



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM PÍSKOVÁNÍ V KONTAKTU KOLA A KOLEJNICE

AN EXPERIMENTAL RESEARCH OF SANDING IN WHEEL/RAIL CONTACT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MARTIN MACHATKA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MILAN OMASTA, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Martin Machatka

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Konstrukční inženýrství (2301T037)**

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:

Experimentální výzkum pískování v kontaktu kola a kolejnice

v anglickém jazyce:

An Experimental Research of Sanding in Wheel/Rail Contact

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je objasnit chování pískovacího materiálu a kontaminantů v kontaktu železničního kola a kolejnice užitím vyvíjeného dvoudiskového experimentálního zařízení.

Cíle diplomové práce:

Diplomová práce musí obsahovat: (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci)

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Analýza problému a cíl práce
4. Materiál a metody
5. Výsledky
6. Diskuze
7. Závěr
8. Seznam použitých zdrojů

Forma práce: průvodní zpráva, laboratorní protokol

Typ práce: experimentální; Účel práce: výzkum a vývoj

Výstup práce: publikace (Jimp,Jneimp,Jrec,B,D); Projekt: TAČR - ALFA

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

Zásady pro vypracování práce:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2014.pdf

Šablona práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK_sablona_praci.zip

Seznam odborné literatury:

R. Lewis, U. Olofsson - Wheel/Rail Interface Handbook. 2009. ISBN-10: 1439801460.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Milan Omasta, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 22.11.2013

L.S.

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

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Předložená diplomová práce je zaměřena na experimentální výzkum parametrů pískování za účelem zlepšení adheze v kontaktu mezi kolem a kolejnicí. Pískování je aplikace pískovacího materiálu přímo do kontaktu kolo/kolejnice. Je to stále běžný, nejvíce účinný a tradiční způsob jak se vypořádat s problémem nízké adheze, která je způsobena především kontaminanty z okolního prostředí. Výzkum je důležitý pro lepší pochopení procesu pískování a zároveň poskytuje data, která jsou nezbytná pro jeho optimalizaci a zvýšení efektivity. Prezentovaný experimentální výzkum byl proveden na nově vyvinutém dvoudiskovém zařízení. Je zkoumán vliv běžných kontaminantů na adhezi s uvažováním různých provozních parametrů. Pro navýšení adheze v kontaminovaném kontaktu je použito odlišného množství aplikovaného písku při různém skluzu a valivé rychlosti. Výsledky ukazují, že existuje množství písku, od kterého nedochází k výraznému navýšení adheze. V této práci prezentované získané poznatky i výsledky budou použity pro optimalizaci pískovacího systému, který přispěje ke snížení nákladů spojených s pískováním a nízkou adhezí.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kontakt kola a kolejnice, dvoudiskové zařízení, adheze, adhezní charakteristika, pískování

ABSTRACT

Presented master's thesis is focused on the experimental research of the sanding parameters in order to improve adhesion in the contact between wheel and rail. Sanding is the application of the sanding material directly in the wheel/rail contact. It is still common, most effective and traditional way how to deal with low adhesion problem, which is mainly caused by environmental contaminants. Research is important for the better understanding of the sanding process and also provides data, which are necessary for its optimization and efficiency improvement. Newly developed twin-disc machine was used to carry out the presented experimental research. The influence of common contaminants on the adhesion is investigated, considering various operating parameters. Different amount of the applied sand is used to increase adhesion in the contaminated contact at various slip and rolling speed. Results show, that there is the amount of the sand, from which no significant adhesion increase occur. Obtained findings and the results presented in this thesis will be used to optimize sanding system, which will contribute to reduce cost associated with sanding and low adhesion.

KEYWORDS

Wheel/rail contact, twin-disc machine, adhesion, adhesion characteristic, sanding

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MACHATKA, M. *Experimentální výzkum pískování v kontaktu kola a kolejnice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 92 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Milan Omasta, Ph.D.



Technická agentura
České republiky

Tato práce vznikla v rámci řešení projektu č. TA02030850 s názvem *“Výzkum a vývoj progresivního pískovacího systému kolejových vozidel”* podpořeného ze státního rozpočtu prostřednictvím programu Alfa Technické agentury České republiky.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato diplomová práce je mým původním dílem, a že jsem ji zpracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Milana Omasty, Ph.D. s použitím zdrojů uvedených v seznamu bibliografie.

V Brně dne 23. května 2014

.....
Martin Machatka

This diploma thesis was elaborated with support and by using research equipment of NETME Centre, regional research and development centre built with the financial support from the Operational Programme Research and Development for Innovations within the project NETME Centre (New Technologies for Mechanical Engineering), Reg. No. CZ.1.05/2.1.00/01.0002 and, in the follow-up sustainability stage, supported through NETME CENTRE PLUS (LO1202) by financial means from the Ministry of Education, Youth and Sports under the „National Sustainability Programme I“.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat především Ing. Milanu Omastovi, Ph.D za velmi cenné odborné rady a připomínky. Poděkování patří také Ing. Davidu Smejkalovi za pomoc při realizaci experimentů. Velké poděkování však patří také rodině za značnou podporu a porozumění.

OBSAH

ÚVOD	13
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	15
1.1 Základní pojmy a mechanismus přenosu tečných sil	15
1.2 Adheze a adhezní charakteristika	16
1.2.1 Management tření	17
1.3 Experimentální zařízení pro studium kontaktu kola a kolejnice	18
1.4 Vliv vnějších vlivů na adhezi	20
1.4.1 Kontaminace vodou	21
1.4.2 Kontaminace olejem a emulzí z vody a oleje	22
1.4.3 Kontaminace listy	23
1.5 Pískování	25
1.5.1 Adheze	26
1.5.2 Opotřebenění	29
1.5.3 Elektrická izolace	30
1.6 Nejdůležitější poznatky o kontaminaci a pískování	31
2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	33
2.1 Shrnutí poznatků z kritické rešerše	33
2.2 Analýza problému	34
2.3 Cíl a podstata práce	36
2.4 Výstup práce	36
2.5 Odůvodnění nutnosti a potřebnosti řešení	36
2.6 Použité metody vědeckého zkoumání	37
2.7 Rozsah práce autora	37
3 MATERIÁL A METODY	38
3.1 Metodika řešení	38
3.1.1 Postup měření a vyhodnocení	38
3.2 Experimentální zařízení	40
3.2.1 Měřicí a řídicí řetězec	41
3.3 Experimentální materiál	42
3.3.1 Kontaktní tělesa	42
3.3.2 Kontaminační materiál	43
3.3.3 Pískovací materiál	47
3.4 Parametry experimentů	48
3.5 Průběh experimentů	48
4 VÝSLEDKY	51
4.1 Suché podmínky	51
4.2 Podmínky při kontaminaci kontaktu	53
4.2.1 Voda	53
4.2.2 Mokrý listí	55
4.2.3 Listový extrakt	57
4.3 Vliv teploty	58
4.4 Pískování	59
4.4.1 Mokrý podmínky + pískování	60
4.4.2 Mokrý listí + pískování	63
4.4.3 Listový extrakt + pískování	66
4.4.4 Plastické mazivo + pískování	68

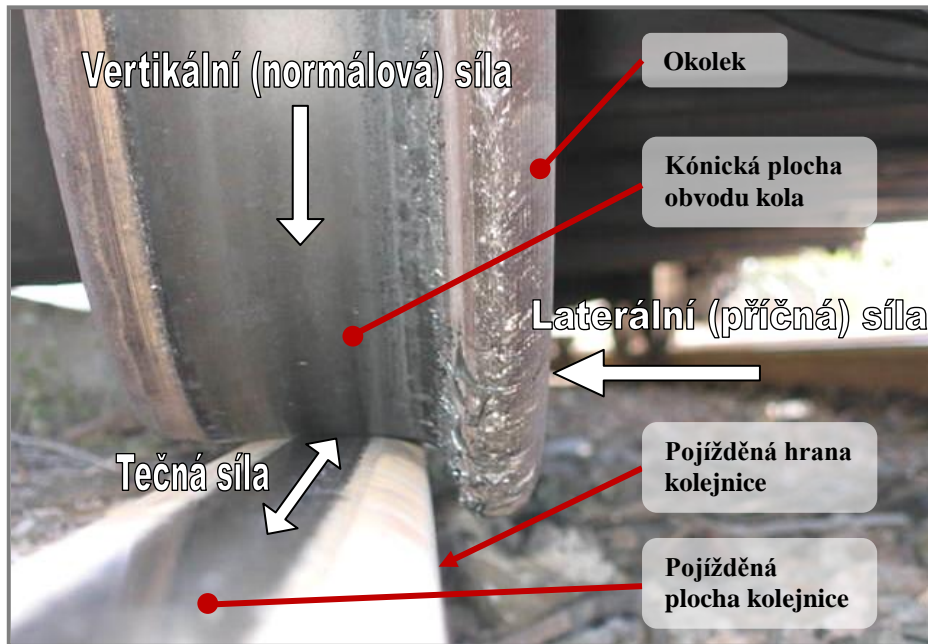
5 DISKUZE	71
5.1 Uvažovaná zjednodušení a jejich vliv na výsledky	71
5.2 Shrnutí nejdůležitějších poznatků	72
5.2.1 Kontaminace kontaktu	72
5.2.2 Pískování.....	73
5.3 Vědecká otázka a ověření hypotézy	74
5.4 Diskuze a srovnání s již publikovanými výsledky	75
5.4.1 Suchý kontakt a kontaminanty.....	75
5.4.2 Pískování.....	76
ZÁVĚR	80
BIBLIOGRAFIE	82
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	88
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	89
PŘÍLOHY	92

ÚVOD

Železniční doprava patří stále k velmi perspektivním způsobům přepravy osob a nákladu na krátké i dlouhé vzdálenosti. Mezi její plusy patří zejména velká přepravní kapacita, rychlost, bezpečnost a spolehlivost. Největší výhodou je však malá energetická náročnost a nezávislost na uhlovodíkových palivech. Jejím využití pro přepravu osob nahrává zvláště velká přepravní kapacita cestujících spojená s možným, nadstandardním komfortem při zachování relativní cenové dostupnosti. Díky malému dopadu na životní prostředí se úspěšně používá i jako prostředek hromadné dopravy ve městech (speciální železniční dráha), kdy je možné ještě více umocnit všechny její výhody použitím podzemní dráhy. Zvýšený zájem o železniční dopravu budí nyní zejména nástup vysokorychlostních tratí. Budoucnost spočívá ve výstavbě těchto tratí, spolu s modernizací tratí stávajících. Právě rychlost dopravy je totiž jednou z hlavních podmínek konkurenceschopnosti s ostatními způsoby přepravy.

