



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

ANALÝZA KONTAMINANTŮ V KONTAKTU KOLA A KOLEJNICE

ANALYSIS OF CONTAMINANTS IN WHEEL AND RAIL CONTACT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Straka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Daniel Kvarda

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Tomáš Straka**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Daniel Kvarda**
Akademický rok: 2018/19

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 bakalářské práce:

Analýza kontaminantů v kontaktu kola a kolejnice

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Přenos sil mezi kolem a kolejnicí je výrazně ovlivněn přítomností kontaminantů v kontaktu kola a kolejnice. Kontaminanty mohou pocházet nejen z okolního prostředí, ale i samotného kolejového vozidla. Pro přesnější popis chování těchto látek je nutné nejprve analyzovat kontaminanty, které se mohou v kontaktu kola a kolejnice vyskytovat.

Typ práce: rešeršně syntetická

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem práce je rešerše kontaminantů přítomných v kontaktu kola a kolejnice a popis jejich chování.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- rešeršní studie kontaminantů v kontaktu kola a kolejnice,
- analýza složení kontaminantů,
- popis chování kontaminantů.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2019.pdf

Seznam doporučené literatury:

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

BEAGLEY, T. M. The rheological properties of solid rail contaminants and their effect on wheel/rail adhesion. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. 1976, 190(1), 419-428.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Kontakt kola a kolejnice je výrazně ovlivněn tzv. třetím tělesem – kontaminanty. Cílem této bakalářské práce je analyzovat kontaminanty v kontaktu a vytvořit tak stručný přehled. V úvodu práce je charakterizován kontakt kola a kolejnice. Dále jsou popsány nejdůležitější kontaminanty vyskytující se v kontaktu. Tato práce může sloužit jako úvod do problematiky kontaminace kontaktu kola a kolejnice.

KLÍČOVÁ SLOVA

kontakt kola a kolejnice, kontaminace, tribologie, součinitel tření, součinitel tření

ABSTRACT

Wheel/rail contact is significantly influenced by so called third body – contaminants. Aim of this bachelor's thesis is to analyse those contaminants in the contact and to create a brief overview. Short introduction into problem of wheel/rail contact is included, followed by description of main contaminants occurring in the contact. This thesis may be used as introduction into contamination of wheel/rail contact problem.

KEYWORDS

wheel/rail contact, contamination, tribology, coefficient of friction, coefficient of adhesion

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

STRAKA, Tomáš. *Analýza kontaminantů v kontaktu kola a kolejnice*. Brno, 2019, 50 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí bakalářské práce Ing. Daniel Kvarda.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval panu Ing. Danielu Kvardovi za jeho vedení, pomoc a odborné rady v průběhu psaní této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině a přátelům za podporu při celém studiu. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat panu Ing. Martinu Elstnerovi za úvod do problematiky kontaktu kola a kolejnice.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou 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

1	ÚVOD	13
2	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	14
2.1	Analýza problému	14
2.2	Cíl práce	14
3	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	15
3.1	Kontakt kola a kolejnice	15
3.1.1	Kolo a kolejnice	15
3.1.2	Tlakové působení v kontaktu kola a kolejnice	16
3.1.3	Tření a adheze	17
3.1.4	Kontaminace kontaktu	20
3.2	Kontaminace vodou a mazivy	21
3.2.1	Výskyt vody a maziv	21
3.2.2	Složení vody a maziv	21
3.2.3	Efekt kontaminace vodou a mazivy	22
3.3	Kontaminace listím	23
3.3.1	Výskyt listí	23
3.3.2	Složení listí	23
3.3.3	Efekt kontaminace listím	24
3.4	Kontaminace pískem	26
3.4.1	Výskyt písku	26
3.4.2	Složení písku	28
3.4.3	Efekt kontaminace pískem	28
3.5	Modifikátory tření	30
3.5.1	Výskyt modifikátorů tření	31
3.5.2	Složení modifikátorů tření	34
3.5.3	Efekt kontaminace modifikátory tření	36
4	DISKUZE	40
5	ZÁVĚR	43
6	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	44
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	48

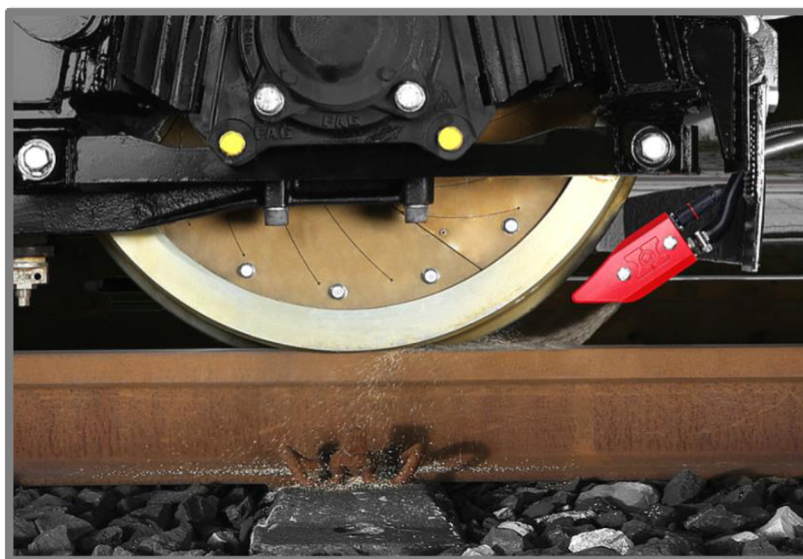
7.1	Seznam použitých zkratk	48
7.2	Seznam použitých veličin	48
8	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	49
9	SEZNAM TABULEK	50

1 ÚVOD

Kolejová doprava je nepostradatelnou součástí naší infrastruktury. Jedná se o druhý nejekonomičtější způsob přepravy nákladu hned po lodní dopravě. Hlavním důvodem této efektivity je právě kontakt kola a kolejnice, který je charakteristický svým relativně malým valivým odporem, majícím nízké energetické ztráty při valení. Typický kontakt kola a kolejnice má tvar elipsy s rozměry os 18 x 1 mm, který je zatížen až 11 tunami [1]. Během provozu kolejových vozidel nabývá součinitel tření hodnot 0,08 až 0,50 [1]. Pro součinitel tření je toto poměrně široký interval hodnot, kterými může kontakt kola a kolejnice nabývat, čímž se dostáváme k problematice popisované v této bakalářské práci.

Kontakt kola a kolejnice není styk pouze dvou těles. Mezi nimi se nachází široká škála kontaminantů, označovaných souhrnně jako tzv. třetí těleso, která velmi výrazně ovlivňuje vlastnosti kontaktu kola a kolejnice. Tyto kontaminanty mají různý původ. Do kontaktu se mohou dostávat odlišnými způsoby: pomocí počasí, únikem ze souprav, záměrnou aplikací pro zlepšení adhezních podmínek atp. V praxi to znamená, že pokud jede vlak po kolejích, na kterých je napadané vlhké listí, má brzdná dráha zlomek hodnoty oproti brždění za ideálních podmínek. Proti tomu lze aplikovat do kontaktu kola a kolejnice písek (aplikace ukázána na obr. 1-1 [2]), který zvýší tření v kontaktu, čímž pomůže brzdným podmínkám.

Z tohoto vyplývá, že se v kontaktu může nacházet množství cizích látek, které je potřeba analyzovat. Cílem této práce je rešeršní studie kontaminantů v kontaktu kola a kolejnice, popis jejich chování a výskyt v reálném prostředí tak, aby se čtenář mohl seznámit s problematikou týkající se tzv. třetího tělesa a aby se mohl jednoduše orientovat mezi jednotlivými druhy kontaminantů a jejich výsledným efektem na kontakt kola a kolejnice.



Obr. 1-1 Pískování povrchu kolejnic [2]

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

2.1 Analýza problému

Kontaminanty ovlivňují zásadním způsobem vlastnosti kontaktu kola a kolejnice. Mají obrovský vliv na tření v kontaktu, které je potřeba pro správnou akceleraci a brždění lokomotiv. Dále ovlivňují opotřebení kol a kolejnic, hlučnost provozu, funkčnost zabezpečovacího zařízení železničních tratí a mnoho dalšího.

V kontaktu se může nacházet široká škála kontaminantů. Pro lepší pochopení chování kontaktu kola a kolejnice je potřeba tyto látky klasifikovat a popsat jejich efekt při kontaminaci.

2.2 Cíl práce

Hlavním cílem této práce je analyzovat kontaminanty v kontaktu kola a kolejnice. Výstupem by měla být rešeršně syntetická studie, popisující nejtypičtější kontaminanty v kontaktu kola a kolejnice.

Mezi dílčí cíle patří:

- Analýza výskytu kontaminantů
- Analýza složení kontaminantů
- Analýza výsledných efektů při kontaminaci danými kontaminanty a zhodnocení pozitiv/negativ z hlediska tření v kontaktu a opotřebení

3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

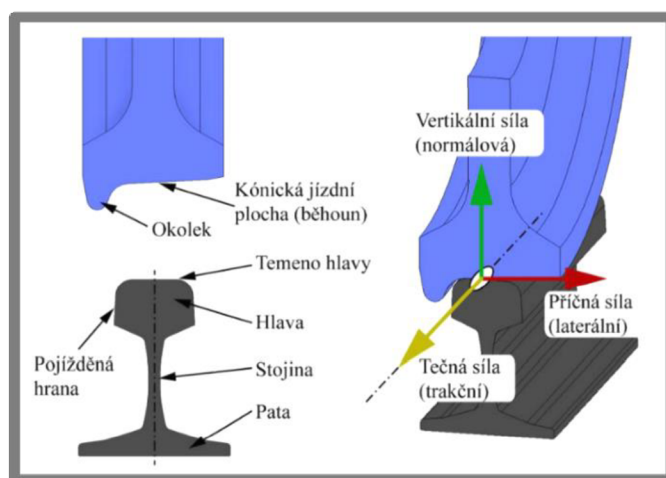
Tato kapitola je rozdělena na 5 podkapitol. První podkapitola pojednává o samotném kontaktu kola a kolejnice. Stručně popisuje názvosloví kol a kolejnic, tlakové působení v kontaktu kola a kolejnice, tření a adhezi a kontaminaci kontaktu. V dalších podkapitolách jsou charakterizovány jednotlivé kontaminanty, jejich výskyt, složení a vliv na kontakt kola a kolejnice.

3.1 Kontakt kola a kolejnice

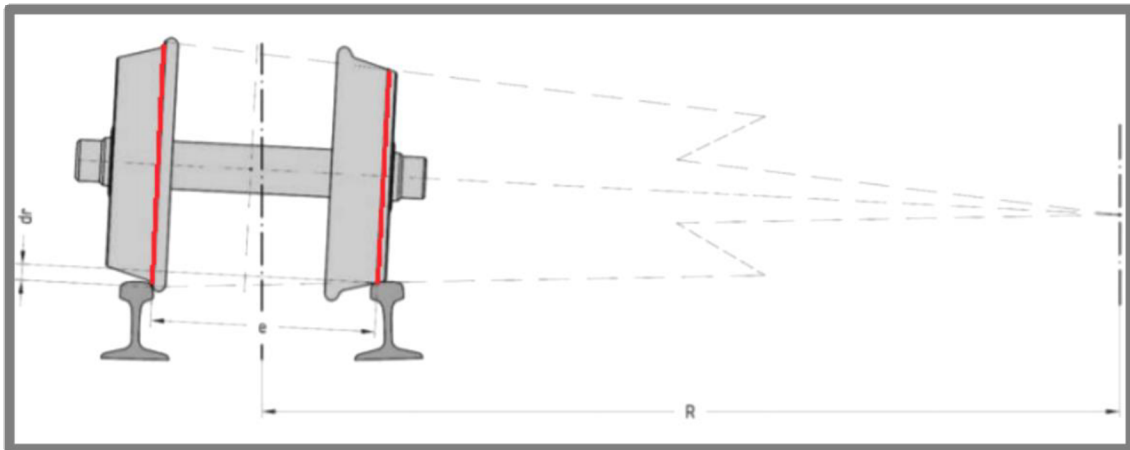
Pro pochopení chování kontaminantů – tzv. třetího tělesa – musíme nejdříve popsat kontakt dvou těles – kola a kolejnice. Z hlediska problematiky se jedná o poměrně specifickou interakci mezi dvěma tělesy. Pravděpodobně nejbližší oblastí k této problematice jsou valivá ložiska, ty však fungují v prakticky uzavřeném systému, ve kterém se podmínky kontaktu během životnosti valivého ložiska nijak zásadně nemění [1].

3.1.1 Kolo a kolejnice

Geometrie a základní názvosloví kol a kolejnic je ukázáno na obr. 3-1 [3]. Kola mají kónický tvar, který při průjezdu obloukem umožňuje každému kolu ujet rozdílně dlouhou dráhu při zachování stejné úhlové rychlosti obou kol. Při jízdě přímou tratí se dotýká pouze kónická jízdní plocha (tzv. běhoun) a temeno hlavy. Při průjezdu obloukem se začne dotýkat i okolek, což je část kola na jeho vnitřním boku, jehož funkce je přidržování kola na kolejnici v obloucích a na výhybkách. Náznorná ukázka průjezdu dvojkolí obloukem je na obr. 3-2 [4]. Můžeme si všimnout rozdílných průměrů valivých kružnic (zvýrazněno červeně), rozdílu poloměrů jednotlivých valivých kružnic, zakótovaném jako dr , a doteku okolku.



