b>obr. 5-11</b>	Výsledky měření kompozic obsahujících sulfidy kovů. ....	55
<b>obr. 5-12</b>	Výsledky měření dvojsložkových kompozic s příměsí tuhých maziv.....	56
<b>obr. 5-13</b>	Vliv příměsí tuhých maziv na délku trvání mazacích účinků. ....	56
<b>obr. 5-14</b>	Vliv příměsí různého množství grafitu na 8% směs oxidu hlinitého. ....	57
<b>obr. 5-15</b>	Vliv příměsí různého množství tuhých maziv na 7% směs oxidu hlinitého. ....	57
<b>obr. 5-16</b>	Vliv 3% příměsí sulfidů kovů na 7% směs oxidu hlinitého.....	58
<b>obr. 5-17</b>	Vliv příměsí tuhých maziv na 10% směs oxidu hlinitého. ....	58
<b>obr. 5-18</b>	Vliv 20% příměsí sulfidů kovů na 10% směs oxidu hlinitého. ....	59
<b>obr. 5-19</b>	Testování kompozic A–D založených na patentu [28]. ....	60
<b>obr. 5-20</b>	Testování kompozic s nízkým obsahem částic E–R.....	60
<b>obr. 5-21</b>	Testování kompozic s nízkým obsahem částic S–AF.....	61
<b>obr. 5-22</b>	Testování kompozic s vysokým obsahem částic AG–AU.....	61
<b>obr. 5-23</b>	Testování kompozic s vysokým obsahem částic AV–BJ.....	61
<b>obr. 5-24</b>	Adhezní křivky vybraných nízkoprocentních kompozic.....	62
<b>obr. 5-25</b>	Adhezní křivky vybraných vysokoprocentních kompozic. ....	62
<b>obr. 5-26</b>	Srovnání kompozic s komerčními mazivy – 2 $\mu$ l.....	63

<b>obr. 5-27</b>	Srovnání kompozic s komerčními mazivy – 4 $\mu$ l.....	63
<b>obr. 5-28</b>	Srovnání kompozic s komerčními mazivy – 6 $\mu$ l.....	64
<b>obr. 5-29</b>	Součinitel adheze v průběhu testu opotřebení – suchý kontakt.....	64
<b>obr. 5-30</b>	Testy opotřebení pro suchý kontakt.....	64
<b>obr. 5-31</b>	Součinitel adheze v průběhu testu opotřebení – TOR A.....	65
<b>obr. 5-32</b>	Testy opotřebení pro mazivo TOR A.....	65
<b>obr. 5-33</b>	Součinitel adheze v průběhu testu opotřebení – Kompozice AO.....	66
<b>obr. 5-34</b>	Testy opotřebení pro kompozici AO.....	66
<b>obr. 5-35</b>	Součinitel adheze v průběhu testu opotřebení – Kompozice N.....	66
<b>obr. 5-36</b>	Testy opotřebení pro kompozici N.....	67
<b>obr. 6-1</b>	Délky trvání sledovaných intervalů součinitele adheze.....	68
<b>obr. 6-2</b>	Povrch disku po skončení experimentu.....	70
<b>obr. 6-3</b>	Výsledky testů opotřebení.....	70
<b>obr. 6-4</b>	Srovnání adheze v suchém a mazaném kontaktu.....	71