Mezi hlavní a rozhodující parametry, ať už v železniční či jiné dopravě patří efektivnost, spolehlivost a velikost provozních nákladů. Na tyto parametry má v pozemní dopravě vliv zejména kontakt kola s pojížděným povrchem a jeho valivý odpor. Železniční doprava je charakteristická právě velmi malým valivým odporem mezi kolem a kolejnici, což je jedním klíčů jejího úspěchu. Problém chování samotného kontaktu kolo/kolejnice je pak velice komplexní a je stálým předmětem výzkumu. Snaha je vytvořit výpočtové modely co nejděleji simulující tento kontakt a díky nim predikovat jeho chování při různých provozních podmínkách. Jako podklady pro vytvoření těchto modelů slouží data z experimentálního výzkumu.

Samotný pohyb vlaku po kolejích umožňuje adheze, což je schopnost kontaktu kolo/kolejnice přenášet tečné síly, a to jak během trakce (rozjezdu), tak i při brzdění. Nízká adheze (nejčastěji způsobená kontaminanty) mezi obvodem kola a pojížděnou plochou kolejnice způsobuje nadměrné prokluzování kol, což sebou nese snížení efektivnosti přepravy. Mezi konkrétní důsledky nízké adheze patří především zvýšené opotřebení, zpoždění spojů a nárůst brzdné dráhy, což je již problém z hlediska bezpečnosti. Nadměrnému prokluzu se běžně předchází snímáním prokluzu kol a případnou aplikací písku do kontaktu kolo/kolejnice (pískování), za účelem zvýšení adheze v kontaktu. S pískováním je však spojena celá řada negativ, z nichž lze zmínit především zvýšené opotřebení. Nejdůležitější je proto pískovat pokud je to skutečně zapotřebí s tím, že je do kontaktu třeba dodat správné množství písku. Pro minimalizaci negativních vlivů pískování a zajištění co největší efektivnosti je pak zapotřebí proces pískování optimalizovat, tedy určit, při jakých podmínkách jak moc pískovat.



Obr. 0-1 Kontakt kolo/kolejnice a základní pojmy – upraveno [1]

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

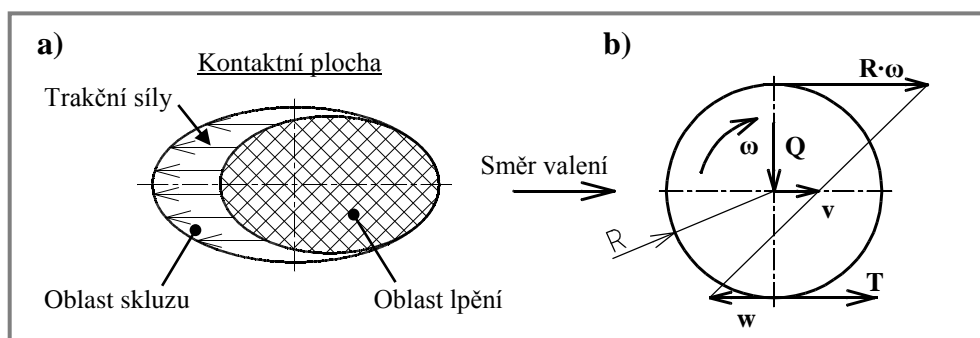
1

1.1 Základní pojmy a mechanismus přenosu tečných sil

1.1

Jak již bylo řečeno v úvodu, adheze je schopnost kontaktu, který je mezi obvody kola a pojezdovou plochou kolejnice přenášet tečné síly. Tyto síly jsou pak využívány k rozjezdu (trakci) nebo brzdění. Pro pohyb kolejového vozidla po trati je tedy adheze klíčová. K samotnému přenosu sil dochází díky deformaci těles v kontaktu, vlivem normálového zatížení kola, které je dáno zatížením na nápravu. Velikost kontaktní oblasti (typicky 1–2 cm²), rozložení kontaktního tlaku a smykového napětí se nejčastěji počítá podle Hertzovi teorie. Pro přesnější výpočet kontaktu se používají i numerické simulace. K používaným numerickým řešičům patří: metoda konečných prvků (FEM), CONTACT a FASTSIM [2].

Kontaktní oblast kontaktu kolo/kolejnici má eliptický tvar s hlavní poloosou orientovanou ve směru valení, přičemž vlivem opotřebení se tvar kontaktní oblasti přibližuje kružnici [2]. Při odvalování kola po kolejnici je kontakt rozdělen na oblast lpění a oblast skluzu (obr. 1-1). Během odvalování dochází jak k valení (oblast lpění) tak i ke skluzu, který přenáší tečné síly. Při téměř čistém valení (čistého valení není možné dosáhnout) tedy není kontakt schopen přenášet prakticky žádné síly.



Obr. 1-1 a) kontaktní plocha, b) rychlosti a síly působící při odvalování kola po kolejnici

Pro vyjádření velikosti adheze v kontaktu se používá **součinitel adheze μ** , který je dán podílem normálové a tečné síly přenášené kontaktem dle vzorce (1). **Skluzová rychlost w** se vypočte jako rozdíl mezi obvodovou a dopřednou rychlostí kola dle vzorce (2) a udává tedy, jakou rychlostí se vůči sobě povrch kola a kolejnice pohybuje. Další důležitou veličinou je **relativní skluz s** , který je dán podílem skluzové a dopředné rychlosti (3), přičemž je často vyjádřen v procentech. Je však třeba dodat, že tyto vzorce počítají s působením uvedených veličin pouze v podélném směru (směr valení) a platí tedy jen při pohybu vlaku po rovném úseku trati. Při průjezdu traťovým obloukem je pak třeba počítat i se složkami v příčném směru, které rostou se zmenšujícím se poloměrem traťového oblouku, což je podrobněji uvedeno například literatuře [3].

$$\mu = \frac{T}{Q} \quad [1] \quad (1)$$

kde:

T [N] je tečná síla přenášená kontaktem
 Q [N] - normálová síla (zatížení kola)

$$w = R \cdot \omega - v \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (2)$$

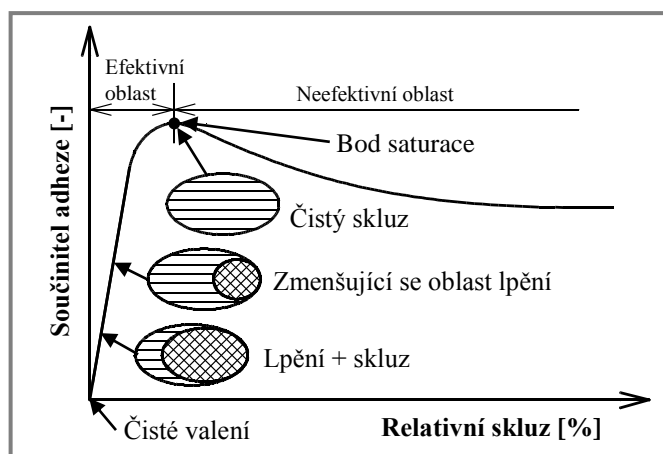
kde:

R [m] je poloměr kola
 ω [rad·s⁻¹] - úhlová rychlost kola
 v [m·s⁻¹] - dopředná rychlost (rychlost pohybu kola po kolejnici)

$$s = \frac{w}{v} \quad [1] \quad (3)$$

1.2 Adheze a adhezní charakteristika

Adheze v kontaktu kolo/kolejnice se zjišťuje experimentálním měřením. Zpravidla je zaznamenáván průběh adheze v čase, na němž je dobře patrná reakce na změnu podmínek. Pro následné vyhodnocení se zpravidla používá **adhezní charakteristika** neboli trakční křivka, která je běžně sestrojována z jednotlivých bodů (měření). Jedná se o závislost součinitele adheze nebo trakční síly na skluzové rychlosti či relativním skluzu (obr. 1-2). S rostoucí hodnotou skluzu na vodorovné ose se zvětšuje oblast skluzu v kontaktní oblasti, což je doprovázeno růstem adheze až do bodu saturace, kdy adheze dosáhne své maximální hodnoty. Od bodu saturace je v kontaktu pouze čistý skluz, přičemž další nárůst skluzu přináší zpravidla pokles adheze.