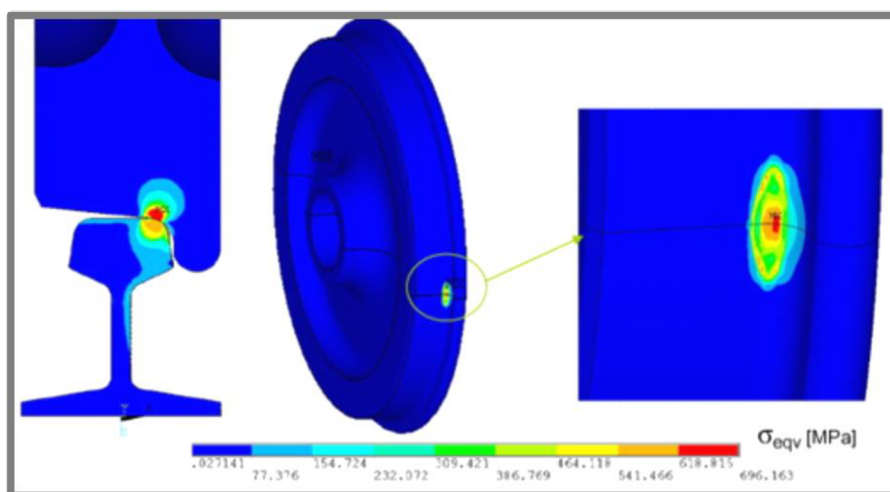
Obr. 3-1 Názvosloví kola a kolejnice [3]



Obr. 3-2 Průjezd soukolí obloukem (upraveno) [4]

3.1.2 Tlakové působení v kontaktu kola a kolejnice

Kontakt kola a kolejnice má eliptický tvar s delší poloosou ve směru valení kola. Obsah elipsy se mění v závislosti na zatížení, řádově by měl však stále nabývat hodnot okolo 1cm^2 [1]. Horní hraniční hodnota zatížení se udává jako maximální zatížení nápravy, které se pohybuje většinou okolo 30 tun [1], v případě velmi těžkých nákladů v Austrálii a USA může tato hodnota nabývat až 40 tun [1]. Tato hodnota závisí na mnoha faktorech (jako např. typ kolejí, jejich staří, kvalita, rychlost jízdy atd.), a je dána normami dané země, případně normami společnosti provozujícími danou železnici. Pro názornou ukázkou je přiložen obr. 3-3 [5], který pomocí simulace demonstrují velikost napětí v kole a kolejnici.



Obr. 3-3 Rozložení napětí v kontaktu kola kolejnice (upraveno) [5]

Nejjednodušší geometrický popis kontaktu kola a kolejničky umožňuje Hertzova kontaktní teorie, která počítá s kolem a kolejničkou jako dvěma válci na sebe kolmými. Podle této teorie je maximální kontaktní tlak popsán rovnicí (3-1) [1].

$$p = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot P \cdot E^2}{2 \cdot \pi^3 \cdot R^2 \cdot (1 - \nu^2)^2}} \quad (3-1)$$

kde:

p	[MPa]	- maximální kontaktní tlak
P	[MPa]	- normálové zatížení
E	[MPa]	- Youngův modul pružnosti
ν	[1]	- Poissonova konstanta (předpokládána stejná pro kolo i kolejničku)
R	[mm]	- redukovaný poloměr z rovnice (3-2) [1]

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (3-2)$$

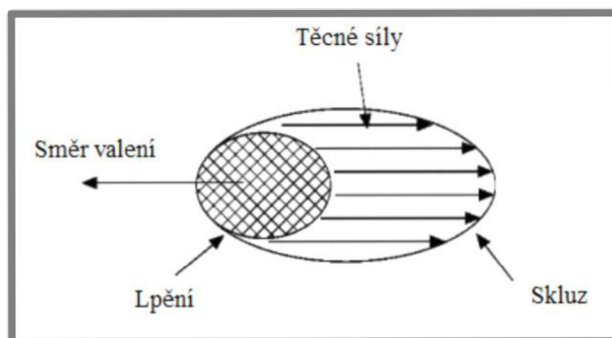
kde:

R	[mm]	- redukovaný poloměr vystupující v rovnici (3-1)
R_1	[mm]	- poloměr kola
R_2	[mm]	- poloměr kolejničky*

* poloměr kolejničky můžeme uvažovat jako nekonečno, tudíž redukovaný poloměr $R \approx R_1$.

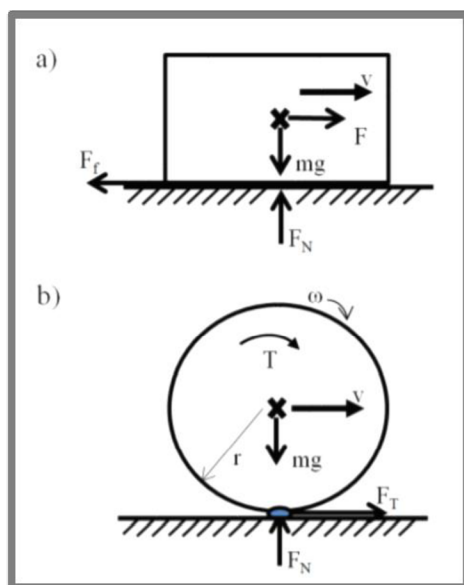
3.1.3 Tření a adheze

Tření je definováno jako odpor při pohybu jednoho tělesa po druhém [1]. Do této definice pohybu spadá valení i skluz. Za reálných podmínek neexistuje pouze čisté valení, vždy je doprovázeno i skluzem – znázorněno na obr. 3-4 [1].



Obr. 3-4 Schéma plochy dotyku (přeloženo) [1]

Adheze je definována jako síla potřebná k oddělení povrchů dvou těles, které se dotýkají. Ovšem v problematice kontaktu kola a kolejnice je tento termín hojně používán k nazývání tečné síly působící v kontaktu kola a kolejnice [6]. Rozdíl mezi třením a adhezí je ukázán pomocí smýkajícího se kvádra a valícího se válce na obr. 3-5 [6]. Kvádr se pohybuje rychlostí v . Je táhnut silou F . Proti ní působí třecí síla F_f , která je vyvolána normálovou silou F_N a součinitelem tření – tedy třením mezi kvádrem a podložkou. Poměr mezi normálovou silou a třecí silou se nazývá součinitel tření. Válec se valí rychlostí v . Je zatížen momentem T . Proti němu působí tečná síla F_T na rameni r . Poměr mezi normálovou silou a tečnou silou se nazývá součinitel adheze.



Obr. 3-5 a) čistý skluz a b) valení [6]

Součinitel tření v případě a) a součinitel adheze v b) jsou popsány rovnicemi (3-3) a (3-4) [6]:

$$\mu_f = \frac{F_f}{F_N} \quad (3-3)$$

$$\mu_a = \frac{F_T}{F_N} \quad (3-4)$$

kde:

μ_f	[1]	- součinitel tření
μ_a	[1]	- součinitel adheze
F_f	[N]	- třecí síla
F_T	[N]	- tečná síla
F_N	[N]	- normálová síla

Skluz je definován jako rozdíl tečné rychlosti a rychlosti valení kola. Ke skluzu dochází při akceleraci a brždění nebo při překonávání odporů při konstantní rychlosti. Skluz je popsán rovnicí (3-5) [6]:

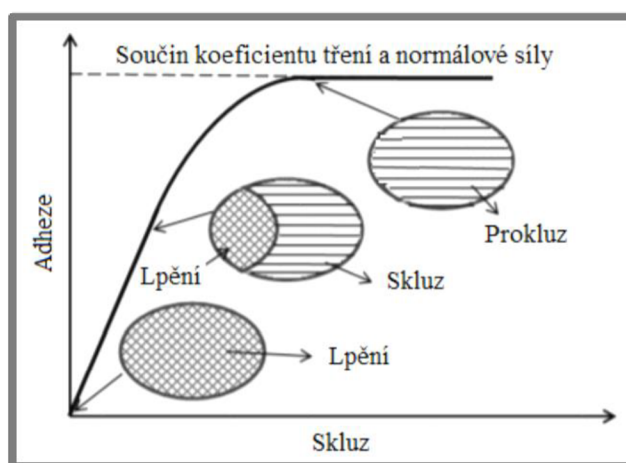
$$\xi = \frac{v - \omega \cdot r}{\frac{1}{2} \cdot (v + \omega \cdot r)} \cdot 100\% \quad (3-5)$$

kde:

ξ	[%]	- skluz
r	[m]	- poloměr kola
v	$[m \cdot s^{-1}]$	- rychlost kola
ω	$[rad \cdot s^{-1}]$	- úhlová rychlost kola

Pokud platí $v = \omega \cdot r$, tak je podle rovnice 3-5 skluz roven nule. Takovýto případ se nazývá čisté valení. To je však pouze teoretické, v praxi vždy dochází alespoň k minimálnímu skluzu, který je způsobený deformacemi, vyvolanými kontaktem kola a kolejnice [6]. Ke skluzu dochází hlavně při zrychlování / zpomalování – tehdy, když mezi kolem a kolejnicí působí tečná síla. Při zrychlování platí: $v < \omega \cdot r$; při zpomalování tedy obráceně: $v > \omega \cdot r$.

Závislost skluzu na velikosti tečné síly, známá též jako adhezní charakteristika je ukázána na obr. 3-6 [6]. Pozorujeme, že s rostoucím součinitelem adheze roste i podíl skluzu v ploše dotyku. Pokud adheze překročí hodnotu součinu součinitele tření a normálové síly, dosáhne tzv. meze adheze. Poté už dochází pouze k prokluzu, což je nežádoucí jev. Z této závislosti můžeme také vyvodit závěr, že součinitel tření mezi kolem a kolejnicí ovlivňuje maximální efektivní adhezi, kterou je možno pohánět kolo bez prokluzu.



Obr. 3-6 Adhezní charakteristika (přeloženo a upraveno) [6]

3.1.4 Kontaminace kontaktu

V předchozích podkapitolách byl stručně popsán kontakt kola a kolejnice, jakožto dvou na sebe navzájem působících těles. Ve skutečnosti se však v tomto kontaktu nachází ještě značná škála kontaminantů, souhrnně označovaných jakožto třetí těleso (anglicky third body). Kontaminanty můžeme zařadit do tří podskupin [7]:

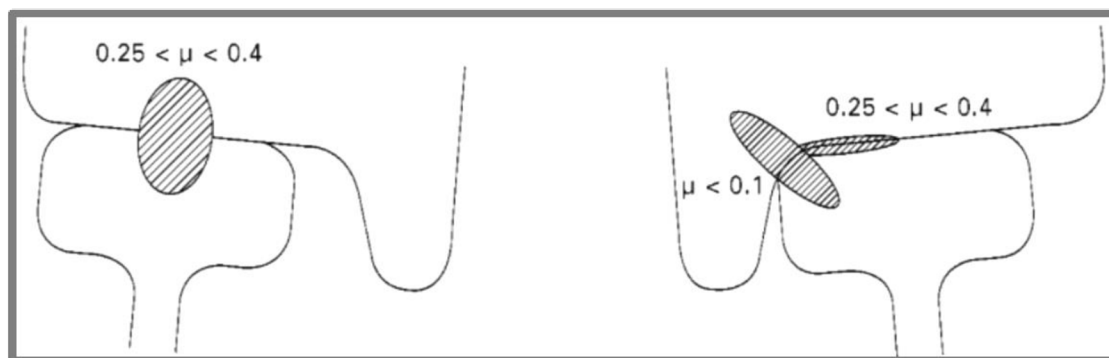
- 1) klimatické
- 2) provozní
- 3) transportované

Do první skupiny – klimatické – patří přírodní kontaminanty, vyskytující se v okolí tratě, které jsou definované podnebím, počasím, ročním obdobím atd. Jedná se například o napadané listí [8] nebo vodu [9] ve všech možných podobách (déšť, sníh, led, vlhkost vzduchu).

Do druhé skupiny – provozní – spadají kontaminanty způsobené činností člověka. Kontakt může být kontaminován záměrně, například pískem [9] nebo modifikátory tření [10]. Často je však kontaminace nechtěně způsobená například úniky maziv z vlaku [9]. Zajímavou kontaminací, náležící do první i druhé skupiny je rez [11].

V poslední skupině – transportované – se nachází kontaminanty uniklé z nákladů vlaků: uhelný prach [10], dřevěné třísky [10], obilniny [7] a podobné.

Veškerá kontaminace výrazně mění charakteristiku kontaktu kola a kolejnice. Tyto kontaminanty zejména ovlivňují součinitel adheze, opotřebení a hlučnost jízdy. Součinitel tření v neošetřeném prostředí může nabývat hodnot z intervalu 0,05 až 0,7 [10], což je velmi široký interval hodnot. Ideální hodnoty tření v kontaktech jsou ukázány na obr. 3-7 [1].