## 11 SEZNAM TABULEK

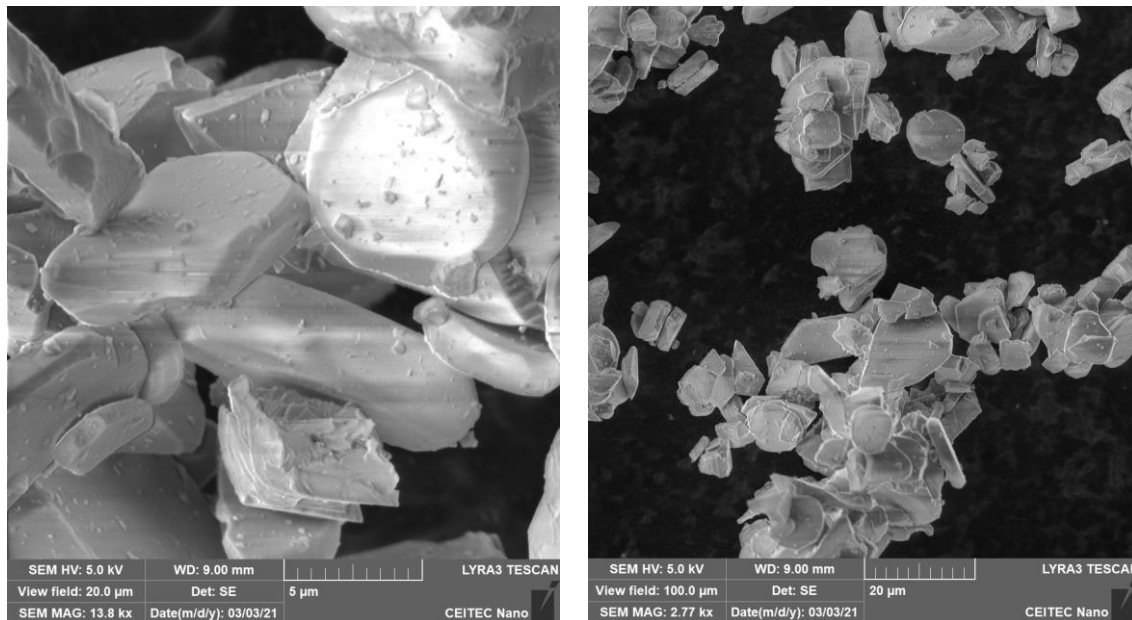
<b>tab. 3-1</b>	Požadavky kladené na vyvíjené mazivo. ....	37
<b>tab. 4-1</b>	Přehled použitých látek. ....	40
<b>tab. 4-2</b>	Rozsah testovacích parametrů na zařízení MTM. ....	41
<b>tab. 4-3</b>	Přehled parametrů experimentu. ....	44
<b>tab. 6-1</b>	Přehled nejlepších dosažených výsledků pro všechna maziva/kompozice. .	69

## 12 SEZNAM PŘÍLOH

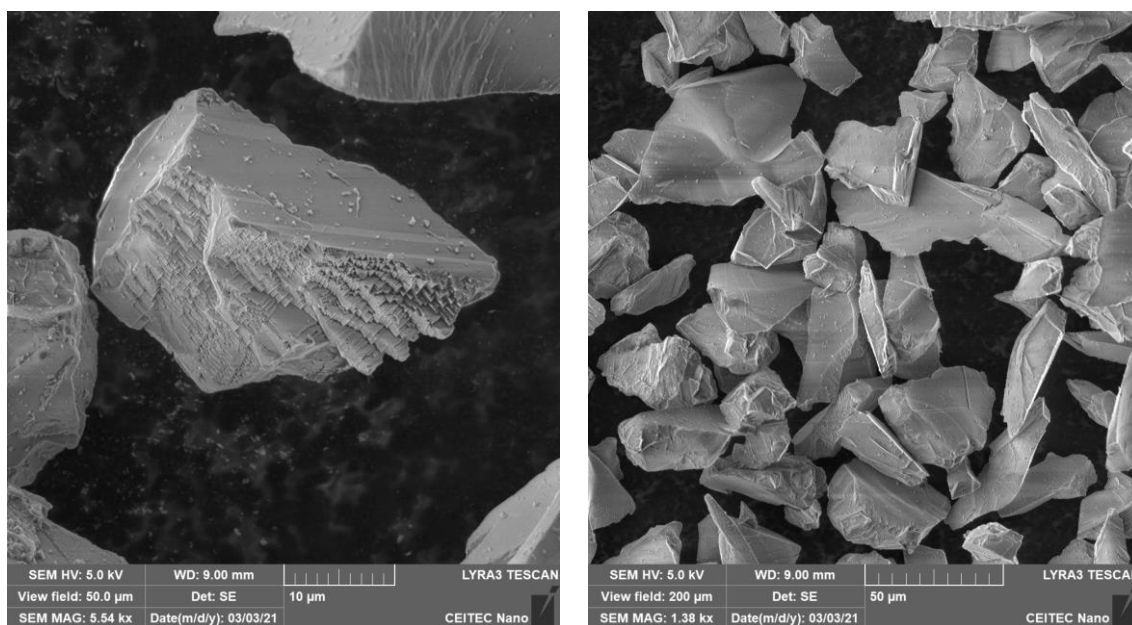
- Příloha 1      Fotografie zkoumaných částic získaných pomocí SEM
- Příloha 2      Seznam testovaných kompozic a jejich složení