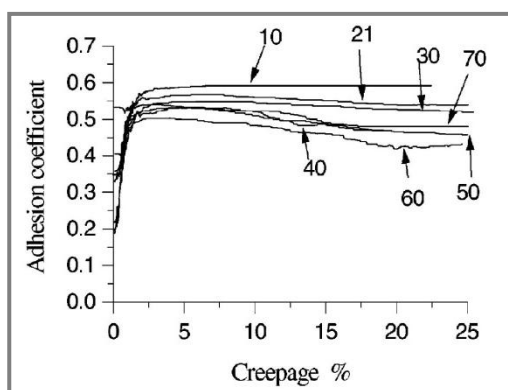


Obr. 1-2 Adhezní charakteristika (trakční křivka)

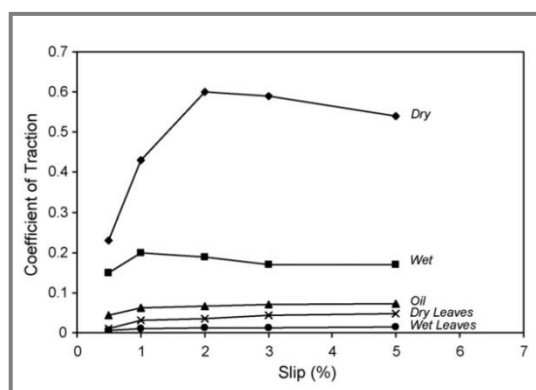
Nadměrné prokluzování kol je doprovázeno zvýšeným opotřebením a může vést až ke značnému nárůstu teploty v kontaktu vedoucí ke změně vlastností materiálu. Je tedy snaha se pohybovat těsně před bodem saturace v efektivní oblasti, kde je adheze největší a nedochází k příliš velkému skluzu. Optimálně by se měla hodnota adheze pohybovat kolem 0,4 a za špatných podmínek by její hodnota neměla být menší než 0,2 [2].

Velikost adheze i tvar adhezní charakteristiky značně ovlivňuje celá řada vlivů, které můžeme rozdělit na vlivy vnitřní a vnější. Vnitřní vlivy jsou spojeny s kolejovým vozidlem a jeho pohybem po trati. Řadíme mezi ně především rychlost (obr. 1-3), velikost skluzu v kontaktu a zatížení na nápravu (dále např. dynamické účinky). Vnější vlivy představují působení okolního prostředí, na které je kontakt kola a kolejnice velmi náchylný, protože se jedná o otevřený systém. Pod pojmem vnější vlivy se skrývají hlavně kontaminanty a teplota.

Adhezi snižuje nejvíce přítomnost kontaminantů (obr. 1-4), které mají velmi výrazný vliv i na opotřebením. Běžnými kontaminanty jsou voda, olej a listí. Nejčastěji je za pokles adheze v kontaktu zodpovědná voda, která se na kolejích vyskytuje nejčastěji [2]. Kritická je především její přítomnost v menším množství, a to například ve formě mrholení, rosy, námrazy, anebo jen vzdušné vlhkosti [4]. Za poznámku stojí především fakt, že je voda daleko rozšířenější problém. Kontaminace listím je spojena především pouze s jedním ročním obdobím a vyskytuje se jen na určitém úseku tratě. Olej je potom ještě daleko lokálnější záležitostí, přičemž kontaminovaná bývá většinou pouze jedna kolej.



Obr. 1-3 Vliv rychlosti na adhezi za suchých podmínek [5]



Obr. 1-4 Adhezní charakteristiky kontaminovaného kontaktu [6]

1.2.1 Management tření

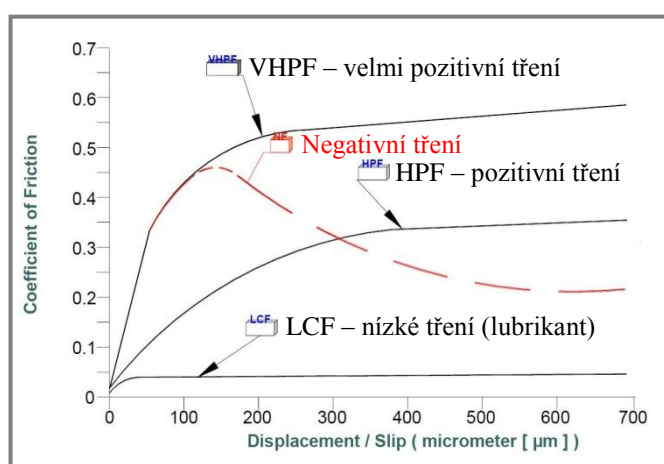
V poslední době se dostává do popředí tzv. friction management (management tření), jehož cílem je zajištění pozitivního součinitele tření a jeho optimalizace. Friction management spočívá v aplikaci vhodného modifikátoru tření (FM) do kontaktu kolo/kolejnice. Běžně se v provozu objevuje především negativní tření. To znamená, že po dosažení vrcholu trakční křivky s rostoucím skluzem klesá velikost součinitele adheze. U pozitivního tření naopak velikost adheze se skluzem neustále roste (obr. 1-5). Modifikátory tření se rozdělují podle toho, jak velké poskytují tření (adhezi).

Modifikátor užívaný pro dosažení velmi pozitivního tření VHPF (very high positive friction) spolu s modifikátorem pro pozitivního tření HPF (high positive

friction) se používá pro upravení tření v kontaktu mezi obvodem kola a pojížděnou plochou kolejnice (kontakt kolo/kolejnice). Modifikátor HPF je určen pro optimalizaci tření a s tím spojenou úsporu nákladů. VHPF modifikátor je využíván především pro zajištění maximálního možného tření při traktaci či brzdění, přičemž hlavním představitelem je pískovací materiál.

Modifikátory pro zajištění nízkého tření (LCF – low coefficient of friction) se aplikují do kontaktu mezi okolkem a pojížděnou hranou kolejnice (kontakt okolek/kolejnice). Jedná se o lubrikanty, které mají zajistit nízké tření menší jak 0,1.

Snížením vysoké hodnoty tření v kontaktu kolo/kolejnice na optimální úroveň pomocí HPF modifikátoru, spolu s mazáním okolku (LCF) dochází ke značnému snížení hluku při průjezdu železničním obloukem [7]. Dalším přínosem jsou nižší provozní náklady, menší příčné síly spolu s nižším opotřebením kola a kolejnice [7].



Obr. 1-5 Závislost součinitele tření na skluzu při použití různých modifikátorů tření – upraveno [7]

1.3 Experimentální zařízení pro studium kontaktu kola a kolejnice

Studium kontaktu kolo/kolejnice probíhá buď přímo v terénu na reálných zkušebních tratích, nebo v laboratorních podmínkách. Oba způsoby výzkumu mají své výhody a nevýhody. Testování v reálných podmínkách je velmi nákladné i náročné a je ovlivněno mnoha vnějšími vlivy. Laboratorní podmínky naproti tomu nabízejí kontrolu nad parametry spolu s podmínkami i požadovanými výstupy a jsou vhodné zejména pro rozsáhlejší výzkum. Cílem experimentů je nejčastěji zkoumat vliv provozních parametrů a kontaminantů na adhezi a opotřebení.

K simulaci kontaktu kolo/kolejnice se využívá experimentálních zařízení, která se podle velikosti kol rozdělují na nezmenšená **full-scale** a zmenšená v měřítku **scaled**. Dále se tato zařízení liší ještě v úrovni modelového zkruslení, která je dána např. použitými provozními parametry, profilem kola a kolejnice, možností simulace průjezdu traťovým obloukem, využitím podvozku atd.

Pro testování v reálných podmínkách se využívá pro tento účel speciálně upravených kolejových vozidel nebo podvozků. Další možností je použití ručního tribometru výrobce Salient Systems (obr. 1-6) [8].

Laboratorní zařízení, ať už jsou v jakémkoliv měřítku, nejčastěji využívají principu nekonečné kolejnice, kterou tvoří rotující disk. Přehled některých těchto

zařízení je možné najít v literatuře [9]. Dalším hlavním typem laboratorního zařízení je zařízení wheel-on-rail, které využívá konečné kolejnice vykonávající lineární pohyb (obr. 1-7). Toto zařízení používá skutečné kolo a část(i) kolejnice. Mezi používaná zařízení s velkým modelovým zkrácením, ale velmi dobrou kontrolou nad provozními parametry patří zařízení MTM (kontakt mezi koulí a diskem) a pin-on-disc (kontakt mezi pinem a diskem).



Obr. 1-6 Ruční tribometr firmy Salient Systems [8]



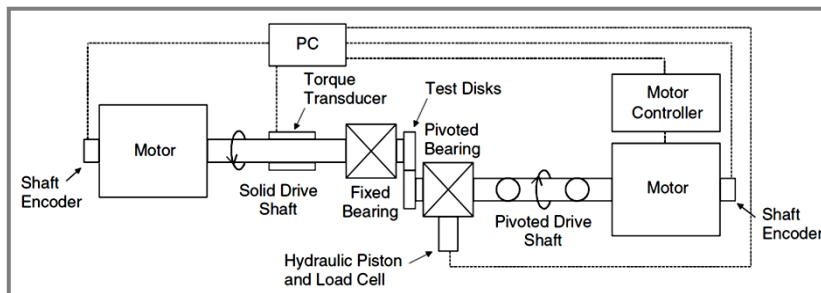
Obr. 1-7 Příklad zařízení wheel-on-rail [10]

Nejpoužívanějším experimentálním zařízením je dvoudiskové testovací zařízení nazývané **twin-disc** (obr. 1-8). Využívá zjednodušení kontaktu i provozních podmínek a poskytuje jen mírně zkrácené výsledky oproti zařízením měřícím v reálných podmínkách [6]. Kontakt je u tohoto zařízení tvořen dvěma disky, které se otáčejí proti sobě. Požadovaného skluzu v kontaktu je dosaženo rozdílnými otáčkami disků. Normálové zatížení je aplikováno přitlačováním disku reprezentujícího kolo (wheel disc) k disku kolejnice (rail disc). Oba disky jsou zpravidla umístěny v komoře simulující podmínky okolního (kontaminačního) prostředí (obr. 1-9). Značná část publikovaného výzkumu byla realizována na twin-disc zařízení SUROS [11].