Obr. 3-7 Ideální hodnoty součinitele tření [1]

3.2 Kontaminace vodou a mazivy

Voda a maziva ovlivňují kontakt podobným způsobem. Proto budou tyto kontaminanty zahrnuty společně do jedné podkapitoly. Výzkum problematiky prováděli například Y. Zhu v oblasti adheze kontaktu v suchých a kontaminovaných podmínkách [6, 12], Y. Lyu a kol. v oblasti kontaminace sněhem a vlivu teploty na vlastnosti kontaktu [13], U. Olofsson a K. Sundvall v oblasti kontaminace vlhkostí a listím* [8] nebo W.J. Wang a kolektiv v oblasti kontaminace vodou, olejem, pískem* a jejich kombinacemi [9] (* kontaminacím listím a pískem budou později věnovány samostatné kapitoly).

3.2.1 Výskyt vody a maziv

Voda patří do množiny klimatických kontaminantů [7]. Kontaminace je následkem okamžitého stavu ovzduší. Voda může kontaminovat kontakt ve formě deště, sněhu, ledu, nebo vlhkostí vzduchu.

Maziva náleží do skupiny provozních kontaminantů [7]. Mezi kolo a kolejnici se dostávají únikem z jízdních souprav. Tato kontaminace je nežádoucí, a to z důvodu údržby strojů, ovlivnění kontaktu kolo/kolejnice a v neposlední řadě z ekologického hlediska.

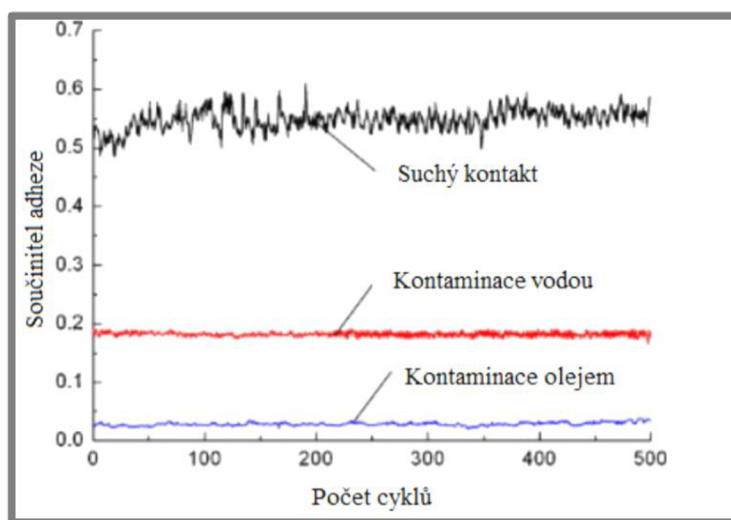
3.2.2 Složení vody a maziv

Dešť a sníh nekontaminují kontakt pouze molekulami **vody** (H_2O), jak by se mohlo na první pohled zdát, ale mohou obsahovat i kyselinu sírovou (H_2SO_4) [14] a kyselinu dusičnou (HNO_3) [14] z tzv. kyselých dešťů (případně sněžení). Tato kontaminace způsobuje korozi, která dále ovlivňuje kontakt kola a kolejnice [15]. Další alternativní kontaminací může být slaná voda, která taktéž způsobuje větší korozivitu [16]. Slaná voda se vyskytuje u tratí v přímořských lokalitách. Může však také docházet ke kontaminaci solí pomocí spodních vod v tunelech a hlubinných dolech [16].

Maziva můžeme rozdělit na kapalná a plastická. Kapalná maziva můžeme rozdělit dále na minerální a syntetické oleje (diestery, fluorokarbyony a silikony) [10]. Plastická maziva (často označovaná také jako mazací tuky) jsou látky polotuhé konzistence. Jedná se o minerální nebo rostlinné oleje, emulgované vápenatými, sodnými nebo lithnými mýdly [17]. „Mýdlem“ rozumíme kovové soli mastných kyselin [17].

3.2.3 Efekt kontaminace vodou a mazivy

Efekt vlivu kontaminace vodou a olejem na výslednou adhezi v kontaktu kolo/kolejnice se zabýval W.J. Wang a kolektiv [9]. Jejich výzkum probíhal na tribometru JD-1 wheel/rail simulation facility. Jeho princip spočívá v tom, že je osazen dvěma koly. Jedním s malým průměrem, simulující kolo vlaku, a druhým s velkým průměrem, simulující kolejnici. Do kontaktu kola a kolejnice je vstřikován olej nebo voda a efekt kontaminace je následně pozorován na změně součinitele adheze. Výsledky jejich experimentu jsou ukázány na obr. 3-8 [9] a v tab. 3-1 [9].

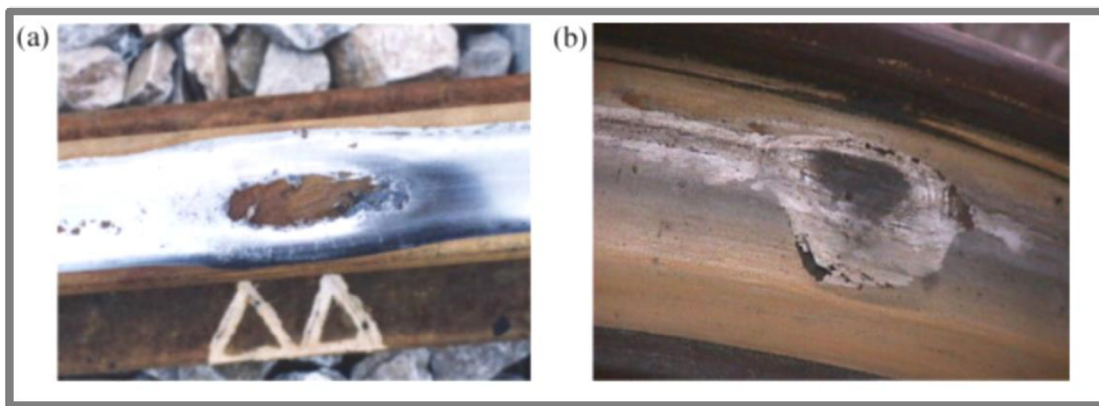


Obr. 3-9 Součinitel adheze při kontaminaci vodou a olejem (přeloženo) [9]

Tab. 3-1 Součinitel adheze při kontaminaci vodou a olejem (přeloženo a upraveno) [9]

Kontaminace	Zatížení 21 tun	Zatížení 25 tun
Voda	0.17 ± 0.018	0.18 ± 0.041
Olej	0.025 ± 0.002	0.035 ± 0.003
Olej + voda	0.018 ± 0.002	0.030 ± 0.002

V obr. 3-9 a tab. 3-1. si můžeme všimnout, že při kontaminaci vodou dojde k výraznému snížení adheze. V případě kontaminace olejem dochází k velmi výraznému snížení adheze. K umocnění tohoto efektu dochází při smíchání oleje s vodou. Nízká adheze může vést k prodloužení brzdné dráhy a nepředvídatelnému chování při brždění [9]. Typické poškození způsobené prokluzem, zaviněným nízkou adhezí, je ukázáno na obr. 3-9 [9] na a) kolejnici, b) kole.



Obr. 3-9 Poškození kol a kolejnici způsobené prokluzem [9]

3.3 Kontaminace listím

Kontaminací listím se ve své práci zabývali U. Olofsson a K. Sundvall [8]. Dále psal Olofsson práci popisující obecně kontakt kola a kolejnice [1], ve které věnuje její část také listí. Dalším autorem pojednávajícím o problematice kontaminace listím je K. Ishizaka a kol. [18]. Bojem proti nízké adhezi způsobené listím se zabýval M. Omasta [19]. Listí je poměrně nenápadným kontaminantem, jedná se však pravděpodobně o ten nejnebezpečnější.

3.3.1 Výskyt listí

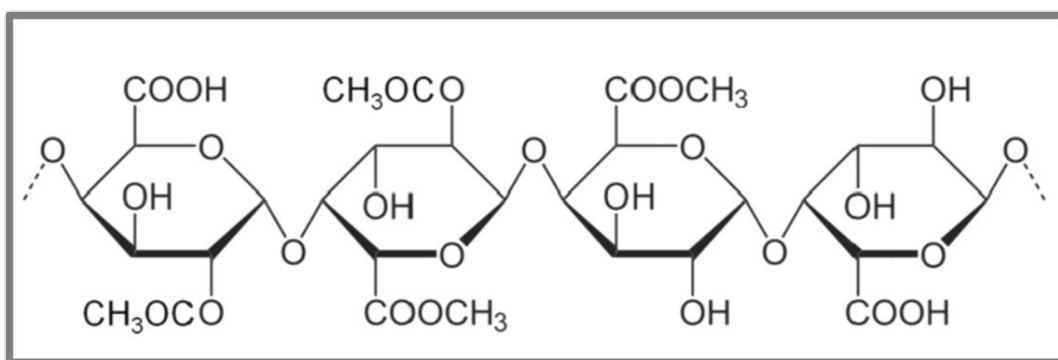
Kontaminace listím je charakteristická pro podzimní období, kdy začínají opadávat stromy. Listí tedy spadá do množiny klimatických kontaminantů [7]. Jeho výskyt bývá v úsecích poblíž lesů a alejí kolem tratě. Provozovatel železnice má často vytipované tyto úseky, kde se snaží provádět důkladnější údržbu kolejí [20]. Listí padá ze stromů na koleje v důsledku větru, proudění vzduchu kolem vlaků nebo deště [18]. Při průjezdu vlaku je napadané listí rozdrceno a kontaminuje dlouhý úsek kolejnice [8]. Tak se vytvoří tenká vrstva tmavě hnědé až černé barvy, která je popisována jako podobná teflonu [1]. Tato vrstva je díky chemickým vazbám silně přilepena ke kolejnici a je velmi těžké a nákladné jí odstranit [1].

3.3.2 Složení listí

Listí ze stromů je kontaminant organického původu. Nejvíce zastoupeným prvkem je ze zhruba 60% uhlík, dále se v listí nachází dusík (1-3%), vápník (1-3%), draslík (0,4-1,5%) [21]. Ostatní prvky jsou zastoupeny v nevýznamných koncentracích (většinou menších než 1%). Tyto koncentrace odpovídají pro průměrné listí. Mohou se mírně lišit v závislosti na druhu stromu, půdě, ve které strom roste, a geografické poloze stromu [21].

Z hlediska problematiky kontaminace kontaktu kola a kolejnice však není potřeba mezi druhy listí rozlišovat, protože rozdílné vlivy různých druhů listí jsou zanedbatelné v porovnání s vlivem ostatních kontaminantů. Spíše než složení samotných listů nás bude zajímat to, zda-li je napadané listí čerstvé nebo uschlé a zda-li je suché nebo vlhké.

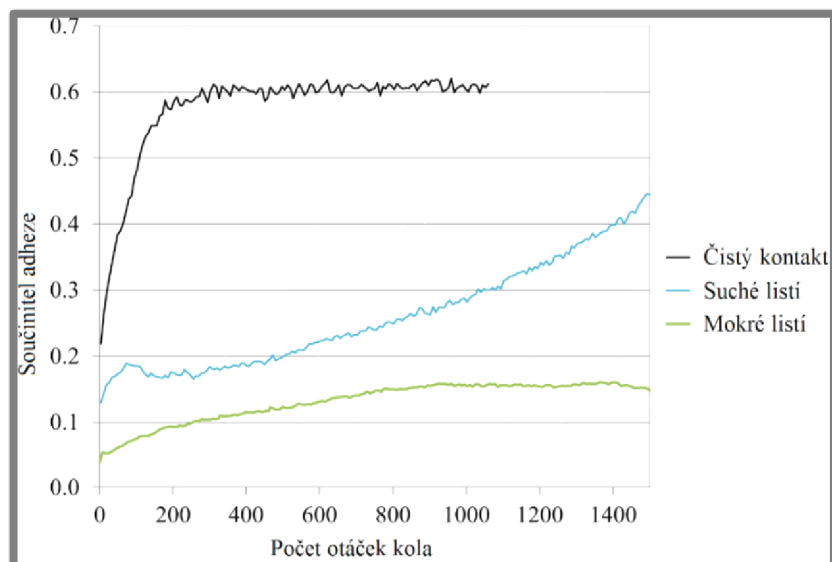
Nejvýznamnější látkou obsaženou v listí je pektin, jehož chemická skladba je ukázána na obr. 3-10 [22]. Ten může existovat ve třech formách: protopektin, pektin a kyselina pektinovaná [18]. Pektin se poměrně jednoduše mění v gel, je také lehce rozpustný ve vodě, a tyto dvě vlastnosti se považují za příčinu nízkého tření [18] při kontaminaci kontaktu. Jeho typická černá barva je přisuzována chemické reakci s iony železa [18] z kolejnic, čímž vzniká silné pouto mezi vrstvou pektinu a kolejnicemi.