# PŘÍLOHA 1

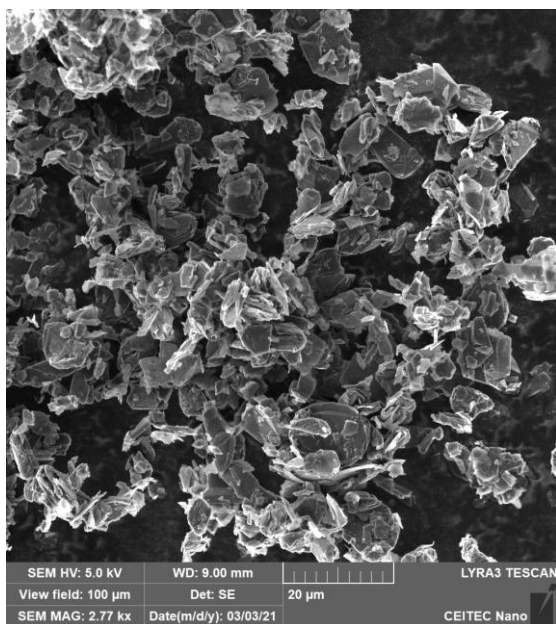
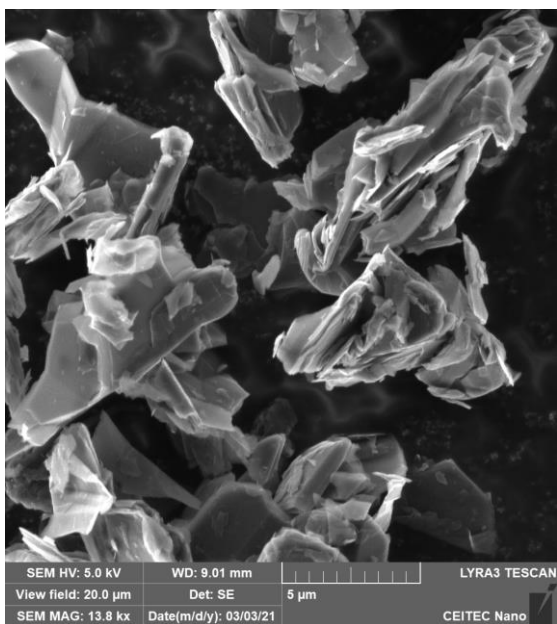
Fotografie použitých částic byly získány pomocí elektronového mikroskopu.



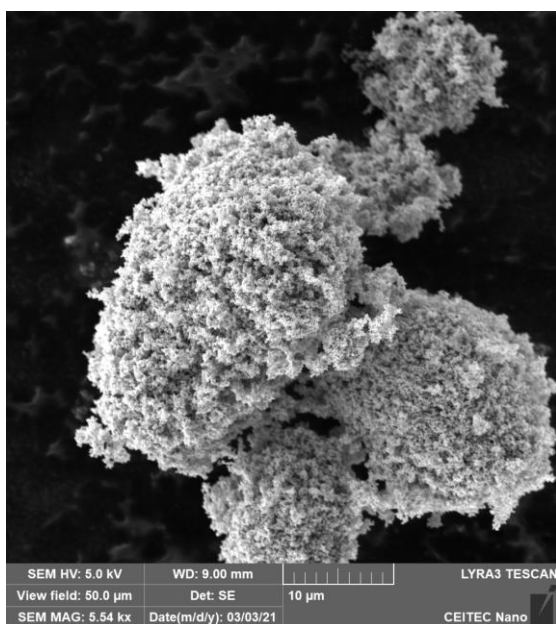
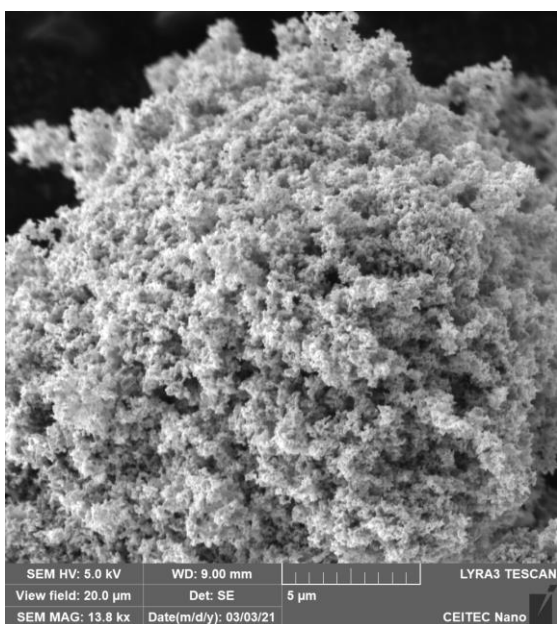
Oxid hlinitý (10  $\mu\text{m}$ ).