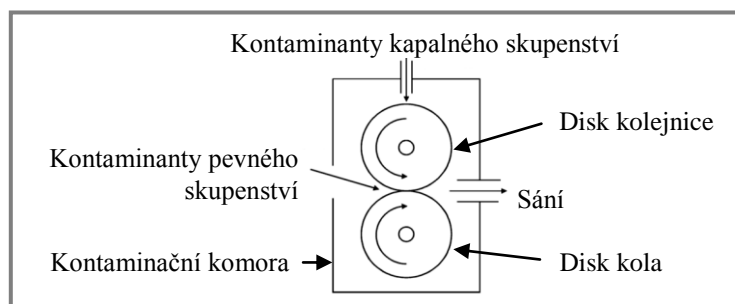
V experimentálních výzkumech, které využívají twin-disc zařízení se kontaktní tlak pohybuje kolem (0,7 až 1,5) GPa a rychlost reprezentující rozjezd je přibližně (1–5) m/s při skluzu zpravidla (1–10) %. Je třeba ještě zmínit, že nevýhodou twin-disc zařízení ve zmenšeném měřítku je mimo jiné právě i značné omezení rychlosti. Sub-scale a především full-scale zařízení totiž umožňují měřit při daleko vyšších rychlostech¹, které mohou dosahovat až 400 km/h [9].

Kontaminanty kapalného skupenství jsou u twin-disc zařízení zpravidla aplikovány na vrchní disk, přičemž kontaminanty pevného skupenství jsou přiváděny přímo do kontaktu pomocí skluzu [6]. Pískovací materiál bývá do kontaktu přiveden pomocí gravitace, nebo případně za pomoci stlačeného vzduchu. K samotné aplikaci pískovacího materiálu se používá hadice. Pro lepší vniknutí pískovacího materiálu a pevných kontaminantů do kontaktu se využívá sání (viz obr. 1-9).

¹ Výjimkou je zařízení wheel-on-rail u kterého je dopředná rychlost často dokonce menší než u twin-disc zařízení. Nízká rychlost tohoto zařízení je dána principem funkce.



Obr. 1-8 Příklad dvoudiskového zařízení twin-disc SUROS [6]



Obr. 1-9 Kontaminační komora – upraveno [6]

1.4 Vliv vnějších vlivů na adhezi

Jak již bylo řečeno dříve, tak adhezi nejvíce negativně ovlivňuje především přítomnost kontaminantů z okolního prostředí. Jejich vlivem adheze klesá na kritické hodnoty, které způsobují problémy s trakcí či brzděním. Nejhorší je, že se prodlužuje brzdná dráha, což je již problém z hlediska bezpečnosti [2]. Adhezi můžeme rozdělit podle její velikosti dle tab. 1-1, která obsahuje data získaná na základě zkušeností z praxe [12, 13]. Z těchto údajů je možné vyčíst, že problém nastává, pokud adheze dosahuje hodnot 0,1 a menších. Požadovaná adheze pro trakci a brzdění se u jednotlivých kolejových vozidel mění, a proto je uvedeno větší rozmezí hodnot. Těžké tažné lokomotivy pro nákladní dopravu potom mohou při trakci využít i adhezi až nad 0,4 [3].

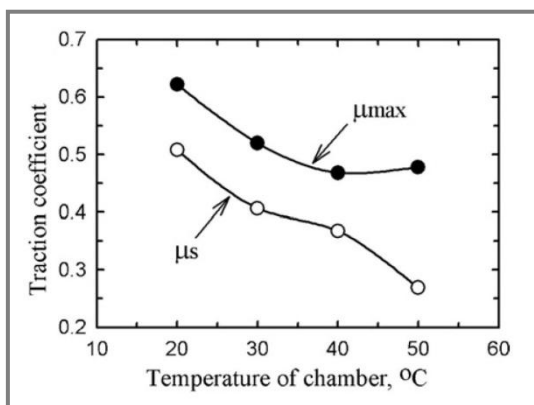
Tab. 1-1 Rozdělení adheze [12, 13]

Dostatečná adheze	$\mu > 0,1$
Nízká adheze	$0,1 > \mu > 0,05$
Velmi nízká adheze	$\mu < 0,05$
Adheze pro brzdění	$\mu \geq 0,14$
Dostatečná hodnota pro trakci	$0,3 > \mu > 0,1$

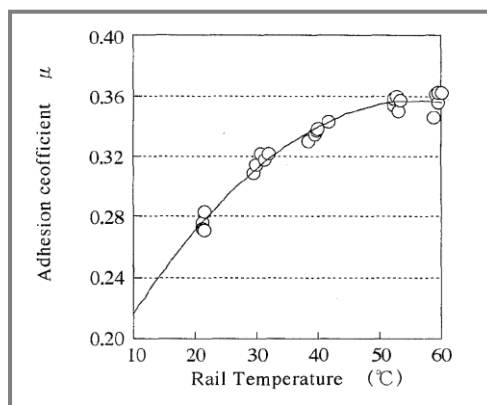
Nízkou adhezí způsobenou vnějšími kontaminanty se zabývají odborné studie [10, 14] i mnoho vědeckých prací, jejichž průkopníkem byl Beagley [15–17]. Nejběžnější se vyskytující kontaminanty jsou rozebrány v dalších kapitolách. Je třeba říci, že na kontakt kolo/kolejnice může působit více kontaminantů najednou.

V kontaktu se potom může samozřejmě vyskytovat také celá řada dalších kontaminantů. Patří mezi ně například prach, šterk z kolejového svršku, částice písku z pískování, bláto na kolejových přejezdech atd. Dále se na kolejích může vytvořit kluzký povlak složený zejména z oleje, vody, zbytků listů a opotřebovaných částic ve formě oxidů nebo i pasta z vody a pevných částic (hlína, uhlí, rez, částice z opotřebení) [4, 14].

Dalším vnějším vlivem, který na kontakt kolo/kolejnice kromě kontaminantů působí je i teplota. Teplota v kontaktu roste především se zvětšujícím se skluzem [18]. Teplota kolejnice, však poměrně značně narůstá i při samotného přejezdu, zvláště delšího, kolejového vozidla [19]. Pokud je v laboratorních podmínkách udržována stálá relativní vlhkost vzduchu, tak nárůst teploty adhezi v kontaktu snižuje (obr. 1-10) [20]. V reálných podmínkách však dochází s nárůstem teploty k nárůstu adheze, který je ovlivněn aktuální vlhkostí vzduchu (obr. 1-11) [21].



Obr. 1-10 Vliv teploty na adhezi (μ_s – ustálená hodnota součinitele adheze) [20]



Obr. 1-11 Vliv teploty na adhezi při vlhkosti 55 % [21]

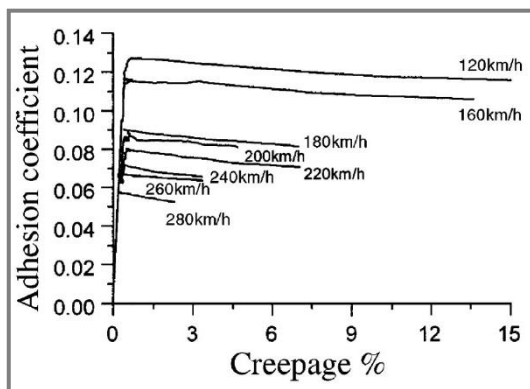
1.4.1 Kontaminace vodou

Negativní vliv vody jako kontaminantu byl zkoumán na experimentálním zařízení twin-disc, [6, 17, 22–27], sub-scale (JD-1) [28–30] a full-scale [5]. Dále proběhlo testování v reálných podmínkách [31], ale i na zařízení s velkým modelovým zkreslením MTM [32]. Pokud se v kontaktu kolo/kolejnice objeví voda, dochází k okamžitému poklesu adheze [29]. Velikost adheze v kontaktu se pohybuje od 0,1 do 0,25. Voda je velmi často zdrojem problémů spojených s adhezí, protože při určitém menším množství vytváří spolu s pevnými částicemi viskózní pastu způsobující velmi nízkou adhezi [17]. Při větším množství potom naopak působí čistícím účinkem a snižuje množství jiných kontaminantů [14, 17].

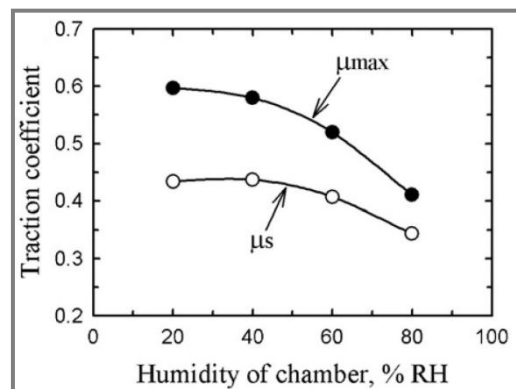
Oproti podmínkám za sucha je nárůst a ustálení součinitele adheze za mokra pomalejší [22]. Bylo zjištěno, že se zvětšující se rychlostí klesá za mokra adheze daleko výrazněji než za sucha [5, 17, 23, 29, 30]. Zvláště při vyšších rychlostech adheze strmě klesá a pohybuje i pod hodnotou 0,1 (obr. 1-12) [5, 24, 27]. S rostoucím zatížením dochází jen k mírnému poklesu adheze [22, 25, 29]. Také zvětšující se množství vody snižuje velikost součinitele adheze [30]. Naopak velmi malé množství vody ve formě vlhkého povrchu, také působí velmi

nepříznivě a způsobuje větší pokles adheze než velké množství vody [17]. Chen ve své práci zjistil, že adhezi výrazně pozitivně ovlivňuje vyšší teplota i drsnost povrchu (vliv má i směr nerovností) [23, 24] a vytvořil i numerický model [33, 34]. Ke stejnému závěru došel i Zhu [32], který publikoval, že při malé drsnosti povrchů, nižší teplotě a vyšší rychlosti může součinitel adheze dosahovat extrémně nízkých hodnot srovnatelných s hodnotami při kontaminaci olejem.