Obr. 3-10 Pektin (upraveno) [22]

3.3.3 Efekt kontaminace listím

Kontaminace listím způsobuje snížení adheze v kontaktu kola a kolejnice, což má často dále za následek projetí stanice, nebo návěstidla stůj [18]. Snížení součinitele adheze je demonstrováno na obr. 3-11 [18]. Můžeme pozorovat, že kontaminace mokrým listím snižuje součinitel adheze více, než kontaminace suchým listím. Mokrý listí má také tendence se v kontaktu udržet déle než suché listí. Suché i mokré listí výrazně snižuje součinitel tření v porovnání s čistou suchou kolejnicí.



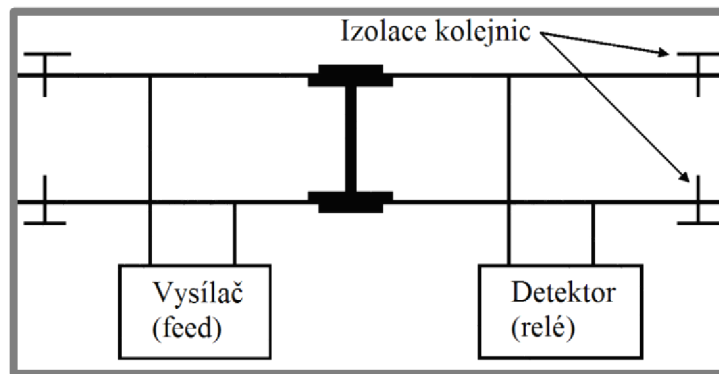
Obr. 3-11 Vliv kontaminace listím na adhezi (přeloženo a upraveno) [9]

Po zformování je vrstva listí na kolejnici silně přilepena a je velmi těžké ji odstranit. Tato vrstva je tvořena významným množstvím železa, kyslíku, uhlíku, sodíku a dusíku [23]. Z tohoto poznatku lze usoudit, že tato vrstva chemicky reaguje s iony železa pocházejících z kolejnice [18]. Odolnost této vrstvy můžeme tedy považovat za následek chemických reakcí mezi listím a kolejem.

Součinitel adheze je kontaminací snížen na velmi malou hodnotu, což je pro fungování železniční dopravy nežádoucí. Provozovatelé železnic se snaží odolnou vrstvu z povrchu kolejníc odstranit. To je prováděno čtyřmi různými způsoby: pískováním, aplikací modifikátorů tření, tryskáním vody pod vysokým tlakem a prevencí kontaminace listím [9]. Problematika pískování a modifikátorů tření je až příliš rozsáhlá na to, aby byla popsána zde, proto bude později v této práci oběma fenoménům věnována vlastní podkapitola.

Prevence proti kontaminaci listím spočívá v eliminaci stromů a keřů v blízkosti kolejí. Toto řešení je nejen neekologické, ale také často nereálné, pokud trať vede skrz zalesněné oblasti. Sofistikovanější metodou je kontaminace povrchu kolejníc tak, aby bylo prostředí zásadité (pH 9), což snižuje schopnost zformování odolné vrstvy listí [24].

Kontaminace vrstvou listí má potenciál způsobit také poněkud neočekávaný problém se zabezpečením řízení vlakového provozu. Zde se využívá vodivosti kolejníc, které když spojí projíždějící vlak, dostává zabezpečovací zařízení signál, že je kolej obsazena. Schéma tohoto efektu je ukázáno na obr. 3-12 [25]. Touto problematikou se zabýval R. Lewis a kol. [25]. Bylo dosaženo závěru, že pokud po kontaminované koleji jede lehký vlak, může opravdu dojít k odizolování soupravy od kolejí [25]. Odizolovaná souprava nedává signál, že je kolejnice obsazena a vlakový dispečer může na danou obsazenou kolejnici, mylně považovanou za volnou, poslat jinou soupravu, což může vyústit v závažnou nehodu.



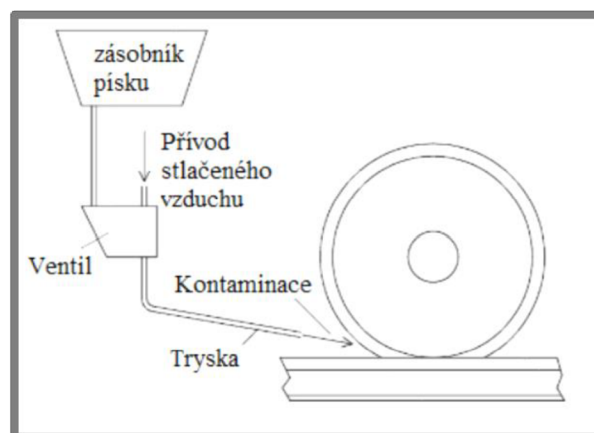
Obr. 3-12 Zabezpečovací zařízení (přeloženo) [25]

3.4 Kontaminace pískem

Výzkumem kontaminace kontaktu pískem se zabýval například W.J. Wang a kolektiv [9] nebo W. Huang a kolektiv [26]. Jedná se o stejnou práci jako v kapitole 3.2, je však vhodné věnovat písku samostatnou kapitolu. Mimo samotný písek zde bude zmíněn i tzv. „sandite“. Tento výraz je v našich končinách takřka neznámý a neexistuje jeho český ekvivalent, proto bude i nadále nazýván svým originálním anglickým výrazem sandite.

3.4.1 Výskyt písku

Kontaminace kolejí pískem nebo sanditem je záměrně prováděna buďto údržbou železnic nebo případně samotným strojvedoucím vlaku. Nejčastější způsob aplikace písku je ze zařízení umístěného na lokomotivě vlaku tak, aby při jeho funkci byl přímo kontaminován kontakt kola a kolejnice. Tyto zařízení bývají obdobné konstrukce, která je ukázána na obr. 3-13 [27]. Princip zařízení spočívá v tom, že písek obsažený v zásobníku je pomocí stlačeného vzduchu tryskán přímo na kolejnici pod projíždějící kolo lokomotivy.



Obr. 3-13 Schéma pískovacího zařízení (přeloženo a upraveno) [27]

Pískování je používáno více méně po celém světě, to však neplatí o sanditu. Ten je výhradou železnic Velké Británie, Irska, Spojených států amerických, Nizozemska a Belgie, kde bývá nasazován proti kontaminaci listím [28]. Aplikace sanditu je prováděna speciálním vlakem, který jede po kolejnici kontaminované listím, to otryskává vysokotlakým proudem vody a následně aplikuje vrstvu sanditu [26]. Sandite se ukázal jako nejlepší řešení pro traťové úseky charakteristické svou častou nízkou adhezí, způsobenou jinými kontaminanty, zejména listím [29].

Sandite může být aplikován třemi způsoby: z kolejového vozidla, z aplikátorů kolem kolejnic, nebo ručními dávkovači [10]. Aplikace z kolejového vozidla je ukázána na obr. 3-14 [30]. Na obrázku si můžeme všimnout trysky a hadičky. Tryska slouží k tryskání vody pod vysokým tlakem tak, aby co nejvíce smyla kontaminanty z povrchu kolejnice. Hadičkou je poté aplikován sandite pro zlepšení adhezních podmínek.



Obr. 3-14 Aplikace sanditu kolejovým vozidlem [30]

Podobným způsobem funguje aplikace ze zařízení kolem kolejnic. Zařízení zaregistruje průjezd vlaku a aplikuje na koleje před ním sandite, který je poté rozježděn na delší vzdálenost. Tyto zařízení jsou instalována v úsecích známých pro častou kontaminaci snižující adhezní podmínky, zejména tedy kontaminaci listím [10]. Zařízení pro aplikaci sanditu jsou používána pouze po dobu deseti týdnů v roce [10].

Ruční aplikátory sanditu vypadají podobně jako vycházková hůl. Na jednom konci mají držák a na druhém kolo, kterým operátor jezdí po kolejnici. Na této tyči je namontován zásobník sanditu, který je po stisknutí spouště operátorem aplikován na kolejnici [10].

3.4.2 Složení písku

Podle pokynů SŽDC (Správa železniční dopravní cesty) musí písek pro pískování splňovat podmínky [31]:

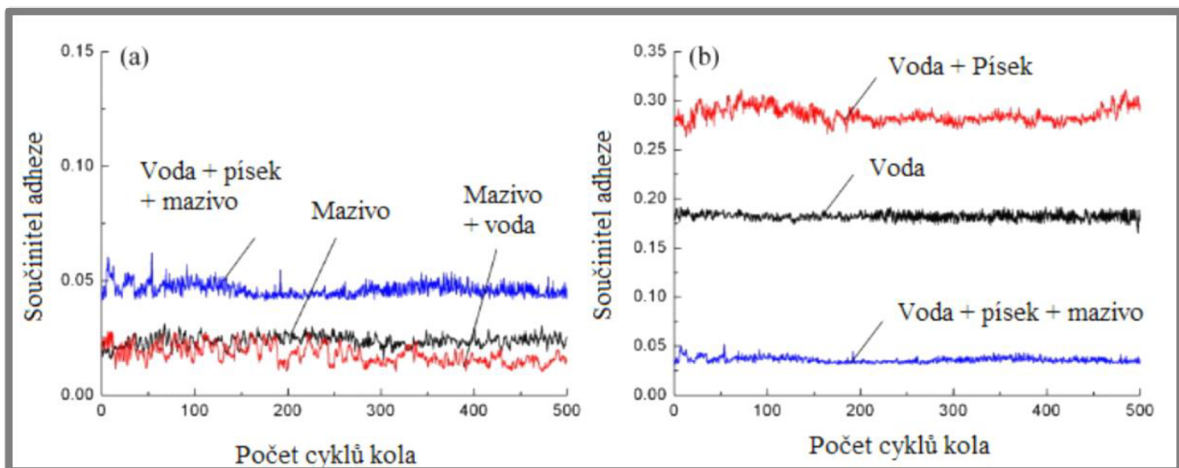
- Křemenný (slévárenský) písek
- Střední velikost zrna 0,82 mm;
- Rozsah zrnitosti 0,3 mm – 1,6 mm;
- Obsah SiO₂ větší než 95%.

Sandite by se měl obecně skládat z písku odpovídající kvality, hliníku a pojiva [32]. Složení komerčních produktů sanditu se však může od tohoto složení mírně lišit. Platit by však mělo vždy, že se jedná o písek, pojivo a příměsi, které zlepšují podmínky kontaktu kola a kolejnice.

Sandite se prodává v různých komerčních provedeních. Příkladem může být Slipmaster [33]: jedná se o viskózní gel na bázi vody s pískem. Je použit 6% roztok Cellofasu (Methylethylcelulóza - C₆H₇O₂(OR₁)(OR₂)(OR₃), kde R₁, R₂ a R₃ je buďto H, nebo C₂₉H₅₄O₁₆ [34]). Roztok Cellofasu je použit k vytvoření gelu, který je s pískem smíchán ve stejném poměru. Dále se přidává ethylenglykol pro získání odolnosti vůči mrazu. Nakonec se přidávají další složky, které mají protibakteriální a protikorozi vlastnosti.

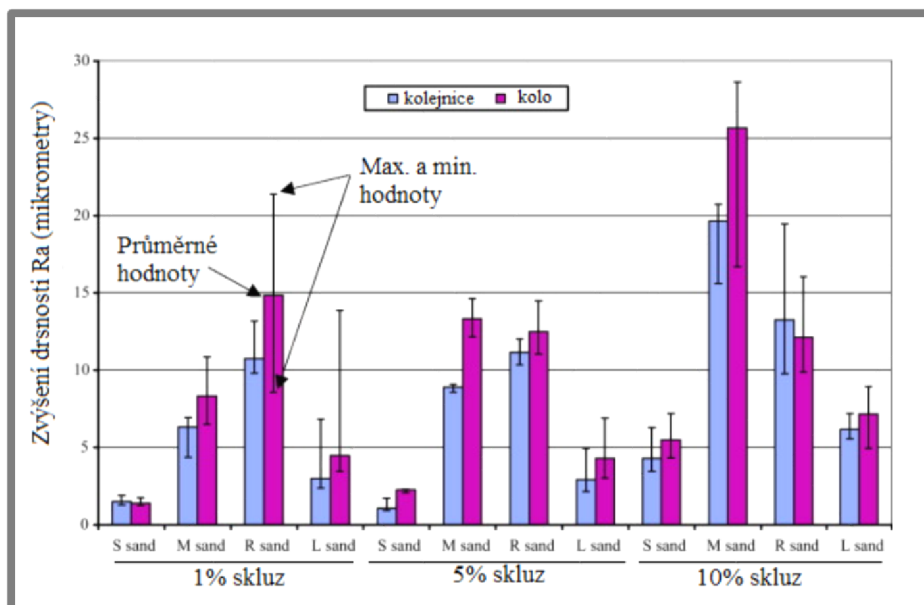
3.4.3 Efekt kontaminace pískem

Kontakt kola a kolejnice se kontaminuje pískem nebo sanditem, pokud je součinitel adheze příliš nízký. Písek i sandite zvyšují tření mezi kolem a kolejnicí. Výzkumem na vliv aplikace písku na součinitel adheze se zabýval W.J. Wang [9]. Výsledky jeho výzkumu jsou ukázány na obr. 3-15 [9]. Zde si můžeme všimnout, že součinitel adheze rapidně vzroste po aplikování písku do kontaktu kontaminovaného vodou a/nebo mazivem. Dále můžeme vidět, že v případě kontaminace vodou a olejem je součinitel adheze nižší, než v případě kontaminace pouze vodou a aplikace písku nemá tak pozitivní účinek, jako v případě bez maziva.