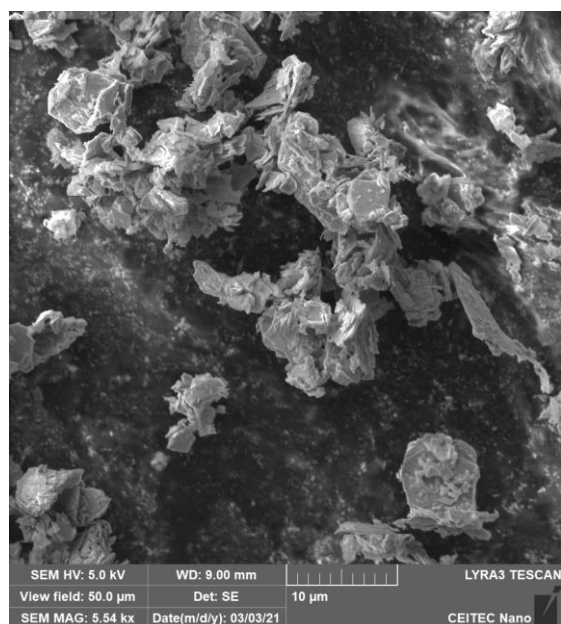
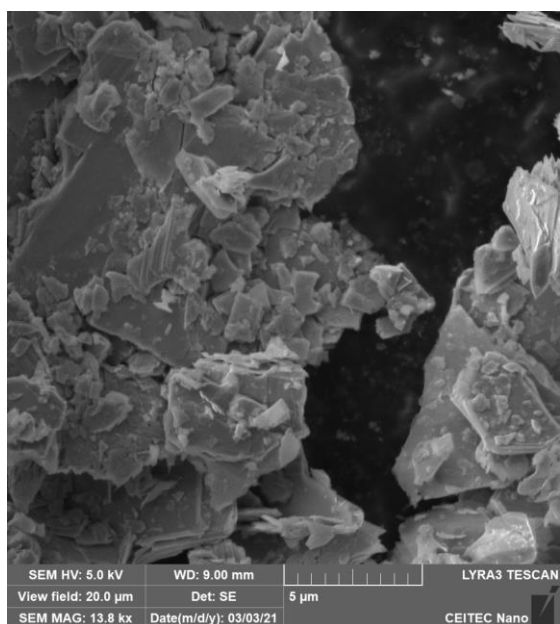
Oxid hlinitý (44  $\mu\text{m}$ ).