K výraznému poklesu adheze může dojít i díky vyšší vzdušné vlhkosti. Její vliv byl také zkoumán v několika publikacích, a to na zařízení twin-disc [16, 20] a pin-on-disc [35]. Byly provedeny i experimenty v reálných podmínkách [21]. Výsledky shodně ukázaly, že velikost adheze může zejména vlivem vysoké vlhkosti značně klesnout (obr. 1-13) [16, 20, 21, 35].



Obr. 1-12 Vliv rychlosti na adhezi při kontaminaci vodou [5]

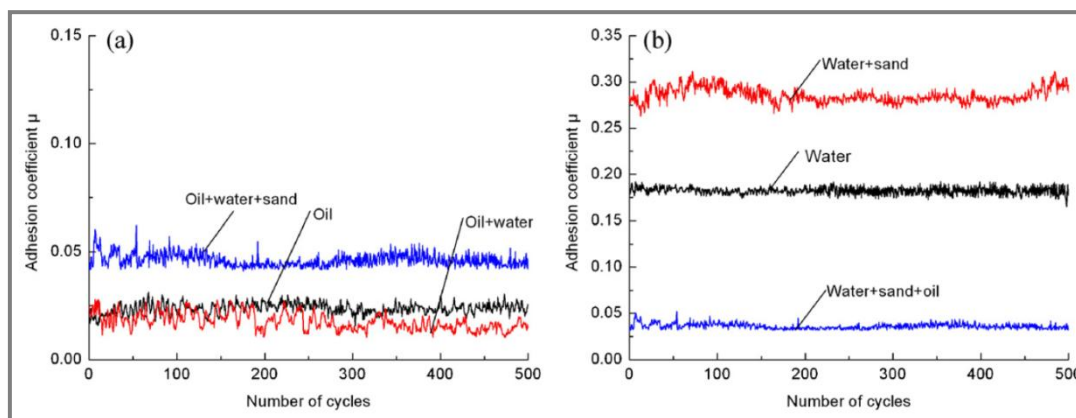


Obr. 1-13 Vlhkost ovlivňující adhezi [20]

1.4.2 Kontaminace olejem a emulzí z vody a oleje

Dalším běžným kontaminantem je olej. Jeho vliv na adhezi byl zkoumán na zařízeních twin-disc [6, 25, 26], sub-scale (JD-1) [28, 30], full-scale [5] a MTM [32]. Adheze se snížila i při velmi malém množství oleje (rozjezdí po velké délce kolejnice), přičemž velikost poklesu není příliš závislá na množství oleje [25]. Hodnota součinitele adheze se běžně pohybuje i kolem velmi nízkých hodnot 0,04 až 0,06.

Adheze stejně jako při kontaminaci kontaktu vodou klesá s rostoucí rychlostí [28, 32]. Dále pak s rostoucím zatížením roste i součinitel adheze [25, 32], a to i u emulze z vody a oleje [28]. U testů s full-scale zařízením, kdy jsou rychlosti vyšší, došlo naopak k mírnému poklesu adheze při snižování rychlosti, přičemž zároveň s rostoucím zatížením adheze klesala také [5]. Nejnižší adheze nastane, pokud je kontaminantem emulze z vody a oleje (obr. 1-14) [25, 28, 30]. Vliv má i složení emulze s tím, že nejhorší je vyšší poměr vody jak oleje. Olej je skvělý lubrikant, a to za jakéhokoliv dodávaného množství vody. Touto problematikou se zabýval především Lewis [25], přičemž zjistil, že při nižších rychlostech poskytuje emulze i olej podobné hodnoty součinitele adheze, a to i za různého skluzu. Vyslovil také předpoklad, že při vyšších rychlostech by měl klesat vliv oleje a adheze by měla být podobná jako v případě kontaminace pouze vodou. Velká drsnost [25] a rostoucí teplota má opět pozitivní vliv na adhezi, ale není tak výrazný jak u kontaminace vodou [32].

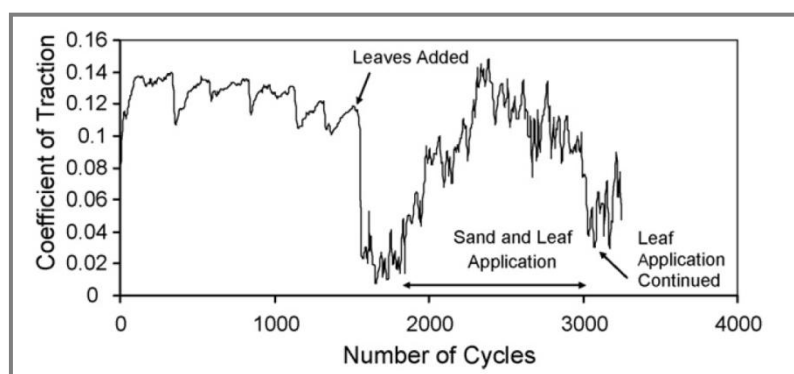


Obr. 1-14 Velikost adheze při kontaminaci vodou, olejem, emulzí (50% vody a 50% oleje) [28]

1.4.3 Kontaminace listy

1.4.3

Experimentální výzkum kontaminace listím byl prováděn na zařízení twin-disc [6, 33, 36], sub-scale [30], wheel-on-rail [10], pin-on-disc [35], MTM [37], ale i v reálných podmínkách [31, 38]. Kontaminace kontaktu listy patří mezi nejhorší a zároveň poměrně časté způsoby znečištění vyskytující se zejména v Anglii. Listy se na koleje nejčastěji dostanou proudem vzduchu při přejezdu vlaku přes trať s napadaným listím [39]. Pokud se listy objeví v kontaktu kola a kolejnice, dojde k okamžitému a radikálnímu poklesu adheze (obr. 1-15), a to jak za mokrých, tak i za suchých podmínek [6, 30]. Velikost součinitele adheze je dokonce nižší, než u kontaktu kontaminovaného olejem [6, 10, 30]. Nejhorší adheze nastane i u jen trochu mokrého kontaktu [4, 6, 14], přičemž nezanedbatelný vliv má i vysoká vzdušná vlhkost [35]. Mokré listí je tedy kontaminant způsobující nejnižší adhezi [6].

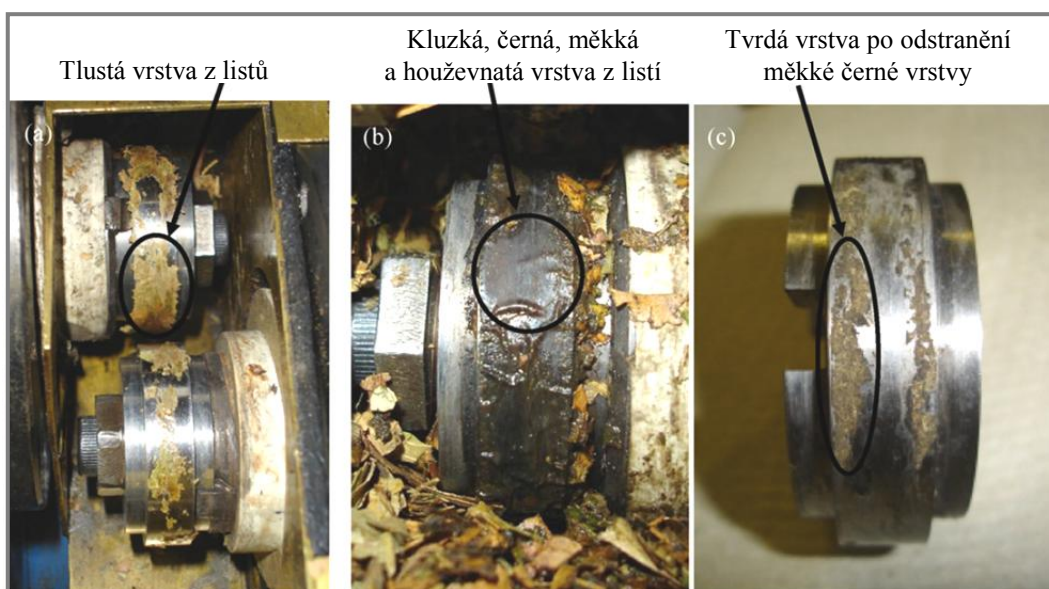


Obr. 1-15 Změna adheze při přidání listů a následné aplikaci pískování [6]

Příčinou nízké adheze je vrstva z uježděných listů tvořící se na kolejích vlivem vysokého kontaktního tlaku v kontaktu kolo/kolejnice (obr. 1-16). Vytváří se především za mokra a k jejímu vzniku přispívá, pokud jsou listy čerstvě napadané. Tato černá vrstva je extrémně odolná, houževnatá a hlavně velmi kluzká. Způsobuje adhezi nižší jak 0,1, což při chůzi po koleji odpovídá chůzi po ledu [40]. Pro její odstranění je potřeba velké množství cyklů (nejlepší je velký skluzu) [6].

Na začátku, může mít v reálných podmínkách tloušťku až 110 μm (někdy i větší), ale postupně se rozjezdí po větší délce a získá maximální tloušťku nepřesahující 35 μm [14]. Tato tloušťka je daleko větší než velikost povrchových nerovností, což nepříznivě ovlivňuje adhezi a způsobuje elektrickou izolaci vlaku (nejhorší za sucha) [10, 14, 41]. Vrstva vzniká chemickou reakcí mezi vodou rozpustnými látkami z listů a kovovým povrchem [37, 40]. Bylo dokonce zjištěno, že i extrakt z listů (voda ve které bylo listů několik dní namočeno) způsobuje podobný pokles adheze jako samotné listy [37]. Tvrdost vrstvy závisí na zatížení, skluzu a obsahu vody ve vrstvě [36]. Její pevnost je nepřímo úměrná vlhkosti (kterou absorbuje), přičemž největší je za sucha (až o 50 % vyšší než za mokra) [10].