Obr. 3-15 Aplikace písku do kontaktu (přeloženo) [9]

Písek a sandite však nemají pouze pozitivní vlastnosti na kontakt. Jejich aplikací pro zvýšení součinitele adheze je způsobeno také výrazně větší opotřebení povrchů kol a kolejnic. Problematikou opotřebení pískem se zabýval Arias-Cuevas a kol. [35]. Při výzkumu používali 4 druhy písku, označené jako S sand, M sand, L sand a R sand. Varianta R je pojmenována podle railroad – železniční písek. Varianty S, M a L odpovídají velikosti zrn písku – small (0,06 – 0,3 mm), medium (0,3 – 0,6 mm) a large (0,85 – 1,6 mm). Velikost zrn R sand je v intervalu 0,25 – 1,4 mm. Majoritou složení je v případě R 96% SiO₂, v případech S, M a L 99% SiO₂. Na obr. 3-16 [35] jsou ukázány změny drsnosti Ra, v závislosti na použitém písku a procentuálním skluzu kola.

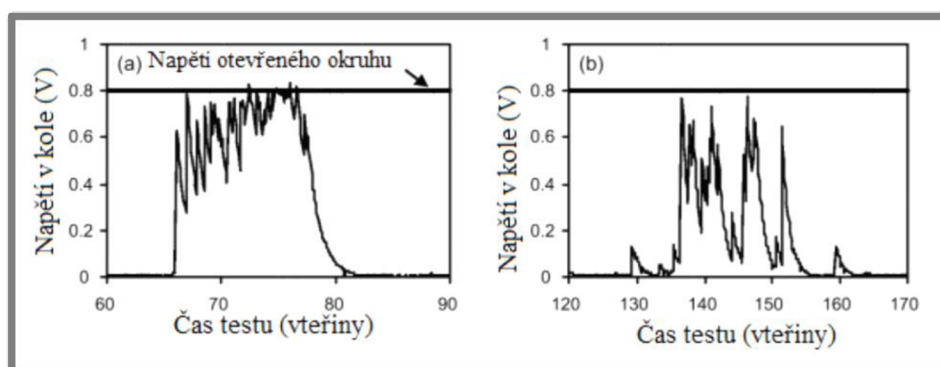


Obr. 3-16 Změny drsnosti při použití písku (přeloženo a upraveno) [35]

Z obr. 3-16 vyplývá, že obecně neplatí, že čím větší průměr zrn písku, tím větší opotřebení. Můžeme si také všimnout, že R sand na rozdíl od ostatních má více méně stejné opotřebení při různých hodnotách skluzu.

Dalším negativním efektem písku je možné elektrické odizolování vlakové soupravy od kolejnic. Tento efekt je již popsán v podkapitole 3.3.3, týkající se kontaminace listím. Efekt je takřka stejný, jediným rozdílem je druh kontaminantu. Pokud bude písek nanesen rovnoměrně na kolejnice po celé délce vlaku a vytvoří souvislou vrstvu, může dojít k odizolování [25] a zabezpečovací zařízení přijde o informaci, že se v daném železničním úseku nachází vlak.

Ve výzkumu R. Lewise a kol. [25] se ukázalo, že kritické je množství písku, které je aplikováno do kontaktu kola a kolejnice. Efekt je demonstrován na obr. 3-17 [25], kde je tok písku a) $0,75 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$ a b) $0,52 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$. Po překročení určité hodnoty dojde k odizolování kola. Hodnota napětí v kole klesne pod kritickou hodnotu, kdy je ještě zabezpečovací zařízení schopno zaregistrovat průchozí signál. Dalším kritériem je vlhkost použitého písku. Horší variantou je paradoxně vlhký písek, který se stlačí, drcen pod projíždějícím kolem [25] a má tak větší izolační schopnost.



Obr. 3-17 Napětí v disku při pískování (přeloženo) [25]

3.5 Modifikátory tření

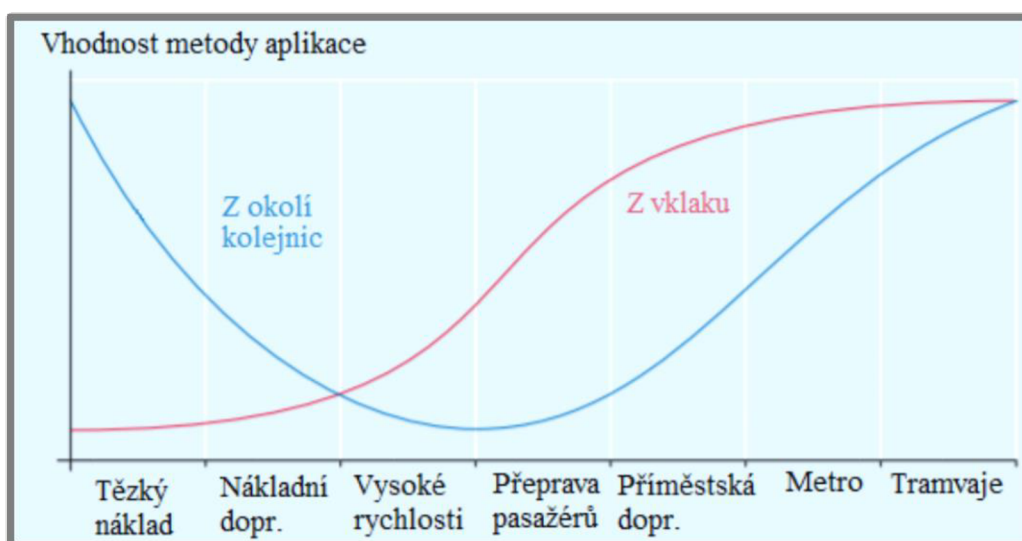
Modifikátory tření jsou komerční přípravky pro aplikaci do kontaktu kola a kolejnice. Širokou paletu materiálů s různými vlastnostmi nabízí spousta firem. V této podkapitole bude představeno několik zástupců, na kterých budou demonstrovány vlastnosti této skupiny kontaminantů.

3.5.1 Výskyt modifikátorů tření

Modifikátory tření se používají zejména u městské kolejové dopravy [36]. Dále je můžeme najít v kritických místech železničních tratí, jakou jsou oblouky nebo výhybky [37]. Díky své všestrannosti však nachází stále více uplatnění a s postupem času pravděpodobně nahradí např. pískování.

Modifikátor tření můžeme rozdělit do dvou základních skupin podle toho, kde mají působit: TOR modifikátory [38] (top of rail, angl. vršek kolejnice) a GF modifikátory [38] (gauge face, angl. bok kolejnice).

Aplikace je možná třemi způsoby: z vozidla, ze zařízení kolem kolejnic nebo ruční aplikací. Nejpoužívanější jsou první dvě zmíněné metody. Jejich vhodnost z hlediska různých nároků je ukázána na obr. 3-18 [39].

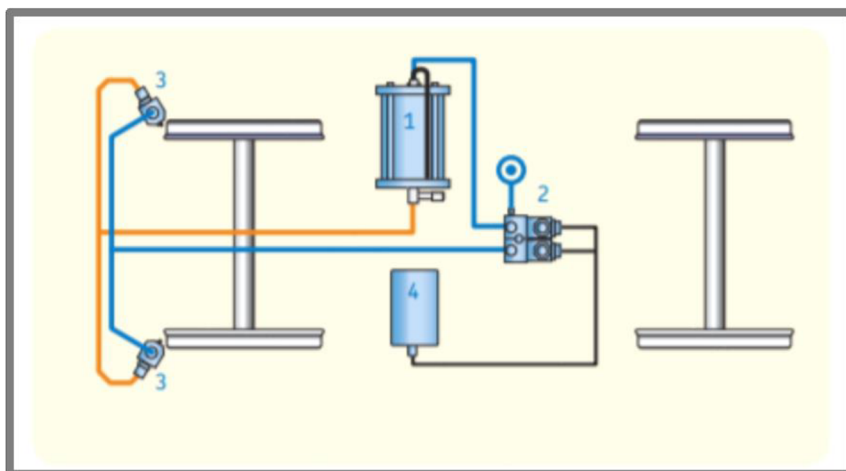


Obr. 3-18 Vhodnost metod aplikace modifikátorů tření (přeloženo) [39]

Firma SKF používá čtyři různé metody aplikace z vlaku [39]:

- EasyRail Airless
- EasyRail Compact
- EasyRail Low-Pressure
- EasyRail High-Pressure

Všechny 4 způsoby fungují podobným principem. V systému se nachází zásobník modifikátoru tření, který je hnán různými způsoby do trysky, kterou je následně tryskán do kontaktu kola a kolejnice. V případě Airless je hnán elektrickou pumpou, Compact je poháněn pneumatickou pumpou, Low a High-Pressure jsou poháněny tlakovým zásobníkem. Existují provedení pro modifikování obou kol zároveň, nebo nezávisle. Ilustrační schéma Low-Pressure systému pro aplikování modifikátoru tření na obě kola zároveň je ukázán na obr. 3-19 [39], kde 1 je tlakový zásobník vzduchu, 2 regulační ventil, 3 trysky a 4 řídicí jednotka a senzor.

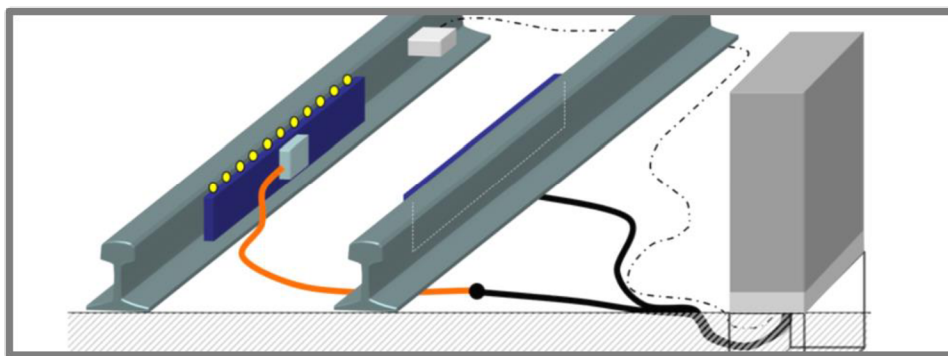


Obr. 3-19 Systém aplikace Low-Pressure [39]

Pro aplikaci z okolí kolejnic nabízí SKF čtyři systémy [39]:

- Gauge face lubrication
- Restraining rail systems
- Top-of-rail (TOR) protection
- Rail lubrication through lubrication holes

Metoda Gauge face lubrication funguje tak, že je pomocí zařízení ukázaném na obr. 3-20 [40] z vnitřní strany kolejnic aplikován modifikátor tření a projíždějící vlak pomocí svých okolků nabere modifikátor, který se tak dostane do kontaktu okolku a boku kolejnice [39]. Na obrázku můžeme vidět zařízení pro aplikaci (modré), aplikovaný modifikátor (žlutý) a vpravo zásobník modifikátoru.



Obr. 3-20 Gauge face lubrication [40]

Metoda restraining rail systems funguje na principu přidání přídržné kolejnice, která drží vždy jedno kolo z páru na dané ose, které je tedy přídržováno z obou stran. Toto zařízení se používá v ostřejších obloucích a výhybkách. Vzniká však zvýšené opotřebení a hlavně vysoká hluková emise. Právě z těchto důvodů se používá modifikátor pro snížení tření mezi okolkem a kolejnicí, aby nedocházelo k opotřebení a zvýšenému hluku [39]. Toto zařízení je ukázáno na obr. 3-21 [39]. Na obrázku vidíme zařízení pro aplikaci modifikátoru, které se nachází právě na přídržné kolejnici.

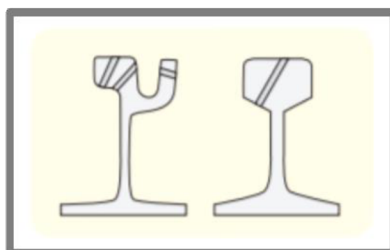


Obr. 3-21 Restraining rail systems [39]

Systém Top-of-rail (TOR) protection funguje podobně jako metoda Gauge face lubrication, dochází však k aplikaci na vršek kolejnice. Tato metoda zvládá pokrýt až 500m dlouhý úsek kolejí, pro delší úseky je vhodné zvolit jiný druh aplikace [39]. Metoda se dělí na dva typy:

- a) Single-Line Injection Device (SLID). Zařízení SLID je možné namontovat z vnitřní i vnější strany kolejnic. Je schopno aplikovat modifikátor tření na dostatečně velkou vzdálenost tak, aby nedošlo ke kontaktu okolku s tímto zařízením. Nedotýká se tak přímo kolejnice ani kola. [39]
- b) The Contact Aplicator. Toto zařízení je namontováno na vnější straně kolejnice a kontaminuje její vršek. Při průjezdu vlaku se modifikátor dostává do kontaktu kola a kolejnice a je dále roznesen po delším úseku kolejnice. [39]

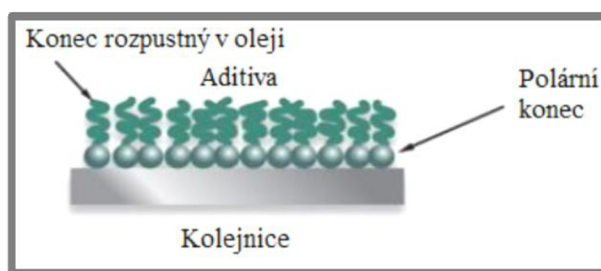
Poslední zmíněnou metodou je Rail lubrication through lubrication holes. Ta se používá převážně pro tramvajovou dopravu a metro, protože koleje v těchto případech nejsou namáhány tak velkou zátěží [39]. Systém funguje na principu vrtání děr do kolejnic, skrz které je posléze na vršek kolejnic dopravován modifikátor tření pomocí nainstalovaného zařízení. Schéma provrtání kolejnic je ukázáno na obr. 3-22 [39].