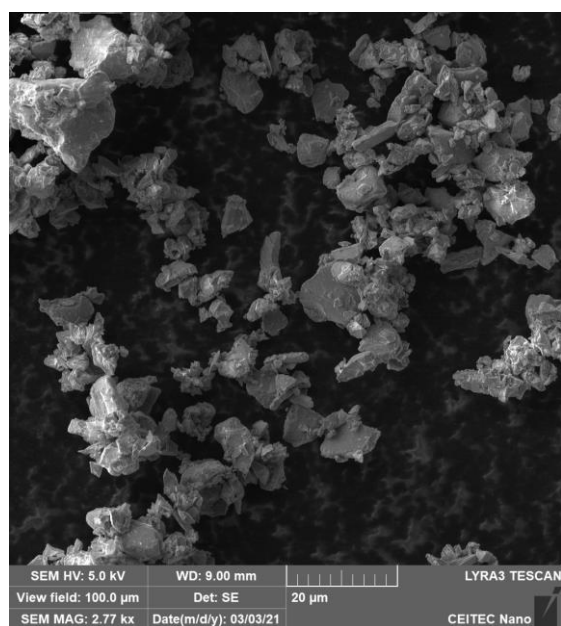
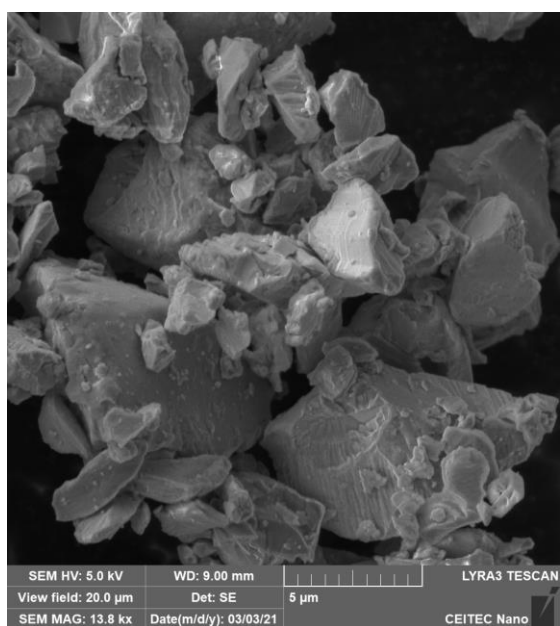
Grafit.



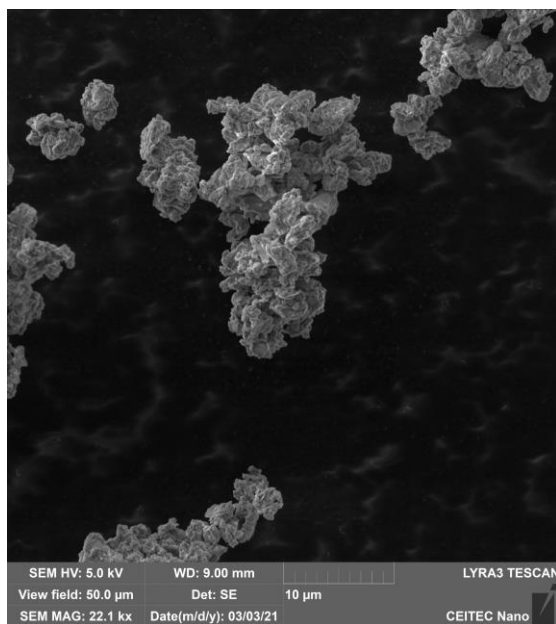
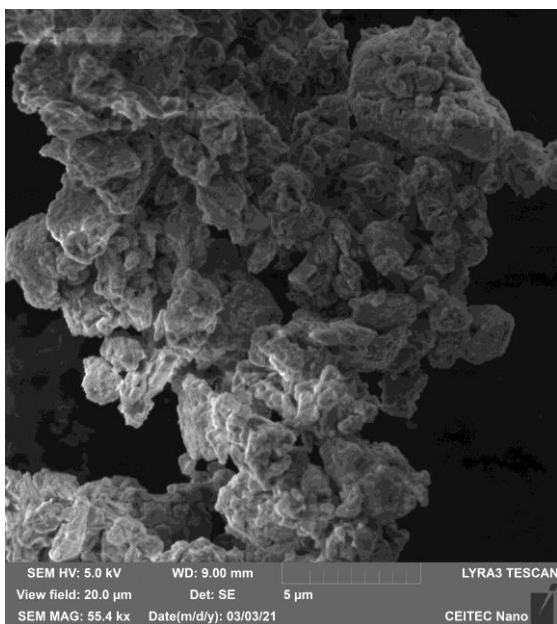
Oxid zinečnatý.