Pro odstranění vrstvy z listů se vynakládá značné úsilí. Používá se především speciálně upraveného kolejového vozidla, které koleje čistí tlakovou vodou, avšak i tak dochází pouze k částečnému obnovení adheze [2, 40]. Dále se využívá i různých protiopatření, mezi které patří například odstranění vegetace v blízkém okolí tratě, nebo ochranné ploty podél tratě bránící roznesení listů větrem [42].

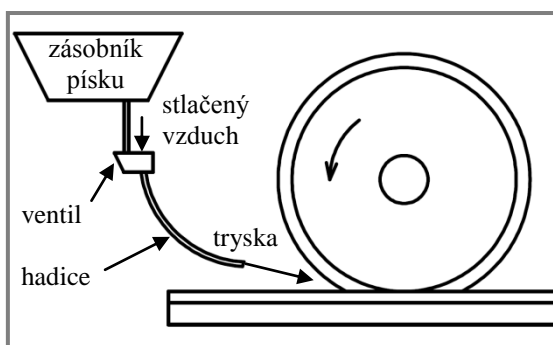


Obr. 1-16 Vrstvy z listů vytvořené na discích twin-disc zařízení (a) suché podmínky (b, c) mokré podmínky – upraveno [6]

1.5 Pískování

Pískování je proces aplikace písku do kontaktu kolo/kolejnice. Je to nejpoužívanější způsob pro obnovení adheze a snížení nadměrné velikosti skluzu v kontaktu [2, 4]. Pískování je v praxi běžně využíváno, a to již od počátku železniční dopravy. Jeho úspěch tkví asi zejména v jeho vysokém abrazivním účinku, díky kterému odstraňuje jak samotný kontaminant, tak i kontaminační povrchovou vrstvu vznikající chemickou reakcí [40].

Pro samotnou aplikaci písku, do kontaktu mezi obvodem kola a pojezdovou plochou kolejnice, se využívá pískovací zařízení neboli pískovač (obr. 1-17). Kolejová vozidla disponují více pískovači, které pískují pod kola hnacích náprav. Pískovače běžně fungují tak, že ze zásobníku písku je písek samospádem přiváděn do ventilu, kde je strháván proudem stlačeného vzduchu, který usnadňuje jeho aplikaci pomocí hadice s tryskou. Tvar trysky i její poloha vůči kontaktu značně ovlivňuje množství písku vstupujícího do kontaktu, což má vliv, mimo jiné i na efektivnost pískování. Testy bylo zjištěno optimální nastavení, při němž by měla tryska svírat s kolejnicí malý úhel (10–15°) a zároveň by měla směřovat přímo do kontaktu (se zarovnáním na střed kola), přičemž nejlepší je co nejmenší vzdálenost od kontaktu [43]. Pro spolehlivou funkci pískovače a správné dávkování písku, je třeba zajistit, aby byl písek dostatečně suchý (hrozí především ucpání ventilu). Zároveň je nutné zabránit i zamrznutí trysky. Většina pískovacích zařízení má z tohoto důvodu v zásobníku písku vysoušeč, který písek pravidelně profukuje teplým vzduchem. Konec trysky pak bývá také vyhříván, což brání jejímu zamrznutí a ucpání. Jedním z předních výrobců pískovacích zařízení je i firma Tribotec, která dodává pískovač KOVA-03D (obr. 1-18) splňující mimo jiné i výše uvedené požadavky na současné pískovače [44].



Obr. 1-17 Schéma aplikace písku pískovacím zařízením



Obr. 1-18 Pískovací zařízení firmy Tribotec KOVA-03D [45]

K pískování se používá křemičitý (slévárenský) písek, jehož parametry jsou u nás, v případě železniční dopravy, dány provozovatelem dráhy, kterým je SŽDC [46]:

- Střední velikost zrna 0,82 mm
- Rozsah zrnitosti (0,3 až 1,6) mm
- Obsah SiO₂ větší než 95 %
- Vlhkost do 8%

Důležitým faktem je, že se rozsah velikosti zrn používaného písku v jednotlivých zemích značně liší. Z hodnot, které uvádí Arias-Cuevas [47] vyplývá, že se velikost zrn pohybuje v rozmezí (0,1 až 2,8) mm.

Při pískování je z hlediska bezpečnosti nutné dodržovat maximální povolené množství písku, protože jeho nadměrné množství může způsobit elektrickou izolaci (kol od kolejnice), která znemožňuje detekci vlaku bezpečnostním systémem [2, 4]. Množství písku je v železniční dopravě omezeno evropskou normou danou rozhodnutím komise o technické specifikaci pro interoperabilitu (TSI), která udává maximální povolené množství písku na písečník za 30 sekund [48]:

- Pro rychlost $v < 140$ km/h: 400 g + 100 g
- Pro rychlost $v \geq 140$ km/h: 650 g + 150 g

Odlišná situace je ve Velké Británii, kde je omezení množství písku stanoveno normou vydanou výborem pro železniční bezpečnost a normy (RSSB), která doporučuje maximální množství 2 kg/min na kolej, které má zajistit maximální dovolené množství písku 7,5 g/m [49]. Z těchto údajů vychází pravděpodobně i Lewis, který uvádí, že v praxi používané množství je právě 7,5 g/m [50]. Množství 7,5 g/m je pak uvažováno v celé řadě prací zabývajících se experimentálním výzkumem pískování. Je třeba říci, že v praxi je dodávané množství písku značně rozdílné. Na základě testů provedených na pískovačích z reálného provozu bylo totiž zjištěno, že průměrné množství písku dodávané pískovači je 1,148 kg/min, přičemž maximální množství bylo i přes 2 kg/min [51].

Experimentální výzkum pískování probíhá prakticky především na zařízení twin-disc [6, 26, 47, 50, 52–55]. Byly ale také provedeny i statické zkoušky [41]. Experimenty byly provedeny i na sub-scale zařízení JD-1 [28]. Rozhodně je třeba zmínit měření v reálných podmínkách na zkušební trati se skutečnou lokomotivou [38]. Výzkum pískování je možné rozdělit podle oblasti zájmu na studium pískování v souvislosti s jeho vlivem na adhezi, opotřebení a el. izolaci. Mezi první, kdo se pískováním zabýval, patří Kumar [26], který se věnoval především vlivu pískování na opotřebení. Na jeho práci navázal zejména Lewis (opotřebení, el. izolace), přičemž nejvíce se pískování následně věnoval Arias-Cuevas, který svůj výzkum prováděl, až na jednu výjimku, na twin-disc zařízení SUROS [11].

1.5.1 Adheze

Výzkum vlivu pískování na adhezi se dá označit jako stěžejní, protože obnova adheze je důvodem, proč se pískování vlastně používá. Jak pískování ovlivňuje adhezi v kontaktu, bylo zkoumáno nejen u různých kontaminantů, ale i u suchého kontaktu. U pískování je třeba zkoumat i vliv parametrů, které efektivnost pískování ovlivňují, což může být při následném uplatnění v praxi velkým přínosem. Dosavadním výzkumem bylo potvrzeno, že pískování zvyšuje adhezi u všech testovaných kontaminantů. Při experimentech byla uvažována kontaminace kontaktu vodou, mokrým i suchým listím, olejem a emulzí z vody a oleje.

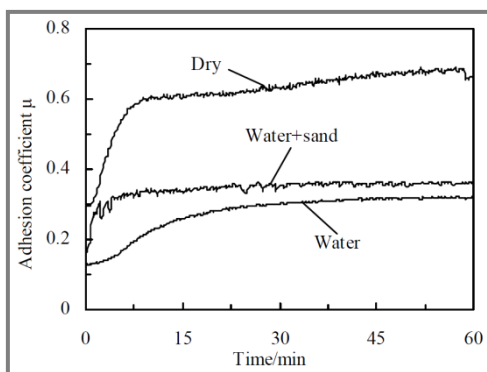
Pokud dojde k aplikaci písku do suchého a čistého kontaktu, tak dochází k poklesu adheze, protože se písek chová jako velmi špatné „mazivo“ [6, 26, 50, 52, 56]. Při drcení písku v kontaktu se tvoří vrstva z částic písku, které se po sobě snadno pohybují a v kontaktu tak působí jako lubrikant [52, 56]. Pokud se zvětšuje množství

aplikovaného písku, tak dochází postupně k úplnému vymizení přímého kontaktu funkčních povrchů a písek způsobí jejich úplnou izolaci [52]. K tomuto chování nedochází, když je v kontaktu velice malé množství písku. V tom případě je pak možné za určitých podmínek pozorovat zanedbatelný nárůst adheze [26].

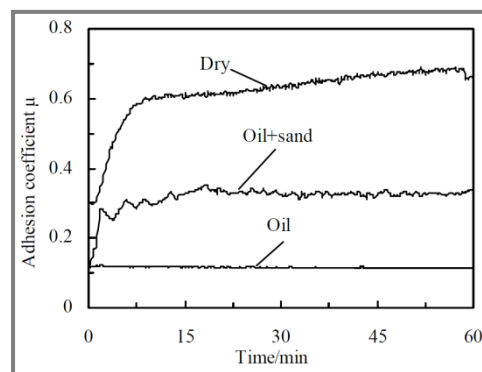
Pískování je velice účinné za mokrých podmínek, kdy písek ulpívá na funkčním povrchu disků, díky čemuž do kontaktu vstupuje větší množství písku, který pak může poskytnout dokonce i vyšší adhezi než za suchých podmínek [50, 54]. Pískováním mokrého kontaktu se dále zabýval jedině Wang [28, 55], který zaznamenal značně menší nárůst, což je pravděpodobně způsobeno především použitím několikanásobně menšího množství písku.