Obr. 3-22 Rail lubrication through lubrication holes [39]

3.5.2 Složení modifikátorů tření

Modifikátory se skládají z pojiva a aditiv, které při aplikaci do kontaktu kola a kolejnice upravují jeho vlastnosti požadovaným způsobem. Mohou obsahovat estery, přírodní a syntetické mastné kyseliny nebo i tuhé látky, například grafit a disulfid molybdenu [41]. Tyto molekuly mají polární konec (hlavu) a druhý konec rozpustný v oleji (ocas) [41]. Při aplikaci se tato hlava přichytí na kovový povrch a vytvoří vazbu. Tento efekt je ukázán na obr. 3-23 [41].



Obr. 3-23 Struktura modifikátorů tření (přeloženo a upraveno) [41]

TOR modifikátory tření můžeme podle složení rozdělit do tří skupin [42]:

- TOR olejové (na základě oleje)
- TOR mazací tuky
- TOR hybridní (na základě oleje a vody)

Hybridní jsou často také označovány jako vodní, i když obsahují značné množství oleje [42]. Tyto základní látky modifikátorů slouží jako transportní médium, pomocí kterého se dostává modifikátor do kontaktu kola a kolejnice. Modifikátory můžeme dále rozdělit podle jejich charakteristik schnutí. Hybridní modifikátory obsahují vodu, která v kontaktu kola a kolejnice rychle schne [42], což se u prvních dvou skupin neděje. Modifikátory tak můžeme rozdělit na schnoucí a neschnoucí, které mají rozdílný efekt na kontaminaci kontaktu kola a kolejnice.

Podle jiného zdroje je můžeme rozdělit do tří skupin [43]:

- lubrikanty
- modifikátory tření
- zesilovače tření

Kde se TOR lubrikanty poté dělí na olejové, mazací tuky a hybridní. Lubrikanty zůstávají při aplikaci dlouho vlhké a zachovávají si tak stálé vlastnosti. TOR modifikátory tření schnou a v závislosti s tímto efektem se mění i jejich vlastnosti. Modifikátory tření se také někdy nazývají „High positive friction modifier“ (HPF). Tyto modifikátory mohou mít i tuhou konzistenci. Mezi zesilovače tření můžeme zařadit například i písek. Moderní zesilovače tření jsou však více sofistikované a jako účinnou látku používají například ocel nebo hliník. [43]

Samotné chemické složení modifikátorů tření je poměrně složité a velmi různorodé v závislosti na výrobci daného modifikátoru. Výrobci také často nechtějí zveřejňovat složení svých produktů a jen uvádějí, na jaké bázi jsou dané modifikátory a jaký je jejich efekt kontaminace. Pro podrobnější studium chemického složení jsou doporučeny například tři patenty [44, 45, 46], ve kterých jsou vyjmenovány jednotlivé obsažené chemické látky.

V patentu US6759372B2 – Friction control composition with enhanced retentivity [44] může být přiblíženo složení modifikátorů v doprovodu všech ostatních používaných aditiv. Modifikátory tření mohou být používány s obsahem například:

- Reologická složka (ovlivňující deformační vlastnosti)
- Remenenční složka (ovlivňující vnitřní zbytkovou magnetizaci)
- Tekutý lubrikant (snižující tření)
- Antioxidanty (zvýšení odolnosti vůči korozi)

Dalším patentem pro ukázkou možného složení je US9617498B2 – Positive friction control composition for railways [45]. Mimo dříve zmíněné složky obsahuje také:

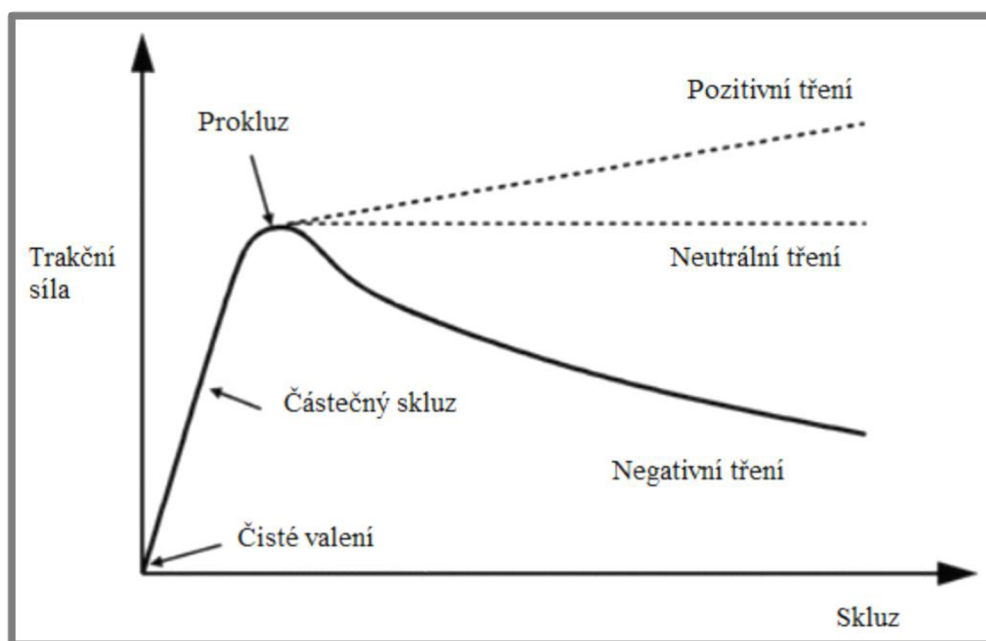
- Složku nerozpustnou ve vodě
- Vodou rozpustný polyalkohol (pro zvýšení odolnosti vůči mrazu)
- Tekutý nebo pevný modifikátor tření
- Tekutý nebo pevný lubrikant

Posledním zmíněným patentem zde je US5919295A – Locomotive adhesion enhancing material mixtures [46]. Ten popisuje metodu zvýšení adheze lokomotivy pomocí speciální směsi, která se skládá z částic hliníku, titanu a oxidů železa. Tato směs může mít formu prášku, pasty na bázi vody nebo alkoholu, nebo kovového kompozitu obsahujícího tuto směs [46].

3.5.3 Efekt kontaminace modifikátory tření

Primární funkcí modifikátorů tření, jak napovídá jejich název, je změna hodnoty součinitele tření v kontaktu kola a kolejnice. Můžeme je rozdělit do dvou skupin – modifikátory snižující a zvyšující tření. Modifikátory tření zvyšující tření jsou označeny zkratkou HPF (high positive friction), modifikátory snižující tření jako LCF (low coefficient of friction).

Po aplikaci mění modifikátory tření tvar trakční křivky. HPF modifikátory mění negativní tření v křivce na neutrální. Zesilovače tření mění tvar křivky na pozitivní tření. Tyto efekty jsou ukázány na obr. 3-24. [43]



Obr. 3-24 Chování modifikátorů tření (přeloženo) [49]

Příklad modifikátoru tření pro aplikaci na okolek může být Kelsan LCF Solid Stick [47]. Ten má podle výrobce zaručit součinitel tření v kontaktu okolku a boku kolejnice menší než 0,15. Tření v tomto kontaktu by mělo být co nejnižší [1], čemuž pomáhá právě kontaminace tímto kontaminantem. Dalšími pozitivními vlastnostmi kontaminace jsou podle výrobce [48]:

- Prodloužení životnosti okolků
- Prodloužení životnosti boků kolejnic
- Snížení hlučnosti valení okolků po boku kolejnice
- Nekontaminování vršku kolejnice
- Ekologičnost

Další zástupcem může být Kelsan HPF Solid Stick [49]. Již podle názvu lze poznat, že zvyšuje tření v kontaktu kola a kolejnice. Výrobce zaručuje, že hodnota součinitele tření v kontaktu běhounu kola a vršku kolejnice je po aplikaci 0,35, což je ideální hodnota pro valení kola po kolejnici [1]. Mezi další zmíněné výhody výrobcem patří:

- Snížení opotřebení běhounu kola
- Snížení opotřebení vršků kolejnic
- Snížení hlučnosti valení běhounu po vršku kolejnice
- Omezení vzniku vlnitostí na kolejnicích (ukázaných na obr. 3-25 [50])
- Snížení příčných sil



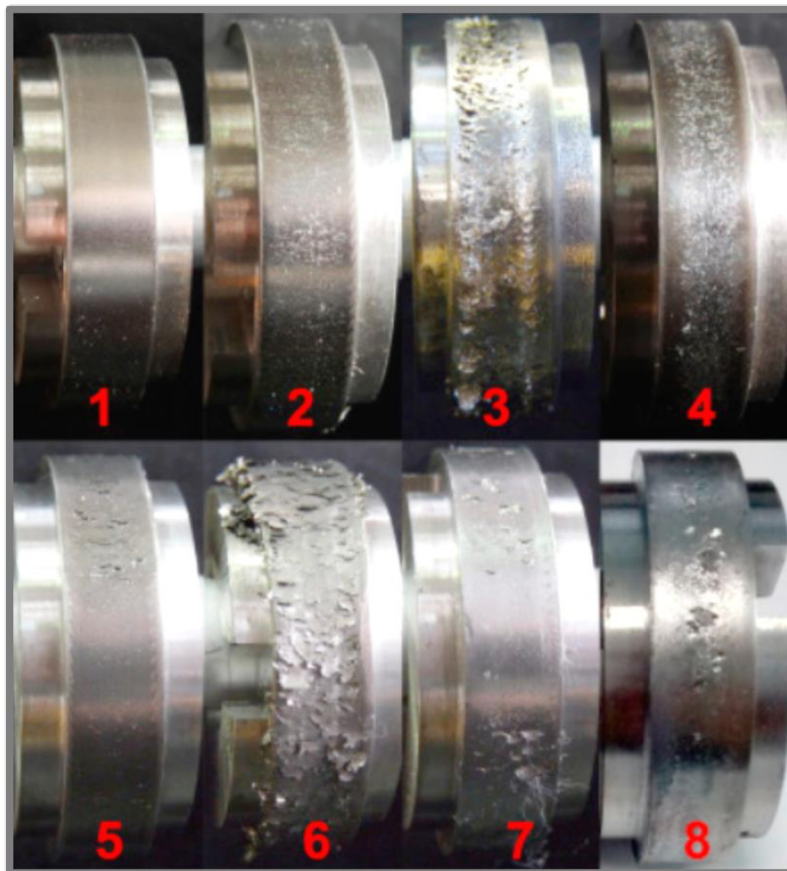
Obr. 3-25 Defekt kolejnic - zvlnění [45]

Změna součinitele tření v kontaktu kolejnice je nejdůležitější následek kontaminace kontaktu kola a kolejnice modifikátory tření. Mezi sekundární následky můžeme zařadit snížení opotřebení kol a kolejnic a snížení hlukových emisí. Do modifikátorů tření však mohou být přidány další účinné látky, které mají za následek například:

- Zlepšení korozivzdornosti [44]
- Zlepšení mrazuvzdornosti [45]
- Zvýšení odolnosti proti rozpustnosti vodou [45]
- Biocidní vlastnosti [45]
- Fungicidní vlastnosti [45]
- Zlepšení deformačních vlastností [44]
- Zlepšení vlastností zbytkové magnetizace [44]

Modifikátory tření však nemají pouze pozitivní účinky. Otázkou je ekonomičnost a implementace těchto technologií. Dalším negativním účinkem je šíření trhlin, když se do nich dostane tekutina, která pomáhá zvýšením a distribucí tlaku v trhlině při průjezdu kola. [41]

Opotřebení povrchů kol a kolejnic při použití modifikátorů je demonstrována v experimentu na twin diskovém tribometru. Ukázky výsledné struktury povrchů jsou ukázány na obr. 3-26 [41], po kterém následuje tab. 3-2 [41], ve které jsou popsány podmínky jednotlivých pokusů. U všech platí, že byly prováděny při zatížení 1500 MPa a 1% skluzu.