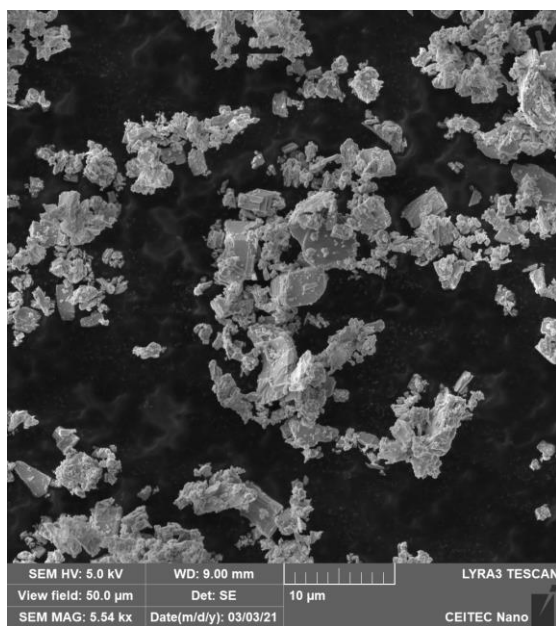
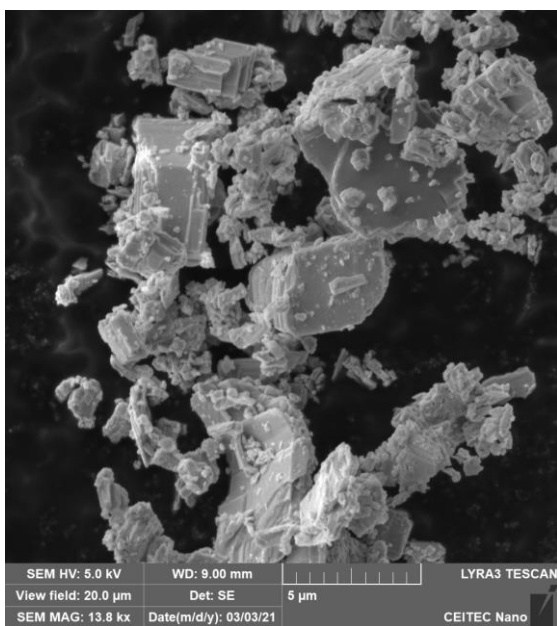
Disulfid molybdenu.



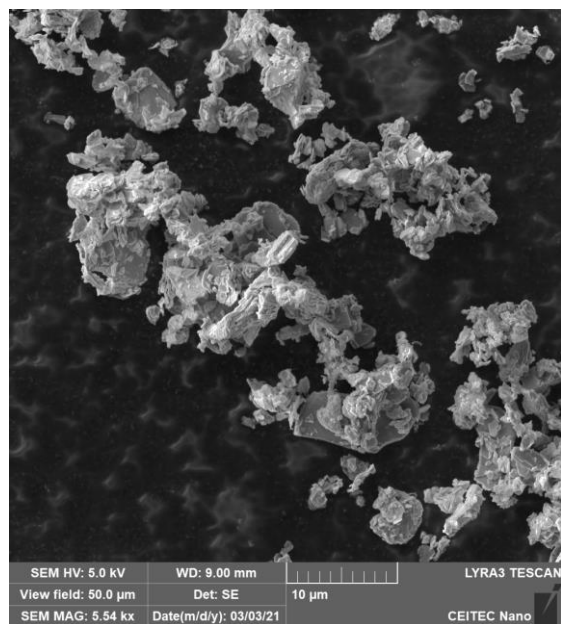
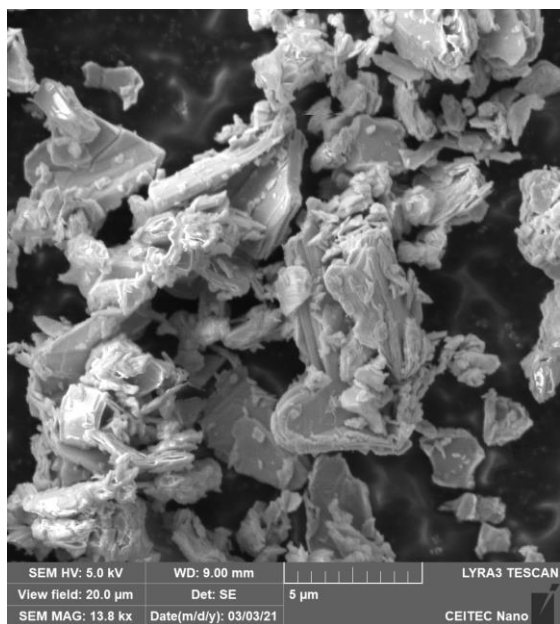
Sulfid železnatý.