Experimenty s emulzí z vody a oleje prováděl pouze Wang [28], který zjistil, že při pískování dochází k velice malému obnovení adheze ($\sim 0,05$). Tyto výsledky mohly být způsobeny kontinuální aplikací emulze, velkou testovanou rychlostí, nebo také velice malou hodnotou skluzu 0,5 %. Další experimenty, které následně provedl na odlišném zařízení, s jednorázovou aplikací oleje ukázaly, že hodnota adheze po pískování může být téměř srovnatelná s pískováním mokrého kontaktu (obr. 1-19, obr. 1-20) [55]. Ještě vyšší hodnoty adheze u kontaktu kontaminovaného olejem dosáhl Kumar [26], přičemž byla také uvažována malá velikost skluzu. Je třeba ještě vyzdvihnout, že i když je velikost adheze po pískování u oleje menší než u vody, tak nárůst adheze je naopak daleko vyšší u oleje vlivem velice nízké počáteční adheze [55].

U kontaktu kontaminovaného listy může pískování obnovit adhezi na úroveň dosaženou před přidáním listů a zároveň působí preventivně proti tvorbě vrstvy z listů [6]. Pro úplné obnovení adheze je nutné odstranit vrstvu z listů, pro jejíž odstranění je zapotřebí velkého množství cyklů, jejichž počet závisí na parametrech pískování a velikosti skluzu v kontaktu.



Obr. 1-19 Adheze při pískování mokrého kontaktu [55]

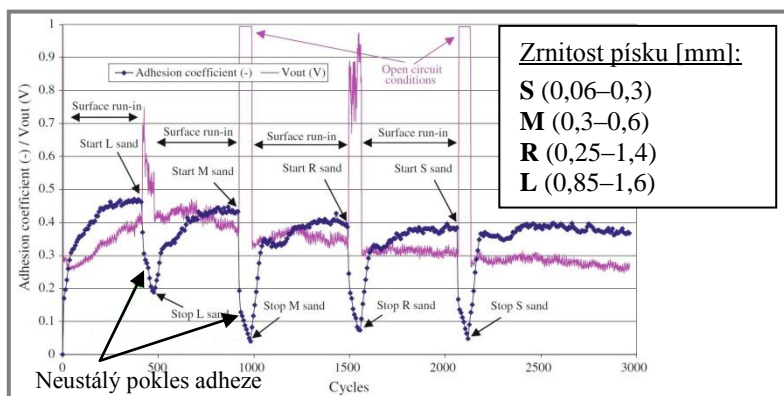


Obr. 1-20 Adheze při pískování kontaktu s přítomností oleje [55]

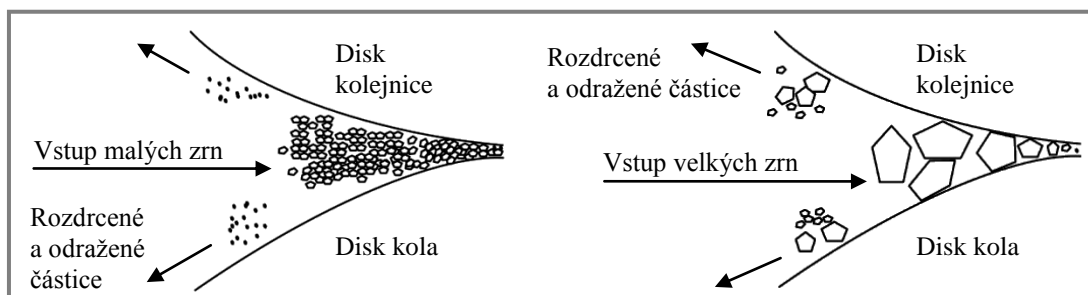
Vliv provozních parametrů a parametrů pískování

Vlivu parametrů pískování na adhezi se podrobně věnoval pouze Arias-Cuevas, a to za suchých podmínek [52], nebo při kontaminaci listím [38, 47, 53]. Mezi parametry pískování patří: dodávané množství písku za čas, aplikované množství neboli doba aplikace, zrnitost písku. Z provozních parametrů pískování ovlivňuje především aktuální velikost skluzu v kontaktu, jehož vliv zkoumal také Arias-Cuevas [47, 52, 53].

Arias-Cuevas [52] během svého výzkumu pískování suchého kontaktu zjistil, že nejvyšší hodnotu adheze poskytuje písek s největší velikostí zrn (obr. 1-21). Uvedl, že největší adheze u největších zrn může být způsobena buď jejich větším abrazivním účinkem, nebo tím, že do kontaktu vstupuje menší množství písku. Větší zrna se totiž musí při vstupu do kontaktu více rozdrtit, díky čemuž se do samotného kontaktu dostane méně částic písku (značná část během drcení odletí) jak je znázorněno na obr. 1-22.



Obr. 1-21 Vliv velikosti zrn na adhezi i elektrickou izolaci – upraveno [52]



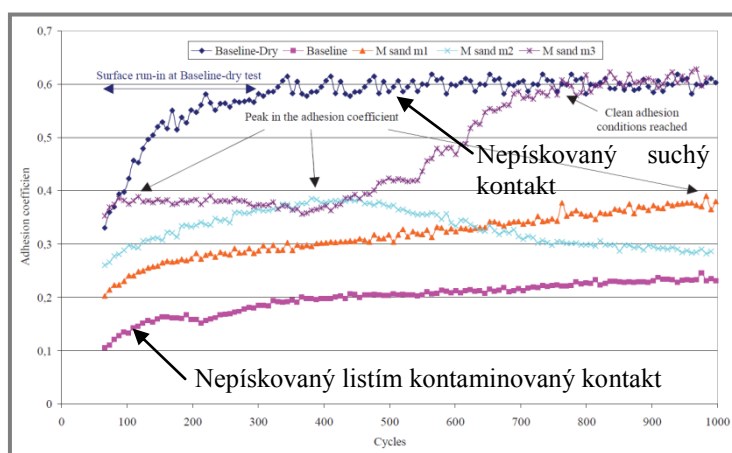
Obr. 1-22 Schematické znázornění vstupu různě velkých zrn písku do kontaktu – upraveno [52]

Dále Arias-Cuevas [52] především zjistil, že s rostoucím dodávaným množstvím za jednotku času se písek v suchém kontaktu chová více jako lubrikant a dochází k většímu poklesu adheze. Zvláště u většího množství byla zaznamenána stálá tendence poklesu adheze během aplikace. Arias-Cuevas uvedl, že to mohlo být způsobeno vznikem jemného prášku, který vzniká při drcení písku v kontaktu. Dále pozoroval, že tento jev téměř vymizel při vyšších hodnotách skluzu, díky většímu abrazivnímu (a čistícímu) účinku, který zároveň přinesl i větší hodnotu adheze [52].

Experimenty u listím kontaminovaného kontaktu bylo zjištěno, že obnova adheze nastává vlivem abrazivního účinku zrn písku v kontaktu, díky kterému dochází k odstranění vrstvy z listí [53]. S rostoucí velikostí skluzu je potom obnovení adheze rychlejší a především větší [47, 53]. Při větším celkovém množství aplikovaného písku dochází k rychlejší i větší obnově adheze (obr. 1-22) [53]. Dále bylo zjištěno, že největší navýšení adheze u kontaminace listím poskytuje písek střední velikosti zrn (0,4 mm) [53], což bylo ověřeno i měřením v reálných podmínkách [38]. Na rozdíl od suchého kontaktu v tomto případě poskytoval písek

s největší velikostí zrn nejhorší míru obnovení adheze [38, 53]. Výjimkou byly experimenty, při kterých vlivem nedostatečné kontaminace listy (dlouhá doba experimentu) došlo ve své podstatě k pískování suchého kontaktu, čemuž odpovídají i získané výsledky (nejlepší písek velké zrnitosti) [47]. Při pískování v reálných podmínkách se skutečnou lokomotivou bylo zjištěno, že již po několikátém přejezdu lokomotivy docházelo k obnově adheze na počáteční úroveň, přičemž byl zároveň prokázán vliv pískování na adhezi i u dalších nepískovaných oprav [38].

Dále bylo u pískování pozorováno, že při vysoké rychlosti (120 km/h) dochází u emulze z vody a oleje k většímu kolísání adheze, které se objeví i pokud se zvýší kontaktní tlak na vysokou hodnotu 1,2 GPa [28].



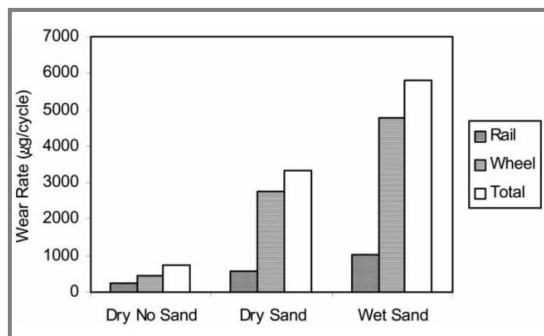
Obr. 1-23 Vliv různého celkového množství aplikovaného písku na adhezi (množství řazené vzestupně: m1, m2, m3) [53]

1.5.2 Opotřebení

1.5.2

Značně nepříznivým efektem pískování je zvýšené opotřebení, které může být při nevhodné aplikaci písku až katastrofální [2]. Opotřebovává se kolo i kolejnice, přičemž opotřebení vlivem pískování může být 10 až 100krát větší [4]. Problémem spojeným s opotřebením se zabývalo několik prací, které shodně zaznamenaly vážné opotřebení kontaktních povrchů [6, 26, 47, 50, 55, 56].

Při experimentech na twin-disc zařízení zjistil Kumar [26] při malém skluzu 1 % opotřebení pouze 1 až 2krát větší. Zejména především pozoroval značné rozšíření kontaktní plochy vlivem působení písku v kontaktu. Dalším výzkumem bylo zjištěno, že míra opotřebení je spojena především se zvětšujícím se skluzem a zrnitostí písku [47]. Opotřebením se zabýval zejména Lewis [50], a to za mokrých i suchých provozních podmínek, přičemž v obou případech bylo při aplikaci pískování zjištěno těžké opotřebení disku kola i kolejnice. Největší opotřebení nastalo u mokrého kontaktu vlivem ulpívání písku na discích, čímž se zvýšil počet částic vstupujících do kontaktu. Disk kola se opotřeboval výrazně více (až 10krát) než disk kolejnice (obr. 1-24). Na disku kolejnice se při použití pískování objevilo výrazné abrazivní opotřebení. Bylo způsobeno částicemi písku, které se vlivem vysokého zatížení zapichovaly do měkčího disku kola a následně opotřebovaly disk kolejnice.