Obr. 3-26 Povrch disků [41]

Tab. 3-2 Podmínky experimentu s modifikátory tření (přeloženo) [41]

Pořadí	1	2	3	4	5	6	7	8
Modifikace	Suchý kontakt	Suchý kontakt	Voda	TOR-FM	GF lubrikant	TOR lubrikant (olej)	TOR lubrikant (maz.tuk)	TOR hybrid
Počet otáček	4000	25000	25000	25000	25000	25000	25000	25000

Z obr. Z a tab. 3-2 můžeme vyvodit závěry, že při aplikaci všech lubrikantů dochází ke znatelnému poškození povrchů disků. V případech 3, 6 a 7 je povrch ve znatelně horším stavu než při použití suchých disků. Při použití TOR-FM v případě 4 je srovnatelně poškozen jako při použití suchého disku. Lze také dojít k závěru, že by poškození v případě 3 – po kontaminaci vodou – mohlo být menší při použití TOR-FM. Experiment byl prováděn pouze při 1% skluzu, při větším by bylo poškození znatelně větší. Posledním závěrem, ke kterému můžeme díky tomuto experimentu dojít, je, že pokud dojde vinou poruchy k samovolné aplikaci lubrikantů do kontaktu, může dojít v provozu ke zvýšenému opotřebení kolejnic a obzvláště kol.

4 DISKUZE

Z přehledu současného stavu poznání vyplývá, že kontaminanty mají na kontakt kola a kolejnice zásadní vliv. Do kontaktu kola a kolejnice se dostává mnoho druhů kontaminantů. V diskuzi je uvedeno jejich zhodnocení v závislosti na vytyčené cíle této bakalářské práce. Vyjmenováno bylo 6 nejdůležitějších kontaminantů:

- Voda
- Maziva a pohonné hmoty
- Listí
- Písek
- Sandite
- Modifikátory tření

Voda patří mezi nejběžnější kontaminanty. Jedná se o klimatický kontaminant [7], tzn. je přírodního původu. Do kontaktu se dostává pomocí deště, sněžení, případně vlhkosti vzduchu. To z ní dělá kontaminant, proti jehož kontaminaci se nelze preventivně bránit. Složení vody nemusí být pouze molekuly H_2O , voda může také obsahovat sůl [16], nebo kyseliny kyselých dešťů [14]. Efektem kontaminace je snížení tření v kontaktu v závislosti na množství vody v kontaktu [9]. Následkem snížení tření, způsobeným kontaminací vodou, je zhoršení akcelerace a prodloužení brzdné dráhy. Mohou tak vznikat zpoždění vlaků. Při výraznějším snížení tření a použití větší trakce může dojít k prokluzu, který má potenciál mechanicky poškodit kola a kolejnice. Kontaminace je tedy nežádoucí, nelze se jí však vyhnout a neexistují ani žádné efektivní metody k jejímu odstranění.

Maziva a pohonné hmoty patří mezi provozní, případně transportní kontaminanty [7]. Jejich výskyt v kontaktu je poměrně vzácný. Dostávají se do něj následkem úniku z lokomotivy nebo vagónů. Kontaminace je už jen díky tomuto naprosto nežádoucí. Při kontaminování kontaktu dochází k výraznému snížení tření [9], závažnějším než je tomu u vody. Riziko prokluzu je ještě větší a pro funkčnost dopravy už musí být v takovéto situaci použity metody ke zvýšení tření v kontaktu, např. pískováním nebo aplikací modifikátorů tření.

Listí je nenápadný, často podceňovaný a velmi nebezpečný kontaminant. Patří mezi klimatické kontaminanty [7]. Je charakteristické pro podzimní měsíce, kdy padá ze stromů. V tomto období musí dbát strojvedoucí i údržba železnic zvýšené opatrnosti. Oblasti v různých úsecích tratě jsou často známé právě pro pravidelnou kontaminaci listím a je vyvíjeno úsilí tyto úseky více udržovat. Vše se tak děje kvůli tomu, že je listí na kolejích rozježděno do tenké, velmi kluzké a velmi odolné vrstvy [1]. To je následkem látek obsažených v listí, zejména tzv. pektinu [22]. Ten při rozdrčení pod koly vlaků nabývá konzistence gelu, který je velmi kluzký. Navíc v něm při výzkumu byly nalezeny iony železa [18], což znamená, že chemicky reaguje s povrchem kolejnic. To vysvětluje odolnost této vrstvy listí proti jakémukoliv pokusu o odstranění z povrchu kolejnic. Místo odstranění se aplikují látky pro zvýšení adheze, např. sandite nebo modifikátory tření. Jejich aplikací jsou zlepšeny podmínky trakce v kontaktu a je tak dosaženo lepší provozuschopnosti dané tratě. **Písek** je jednoduchý a účinný způsob, jak zvýšit tření v kontaktu. Jedná se o provozní kontaminant [7]. Složením směsi pro pískování je křemičitý písek s čistotou alespoň 95% [31]. K aplikaci dochází ze zařízení umístěných na lokomotivě, které dostávají písek přímo do kontaktu kola a kolejnice. Jedná se tak o poměrně jednoduchý, ale účinný způsob, jak zvýšit tření v kontaktu. To sebou však přináší i negativa. Hlavním je zvýšení abrazivního poškození kol a kolejnic [35]. Proto se písek používá pouze v kritických situacích. Zejména pak když je tření v kontaktu tak nízké, že dochází k prokluzu. Kontaminace pískem má také potenciál způsobit nefunkčnost zabezpečovacího zařízení tratě, k čemuž dojde při odizolování kola od kolejnice [25]. Zabezpečovací zařízení však selže pouze v případě, pokud dojde k odizolování všech soukolí v daném úseku tratě. Navíc je k tomuto efektu potřeba lehčí krátký vlak, který nepůsobí v kontaktu velkým zatížením a který sype do kontaktu velké množství písku. V laboratorních podmínkách bylo tohoto efektu dosaženo, v reálných podmínkách se však tento problém nejvíce jeví jako příliš pravděpodobný.

Sandite je poměrně zajímavá látka na hranici mezi pískem a modifikátorem tření. Jedná se o provozní kontaminant [7]. Skládá se z písku, pojiva a další účinné látky, většinou hliníku nebo oceli. S pískem má velmi společného, jedná se však o sofistikovanější metodu kontaminace kontaktu za účelem zvýšení tření. Další zajímavostí je, že se používá pouze v pár zemích světa, zejména pak ve Velké Británii. Zde bývá nasazován proti kontaminaci listím [10]. Aplikuje se z lokomotiv, ze speciálně určených vlaků pro údržbu kolejí, nebo ze stacionárních zařízení v blízkosti kolejnic na vytypovaných úsecích tratě.

Modifikátory tření jsou pravděpodobně nejsložitějším kontaminantem, nacházejícím se v kontaktu kola a kolejnice. Řadí se mezi provozní kontaminanty [7]. Do kontaktu se aplikují záměrně, a to ze zařízení umístěném na lokomotivě, případně stacionárním zařízení v blízkosti kolejnic. Modifikátory tření se v současné době používají zejména u tramvajové dopravy (hlavně kvůli redukci hluku [36]) a u železniční dopravy, pro aplikaci ve velmi namáhaných místech (např. oblouky a výhybky [37]). Problém nastává při rozdělení

modifikátorů tření. Rozdělení není jednotné a v určitých kategoriích způsobuje názvosloví zmatení. To přiznává sám autor publikace, podle které se řídí rozdělení v této práci [43]. Rozdělit je můžeme podle místa aplikace – TOR (top of rail) a GF (gauge face). TOR se dále dělí na modifikátory tření, lubrikanty a zesilovače tření [43]. Zde je vidět, že ani toto rozdělení není příliš praktické, když se jedna z podskupin z modifikátorů tření jmenuje TOR modifikátory tření, zatímco další modifikátory tření jsou TOR lubrikanty a TOR trakční zesilovače. Podle R.D. Stocka je možné rozdělit TOR modifikátory tření na olejové, mazací tuky a hybridní [42]. Toto složení se ale podle publikace M. Harmona a R. Lewise překrývá, protože olejové TOR modifikátory tření nejsou modifikátory tření, ale lubrikanty [43]. Zde je vidět problém při označování modifikátorů tření. Co se týče využití modifikátorů tření, mají tyto látky široké užití. Nejčastěji se používají TOR lubrikanty pro snížení opotřebení a hlučnosti. TOR modifikátory tření jsou využívány pro modifikaci kontaktu tak, aby nabýval ideálních hodnot tření pro valení kol. TOR zesilovače tření jsou používány podobně jako písek, v krizových situacích, kdy je potřeba zvýšit aktuálně nízké tření v kontaktu. Z hlediska trendů poslední doby dochází k širšímu použití modifikátorů tření v kolejové dopravě. V budoucnu by tyto látky měly nahradit například písek nebo sandíte a stát se tak každodenní součástí kolejové dopravy.

5 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce pojednává o problematice kontaminace kontaktu kola a kolejnice. Obsahem této práce je rešeršní studie, pojednávající o výskytu kontaminantů, jejich složení a výsledném efektu na kontakt kola a kolejnice. Do studie bylo vybráno šest nejvlivnějších kontaminantů, jmenovitě: voda, maziva, listí, písek, sandite a modifikátory tření.

Na začátku rešeršní části je stručně popsána problematika kontaktu kola a kolejnice, sloužící k pochopení kontaminace tohoto kontaktu. Dále jsou v rešeršní části popsány jednotlivé výše zmíněné kontaminanty.

V diskuzi je vytvořen stručný přehled kontaminantů a jejich základní charakteristika. Dále je zde komentován jejich výskyt, složení a efekt na kontakt kola a kolejnice.

Cíle v rámci bakalářské práce jsou považovány za splněné. Tuto rešeršní studii lze použít jako úvod do problematiky kontaminace kontaktu kola a kolejnice, případně jako její stručný přehled. Jsou zde však popsány pouze hlavní kontaminanty a práce nezachází do úplných detailů u jednotlivých kontaminantů. To může být námětem pro budoucí výzkum týkající se této problematiky.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] LEWIS, R. (Roger) a Ulf OLOFSSON. *Wheel-rail interface handbook*. Cambridge: Boca Raton: Woodhead ; CRC Press, 2009, xxii, 842 s. : il. ISBN 978-1-84569-412-8.
- [2] HANNING & KAHL [online]. [cit. 2019-03-05]. Dostupné z: <https://www.hanning-kahl.com/products/sanding-system/gripmasterr.html>
- [3] KVARDA, Daniel. *Vliv složení modifikátorů tření na trakci v kontaktu kola a kolejnice*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2017.
- [4] Pojednání o styku kola a kolejnice. [online]. ŽelPage, ©2001 – 2019. [cit. 2019-5-15]. Dostupné z: <https://www.zelpage.cz/clanky/pojednani-o-styku-kola-a-kolejnice>
- [5] ARSLAN, Mehmet ali a Oğuz KAYABAŞI. 3-D Rail–Wheel contact analysis using FEA. *Advances in Engineering Software* [online]. Elsevier, 2011 [cit. 2019-03-10]. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2011.10.009. ISSN 0965-9978.
- [6] ZHU, Yi. *Adhesion in the wheel-rail contact* [online]. 2013 [cit. 2019-03-22]. ISBN 9789175018966. ISSN 1400-1179.
- [7] DESCARTES, S., C. DESRAYAUD, E. NICCOLINI a Y. BERTHIER. Presence and role of the third body in a wheel–rail contact. *Wear* [online]. Elsevier B.V, 2005, **258**(7), 1081-1090 [cit. 2019-03-22]. DOI: 10.1016/j.wear.2004.03.068. ISSN 0043-1648.
- [8] OLOFSSON, U a K SUNDVALL. Influence of leaf, humidity and applied lubrication on friction in the wheel-rail contact: Pin-on-disc experiments. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* [online]. London, England: SAGE Publications, 2004, **218**(3), 235-242 [cit. 2019-04-01]. DOI: 10.1243/0954409042389364. ISSN 0954-4097.
- [9] WANG, W.j., H.f. ZHANG, H.y. WANG, Q.y. LIU a M.h. ZHU. Study on the adhesion behavior of wheel/rail under oil, water and sanding conditions. *Wear* [online]. Elsevier B.V, 2011, **271**(9), 2693-2698 [cit. 2019-03-22]. DOI: 10.1016/j.wear.2010.12.019. ISSN 0043-1648.
- [10] MEGEL, Eric E. A Survey of Wheel/Rail Friction. [online]. [cit 2019-05-15]. Dostupné z: <https://www.fra.dot.gov/Elib/Document/17468>
- [11] ZHU, Y., X. CHEN, W. WANG a H. YANG. A study on iron oxides and surface roughness in dry and wet wheel–rail contacts. *Wear* [online]. Elsevier B.V, 2015, **328-329**, 241-248 [cit. 2019-03-22]. DOI: 10.1016/j.wear.2015.02.025. ISSN 0043-1648.
- [12] ZHU, Yi. *Adhesion in the wheel-rail contact under contaminated conditions* [online]. 2011 [cit. 2019-04-01]. ISBN 9789175011813. ISSN 1400-1179.
- [13] LYU, Y, E BERGSETH a U OLOFSSON. Open System Tribology and Influence of Weather Condition. *Scientific Reports* [online]. NATURE PUBLISHING GROUP, 2016, **6**(1) [cit. 2019-04-01]. DOI: 10.1038/srep32455. ISSN 2045-2322.
- [14] Clean Air Act Reduces Acid Rain In Eastern United States. *ScienceDaily*. [online]. Penn State. [Cit. 2019-5-16]. Dostupné z: <https://www.sciencedaily.com/releases/1998/09/980928072644.htm>