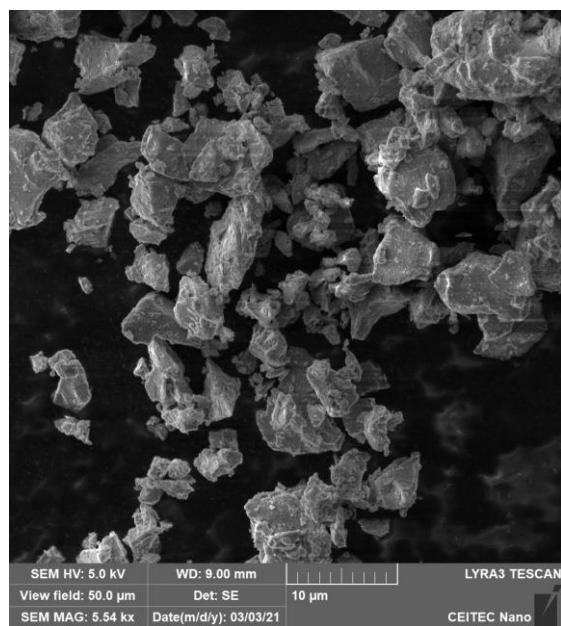
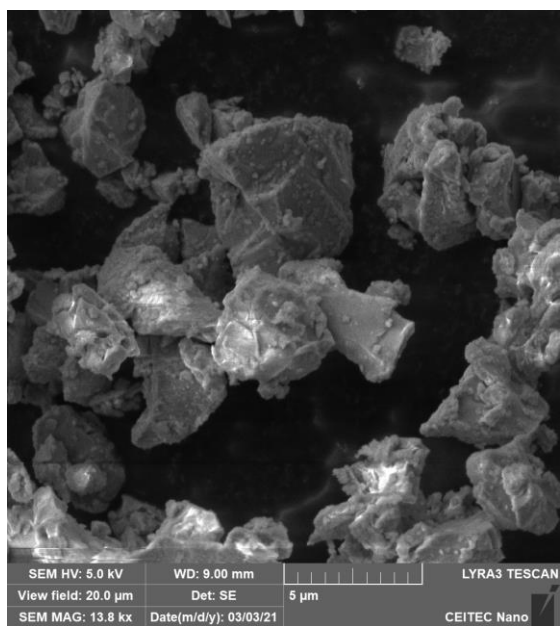
Sulfid měďný.



Sulfid bismutitý.



Sulfid ciničitý.



Sulfid manganatý

## PŘÍLOHA 2

Přehled složení testovaných kompozic:

Označení kompozice	Částice pro modifikaci tření (1)	Částice pro modifikaci tření (2)	Tuhé mazivo (1)	Tuhé mazivo (2)
A	10 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	5 hm. % Grafit	-
B	15 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	5 hm. % Grafit	-
C	20 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	5 hm. % Grafit	-
D	25 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	5 hm. % Grafit	-
E	4 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	2 hm. % Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	4 hm. % Grafit
F	3 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	3 hm. % Cu <sub>2</sub> S	2 hm. % MoS <sub>2</sub>
G	5 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	2 hm. % Cu <sub>2</sub> S	2 hm. % MoS <sub>2</sub>
H	5 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	3 hm. % Cu <sub>2</sub> S	1 hm. % Grafit
I	6 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	3 hm. % Cu <sub>2</sub> S	1 hm. % MoS <sub>2</sub>
J	6 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	3 hm. % Cu <sub>2</sub> S	1 hm. % Grafit
K	4 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	2 hm. % Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	4 hm. % MoS <sub>2</sub>
L	4 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	4 hm. % Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	2 hm. % MoS <sub>2</sub>
M	4 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	4 hm. % Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	3 hm. % Grafit
N	3 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	7 hm. % Cu <sub>2</sub> S	1 hm. % MoS <sub>2</sub>
O	3 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	7 hm. % Cu <sub>2</sub> S	5 hm. % MoS <sub>2</sub>
P	3 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	12 hm. % Cu <sub>2</sub> S	5 hm. % MoS <sub>2</sub>
Q	5 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	1 hm. % Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	5 hm. % MoS <sub>2</sub>
R	3 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	6 hm. % Cu <sub>2</sub> S	1 hm. % MoS <sub>2</sub>
S	1 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	7 hm. % Cu <sub>2</sub> S	2 hm. % MoS <sub>2</sub>

---

T	2 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	6 hm. % Cu <sub>2</sub> S	1 hm. % MoS <sub>2</sub>
U	2 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	7 hm. % Cu <sub>2</sub> S	1 hm. % MoS <sub>2</sub>
V	2 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	2 hm. % Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	3 hm. % MoS <sub>2</sub>
W	2 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	5 hm. % Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	3 hm. % MoS <sub>2</sub>
X	3 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	4,5 hm. % Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	0,5 hm. % MoS <sub>2</sub>
Y	3 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	7 hm. % Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	1 hm. % MoS <sub>2</sub>
Z	4 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	3,5 hm. % Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	0,5 hm. % MoS <sub>2</sub>
AA	3 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	4,5 hm. % SnS <sub>2</sub>	0,5 hm. % MoS <sub>2</sub>
AB	2 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	3 hm. % Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	2 hm. % MoS <sub>2</sub>
AC	3 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	4,5 hm. % Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	1,5 hm. % MoS <sub>2</sub>
AD	2 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	3 hm. % SnS <sub>2</sub>	2,5 hm. % MoS <sub>2</sub>
AE	2 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	4 hm. % SnS <sub>2</sub>	0,5 hm. % MoS <sub>2</sub>
AF	2 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	4 hm. % SnS <sub>2</sub>	2,5 hm. % MoS <sub>2</sub>
AG	5 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	5 hm. % Cu <sub>2</sub> S	15 hm. % MoS <sub>2</sub>
AH	4 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	3 hm. % Cu <sub>2</sub> S	18 hm. % MoS <sub>2</sub>
AI	2 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	2 hm. % Cu <sub>2</sub> S	21 hm. % MoS <sub>2</sub>
AJ	2 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	2 hm. % Cu <sub>2</sub> S	26 hm. % MoS <sub>2</sub>
AK	1,5 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	28,5 hm. % MoS <sub>2</sub>	-
AL	20 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	10 hm. % MoS <sub>2</sub>	-
AM	10 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	10 hm. % MoS <sub>2</sub>	-
AN	10 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	25 hm. % MoS <sub>2</sub>	-
AO	10 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	30 hm. % MoS <sub>2</sub>	-
AP	5 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	5 hm. % FeS	30 hm. % MoS <sub>2</sub>
AQ	7 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	3 hm. % Cu <sub>2</sub> S	30 hm. % MoS <sub>2</sub>

---

---

AR	5 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	30 hm. % MoS <sub>2</sub>	-
AS	7,5 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	30 hm. % MoS <sub>2</sub>	-
AT	30 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	10 hm. % MoS <sub>2</sub>	-
AU	10 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	10 hm. % Grafit	20 hm. % MoS <sub>2</sub>
AV	10 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	5 hm. % MoS <sub>2</sub>	-
AW	10 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	15 hm. % MoS <sub>2</sub>	-
AX	10 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	20 hm. % MoS <sub>2</sub>	-
AY	10 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	10 hm. % Grafit	-
AZ	10 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	15 hm. % Grafit	-
BA	10 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	20 hm. % Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	-
BB	10 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	20 hm. % Cu <sub>2</sub> S	-
BC	10 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	20 hm. % FeS	-
BD	10 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	20 hm. % MnS <sub>2</sub>	-
BE	10 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	20 hm. % SnS <sub>2</sub>	-
BF	3 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (44 μm)	20 hm. % MoS <sub>2</sub>	-
BG	3 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (44 μm)	15 hm. % Grafit	-
BH	5 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	5 hm. % FeS	15 hm. % Grafit
BI	5 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	15 hm. % Grafit	-
BJ	7 hm. % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	3 hm. % Cu <sub>2</sub> S	15 hm. % Grafit

---