- [15] YUANCHENG, Ni, Zhu ERYU a Chen ZHUO. Experimental Study on the Durability of Monorail Track Beam After Acid Rain Corrosion. *Urban Rail Transit* [online]. Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017, **3**(3), 167-171 [cit. 2019-04-05]. DOI: 10.1007/s40864-017-0068-y. ISSN 2199-6687.
- [16] PYKE, D. Stop the rot! [online.] *Rail Engineer*, 141, 66-67 [cit. 2019-5-15]. Dostupné z: <https://issuu.com/railmedia/docs/tre-july-2016/66>
- [17] Grease: *What it is; How it works*. [online]. Barks Publications, Inc., ©2009. [cit. 2019-5-15]. Dostupné z: <https://lurl.cz/XMd5N>
- [18] ISHIZAKA, Kei, Stephen r. LEWIS a Roger LEWIS. The low adhesion problem due to leaf contamination in the wheel/rail contact: Bonding and low adhesion mechanisms. *Wear* [online]. Elsevier B.V, 2017, **378-379**, 183-197 [cit. 2019-04-07]. DOI: 10.1016/j.wear.2017.02.044. ISSN 0043-1648.
- [19] OMASTA, Milan, Martin MACHATKA, David SMEJKAL, Martin HARTL a Ivan KAUPKA. Influence of sanding parameters on adhesion recovery in contaminated wheel-rail contact. *Wear* [online]. Elsevier B.V, 2015, **322-323**, 218 [cit. 2019-05-16]. ISSN 0043-1648.
- [20] Rail.co.uk. Leaves on the Line. [online]. Rail.co.uk, ©2017. Dostupné z: <http://www.rail.co.uk/rail-news/2012/leaves-on-the-line/>
- [21] J. D. OVINGTON, THE COMPOSITION OF TREE LEAVES, *Forestry: An International Journal of Forest Research*, Volume 29, Issue 1, 1956, Pages 22–28, <https://doi.org/10.1093/forestry/29.1.22>
- [22] https://www.researchgate.net/figure/Simplified-scheme-of-a-pectin-molecule-with-possible-attached-methyl-and-acetyl-groups_fig1_270818200
- [23] Y. Zhu, U. Olofsson, R. Nilsson, A field test study of leaf contamination on railhead surfaces, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, 228 (2014), pp. 71-84
- [24] P. Hyde, D. Fletcher, A. Kapoor, S. Richardson, Full scale testing to investigate the effect of rail head treatments of differing pH on railway rail leaf films, in: *Proceedings of the World Congress on Railway Research*, May 18–22, 2008, Seoul, South Korea, 2008.
- [25] LEWIS, R., E.a. GALLARDO, J. COTTER a D.t. EADIE. The effect of friction modifiers on wheel/rail isolation. *Wear* [online]. Elsevier B.V, 2011, **271**(1), 71-77 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.1016/j.wear.2010.10.036. ISSN 0043-1648.
- [26] HUANG, Wanliang, Xi CAO, Zefeng WEN, Wenjian WANG, Qiyue LIU, Minhao ZHU, Xuesong JIN a Wanliang HUANG. A Subscale Experimental Investigation on the Influence of Sanding on Adhesion and Rolling Contact Fatigue of Wheel/Rail Under Water Condition. *Journal of Tribology (Transactions of the ASME)* [online]. 2017, **139**(1) [cit. 2019-04-16]. DOI: 10.1115/1.4033100. ISSN 0742-4787. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/1893891119/>
- [27] RailSystem. Sanding systems. [online]. RailSystem, ©2015. [cit 2019.5.15]. Dostupné z: <http://www.railsystem.net/sanding-systems/>

- [28] Sandite, [online]. Wikipedie, [cit. 2019-5-15]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sandite>
- [29] Cooper, P.R., I.J. McEwen, The development of Sandite a liquid-sand adhesion improver, [online]. BR Research Report Ref: TM-TRIB-14(A) [cit. 2019-5-15].
- [30] Slippery rail, [online]. Wikipedie, [cit. 2019-4-28]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Slippery_rail
- [31] MRHÁLEK, L., J. KALÁČ. Pokyny provozovatele dráhy pro zajištění plynulé a bezpečné drážní dopravy č. 1/2008 – novelizace 09/2008. [online]. Správa železniční dopravní cesty, státní organizace, 6 [cit 2019-5-16]. Dostupné z: <https://1url.cz/IMd5W>
- [32] BRADLEY, Simon. The Railways: Nation, Network and People. [online]. PROFILE BOOKS LTD. [cit 2019.5.15]. eISBN 978 1 84765 352 9.
- [33] COOPER, P. R., MCEWEN, I. J. The Development of Sandite – A Liquid-Sand Adhesion-Improver. [online]. BR Research Report Ref: TM-TRIB-14(A). [cit 2019.5.15]. Dostupné z: <https://1url.cz/9Mdhs>
- [34] PubChem. Methylethylcellulose. [online]. U.S. National Library of Medicine. [cit 2019.5.15]. Dostupné z: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/24832111>
- [35] ARIAS-CUEVAS, Oscar, Zili LI a Roger LEWIS. A laboratory investigation on the influence of the particle size and slip during sanding on the adhesion and wear in the wheel–rail contact. *Wear*[online]. Elsevier B.V, 2011, **271**(1), 14-24 [cit. 2019-04-20]. DOI: 10.1016/j.wear.2010.10.050. ISSN 0043-1648.
- [36] Sklenář, *technologie pro kolejovou dopravu* [online]. Sklenář, s. r. o., ©2019. [cit. 2019-5-15]. Dostupné z: <https://www.sklenar-tribotechnika.cz/>
- [37] GALAS, R., 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* [online]. University of Kragujevac, 2017, **39**(2), 198-206 [cit. 2019-05-16]. DOI: 10.24874/ti.2017.39.02.06. ISSN 0354-8996. Dostupné z: <https://doaj.org/article/64bacbaee72c47bb87d6d8f50bacaef>
- [38] BUCKLEY-JOHNSTONE, L. E., Wheel/Rail Contact Tribology: Characterising Low Adhesion Mechanisms and Friction Management Products. [online]. University of Sheffield, uk.bl.ethos.714334, 185 [cit 2019.5.15]. Dostupné z: http://etheses.whiterose.ac.uk/17291/1/me111eb_PhD_finalthesis.pdf
- [39] SKF. Managing friction successfully. [online]. SKF Group. [cit 2019.5.15]. Dostupné z: <https://www.skf.com/binary/79-160324/14824-EN.pdf>
- [40] SKF. Wiper Bars. [online]. SKF Group. [cit 2019.5.15]. Dostupné z: <https://www.skf.com/group/industry-solutions/railways/railway/wayside-lubrication-systems/main-lines/wiper-bars/index.html>
- [41] Noria Corporation. Machinery Lubrication. What are Friction Modifiers? [online]. Noria Corporation, ©2019. [cit 2019.5.15]. Dostupné z: <https://www.machinerylubrication.com/Read/28815/what-are-friction-modifiers>

- [42] Stock, R.D., Stanlake, L.J., Hardwick, C., Yu, M., Eadie, D.T., & Lewis, R.W. Material concepts for top of rail friction management - Classification, characterisation and application. *Wear* [online]. Elsevier B.V, 201, 2016, 366-367, 225-232 [cit 2019.5.15]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.05.028>
- [43] HARMON, M. a R. LEWIS. Review of top of rail friction modifier tribology. *Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces* [online]. Taylor & Francis, 2016, **10**(3), 150-162 [cit. 2019-05-16]. DOI: 10.1080/17515831.2016.1216265. ISSN 1751-5831.
- [44] Kelsan Technologies Corp. Friction control composition with enhanced retentivity. Inventor: John COTTER. Worldwide applications. US6759372B2. 12. 4. 2002.
- [45] Whitmore Manufacturing LLC. Positive friction control composition for railways. Inventors: Kelvin CHIDDICK, Alejandro MEDRANO, Randal KRINKER, Kyle WILSON, David BIRDWELL. Worldwide applications. US9617498B2. 3. 1. 2014.
- [46] National Research Council of Canada, Progress Rail Locomotive Inc. Locomotive adhesion enhancing material mixtures. Inventors: Harinder Singh LAMBA, Robert Thomas SCOTT, Joseph KALOUSEK. Worldwide applications. US5919295A. 3. 2. 1997.
- [47] Air Lube. On-Board Application. [online]. Air Lube Rail. ©2019. [cit 2019.5.15]. Dostupné z: <http://airlube.com.au/lb-foster-applicators/top-of-wheel/>
- [48] HULL, Mike. Flange Lubrication - LCF. [online]. L. B. Foster Europe, ©1902 – 2019. [cit. 2019-5-15]. Dostupné z: <https://www.lbfoster.eu/en/rail-technologies/solutions/friction-management/flange-lubrication-lcf>
- [49] HULL, Mike. KELSAN wheel tread friction modifier – HPF. [online]. L. B. Foster Europe, ©1902 – 2019. [cit. 2019-5-15]. Dostupné z: <https://www.lbfoster.eu/en/rail-technologies/solutions/total-friction-management/kelsanr-wheel-tread-friction-modifier-hpf>
- [50] GRASSIE, S. L. Rail corrugation: characteristics, causes, and treatments. [online]. *Proc. IMechE Vol. 223 Part F: J. Rail and Rapid Transit*. DOI: 10.1243/09544097JRRT264

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

7.1 Seznam použitých zkratek

GF	- Gauge face
HPF	- High positive friction
LCF	- Low coefficient of friction
SLID	- Single-Line Injection Device
SŽDC	- Správa železniční dopravní cesty
TOR	- Top of rail
TOR-FM	- Top of rail Friction Modifier

7.2 Seznam použitých veličin

E	[MPa]	- Youngův modul pružnosti
F_f	[N]	- třecí síla
F_N	[N]	- normálová síla
F_T	[N]	- tečná síla
p	[MPa]	- maximální kontaktní tlak
P	[MPa]	- normálové zatížení
r	[m]	- poloměr kola
R	[mm]	- redukovaný poloměr
v	$[m \cdot s^{-1}]$	- rychlost kola
μ_f	[1]	- součinitel tření
μ_a	[1]	- součinitel adheze
ν	[1]	- Poissonova konstanta
ξ	[%]	- skluz
ω	$[rad \cdot s^{-1}]$	- úhlová rychlost kola

8 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1-1 Pískování povrchu kolejnic [2]	13
Obr. 3-1 Názvosloví kola a kolejnice [3].....	15
Obr. 3-2 Průjezd soukolí obloukem (upraveno) [4].....	16
Obr. 3-3 Rozložení napětí v kontaktu kola kolejnice (upraveno) [5].....	16
Obr. 3-4 Schéma plochy dotyku (přeloženo) [1].....	17
Obr. 3-5 a) čistý skluz a b) valení [6].....	18
Obr. 3-6 Adhezní charakteristika (přeloženo a upraveno) [6].....	19
Obr. 3-7 Ideální hodnoty součinitele tření [1]	20
Obr. 3-9 Součinitel adheze při kontaminaci vodou a olejem (přeloženo) [9]	22
Obr. 3-9 Poškození kol a kolejnici způsobené prokluzem [9].....	23
Obr. 3-10 Pektin (upraveno) [22].....	24
Obr. 3-11 Vliv kontaminace listím na adhezi (přeloženo a upraveno) [9]	25
Obr. 3-12 Zabezpečovací zařízení (přeloženo) [25].....	26
Obr. 3-13 Schéma pískovacího zařízení (přeloženo a upraveno) [27]	26
Obr. 3-14 Aplikace sanditu kolejovým vozidlem [30].....	27
Obr. 3-15 Aplikace písku do kontaktu (přeloženo) [9]	29
Obr. 3-16 Změny drsnosti při použití písku (přeloženo a upraveno) [35]	29
Obr. 3-17 Napětí v disku při pískování (přeloženo) [25].....	30
Obr. 3-18 Vhodnost metod aplikace modifikátorů tření (přeloženo) [39]	31
Obr. 3-19 Systém aplikace Low-Pressure [39].....	32
Obr. 3-20 Gauge face lubrication [40]	33
Obr. 3-21 Restraining rail systems [39].....	33
Obr. 3-22 Rail lubrication through lubrication holes [39]	34
Obr. 3-23 Struktura modifikátorů tření (přeloženo a upraveno) [41].....	34
Obr. 3-24 Chování modifikátorů tření (přeloženo) [49].....	36
Obr. 3-25 Defekt kolejnic - zvlnění [45]	37
Obr. 3-26 Povrch disků [41]	38

9 SEZNAM TABULEK

Tab. 3-1 Součinitel adheze při kontaminaci vodou a olejem (přeloženo a upraveno) [9]	22
Tab. 3-2 Podmínky experimentu s modifikátory tření (přeloženo) [41]	39