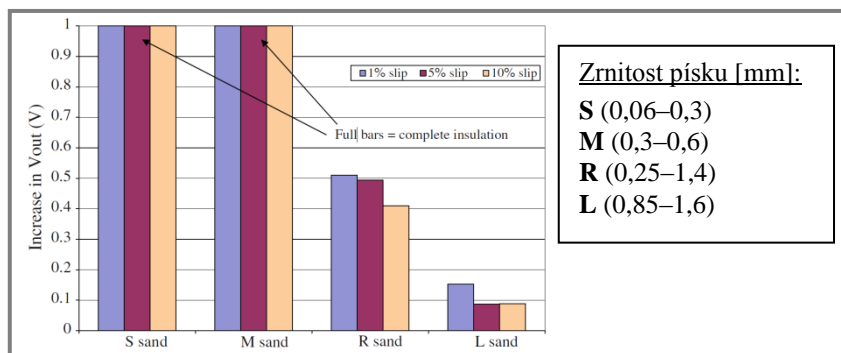


Obr. 1-24 Vliv pískování na opotřebení [50]

1.5.3 Elektrická izolace

Nebezpečí pískování spočívá zejména v tom, že může nepříznivě ovlivnit schopnost detekce vlaku na kolejích, což může mít velice tragické následky. Pískováním v souvislosti s el. izolací kontaktu se zabýval Lewis [41, 54] a Arias-Cuevas [52, 53].

Experimenty bylo zjištěno, že z hlediska bezpečnosti jsou nejlepší menší dodávaná množství písku spolu s větší zrnitostí, a to při vyšších hodnotách skluzu [52]. Pokud je použit písek menší zrnitosti (střední velikosti zrna 0,4 mm), tak při množství 7,5 g/m dochází k izolaci i při vyšších hodnotách skluzu, zatímco u větších zrnitostí k izolaci suchého kontaktu nedochází (obr. 1-21, obr. 1-25) [52]. Na izolaci kontaktu pískem má vliv i rychlost, přičemž při nižší rychlosti dochází k větší izolaci [54].



Obr. 1-25 Vliv zrnitosti písku a velikosti skluzu na el. izolaci – upraveno [52]

Pokud je kontakt kontaminovaný vodou, tak dochází k ulpívání písku na funkčním povrchu, což způsobuje přítomnost většího množství písku v kontaktu, který pak může způsobit větší izolaci kontaktu než za suchých podmínek [54]. Při drcení písku nedochází k takovému rozptýlu částic jako v případě suchého kontaktu. Částice mají naopak tendenci zůstat při sobě, což může za jistých podmínek přispět k větší izolaci kontaktu [41].

Dále bylo zjištěno, že největší izolaci způsobuje písek u kontaktu, který je kontaminován suchými listy [41]. V případě mokřích listů totiž písek snadněji proniká izolující vrstvou, a tím poskytuje větší vodivost kontaktu. Písek při kontaminaci listím způsobuje sice ještě větší izolaci, ale na druhou stranu

při jeho působení v kontaktu dochází k odstraňování vrstvy z listí, a tím i ke zlepšování vodivosti kontaktu. Pískování tedy obnovuje při kontaminaci listím vodivost kontaktu, přičemž je tato obnova rychlejší při použití většího celkového množství písku [53].

1.6 Nejdůležitější poznatky o kontaminaci a pískování

1.6

Na základě provedené rešerše byl vytvořen níže uvedený celkový přehled nejdůležitějších poznatků spojených s kontaminací kontaktu a pískováním.

Voda

- Nejběžněji se vyskytující kontaminant v mnoha různých formách
- Nepříznivý vliv má i vysoká vzdušná vlhkost
- Zejména při malém množství působí ve spojení s dalšími kontaminanty jako iniciátor nízké adheze
- Při větším množství má spíše čistící účinek a zbavuje kontakt dalších kontaminantů
- S rostoucím množstvím vody klesá adheze
- Klesající teplota vody snižuje adhezi
- Adheze se snižuje s rostoucí rychlostí, přičemž zvláště výrazný pokles je při vysokých rychlostech

Olej

- Pro kontaminaci stačí i velmi malé množství, které způsobí pokles adheze na kritické hodnoty
- Velikost poklesu adheze není příliš závislá na množství
- Emulze s vodou poskytuje nižší adhezi než samotný olej (nejhorší je vyšší poměr vody jak oleje)

Listí

- Nejhorší je kontaminace mokrým listím
- Kontaminant způsobující nejnižší adhezi (až $\mu = 0,01$)
- Nízká adheze je způsobena kluzkou vrstvou z listí, která se tvoří na povrchu kontaktních těles a vzniká chemickou reakcí mezi látkami v listech a ocelovým povrchem
- Pro obnovení adheze je nutné odstranit špatně odstranitelnou vrstvu z listí
- I samotný extrakt z listí způsobuje nízkou adhezi

Pískování

- Zvyšuje adhezi u všech kontaminantů, nejvíce u vody
- Výrazně zvyšuje míru opotřebení kola i kolejnice, přičemž kolo se opotřebovává více
- Mechanismus obnovy adheze u kontaminace listím je pomocí abrazivního opotřebení vrstvy z listí
- Mezi parametry pískování nejvíce ovlivňující jeho efektivnost patří dodávané množství písku za jednotku času a jeho zrnitost
- S velikostí skluzu v kontaktu roste efektivnost pískování
- Písek se v suchém kontaktu chová jako „tuhé mazivo“ a během jeho aplikace dochází k poměrně výraznému poklesu adheze

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

2

2.1 Shrnutí poznatků z kritické rešerše

2.1

Vypracovaná kritická rešerše současného stavu poznání ukázala, že problematika kontaktu kolo/kolejnice je velmi rozsáhlá a zahrnuje v sobě celou řadu vědních disciplín. Existuje mnoho prací zabývajících se, ať už přímo nebo nepřímo, touto problematikou a vyzdvihují tak aktuálnost i potřebu dalšího výzkumu, který je spojen s udržením rozvoje železniční dopravy.

Na základě provedené rešerše lze říci, že mnoho publikovaných prací se věnuje kontaminaci kontaktu kolo/kolejnice, avšak pouze menší část z nich se zabývá pískováním. Ještě méně prací se věnuje samotnému účelu, za jakým se pískování vlastně používá (navýšení adheze) a zaměřuje se na problémy, které jsou s ním spojeny (opotřebení, izolace). Ze zbylých prací se pak vlivu parametrů pískování na navýšení adheze významně věnuje pouze Arias-Cuevas [38, 47, 53], přičemž uvažuje jen kontaminaci kontaktu listím.

Pro experimentální výzkum (zvláště rozsáhlejší) se jeví jako nejvýhodnější využít laboratorního zařízení typu twin-disc. Poskytuje dobrou kontrolu nad vstupy i výstupy experimentů, přičemž jejich realizace není tak nákladná [2]. Mírně zkrácené výsledky oproti měření v reálných podmínkách jsou daní za zjednodušení kontaktu a provozních parametrů i podmínek.

Parametry experimentů úzce souvisejí s možnostmi využívaného laboratorního zařízení. Většina experimentů je ale prováděna v režimech nízké rychlosti (zpravidla 1 m/s), simulujících podmínky špatné adheze při rozjezdu [6, 22, 47, 50, 52]. Měření probíhají při skluzech vyskytujících se v reálných podmínkách (běžně 1–10 %) [6, 22, 24, 30]. Kontaktní tlak je zpravidla (0,8 až 1,2) GPa, což opět reflektuje reálnou situaci v kolejové dopravě [11, 20, 29, 36, 52].

Experimentální podmínky jsou v případě kontaminace vodou nebo olejem zajišťovány aplikací těchto kontaminantů na vrchní disk dvoudiskového zařízení [6, 25]. U vody je možný i méně využívaný způsob aplikace tryskou přímo do kontaktu [24]. Kontaminace disků listím je v případě dvoudiskového zařízení realizována zdlouhavou manuální aplikací zpravidla celých listů (pomocí skluzu) přímo do kontaktu, a to za chodu disků [6, 47, 53]. Alternativou je případ zařízení MTM [37] a pin-on-disc [35], u kterých byl volen způsob kontaminace ve formě kousků z listů. Publikované práce podmínky kontaminace podrobně popisují a v případě kontaminace listím se věnují i způsobu přípravy tohoto experimentálního materiálu.

K přivedení písku do kontaktu se u experimentů běžně využívá hadice [6, 28, 52]. Aplikace bývá i manuální [6], přičemž v některých případech byl k aplikaci využit ventil z pískovacího zařízení [50, 54]. V rámci měření bylo měněno množství dodávaného písku za čas [52], nebo bylo aplikováno různé celkové množství písku [53].

Nejčastěji je příčinou nízké adheze kontaminace vodou, která se může vyskytovat v různých formách [4]. Voda je nebezpečná zvláště v malých množstvích, když se vyskytuje „samostatně“, nebo ve spolupráci s dalšími kontaminanty, způsobuje nízkou adhezi [17]. Adheze je velmi nízká při kontaminaci olejem, ale nejnižších hodnot dosahuje, když jsou v kontaktu přítomny mokré listy,

kteřé vytvoří velice kluzkou vrstvu z listí [6]. Pro obnovu adheze je nutné tuto velmi špatně odstranitelnou vrstvu alespoň částečně odstranit.

Pískování patří stále k nejpoužívanějším a neúčinnějším prostředkům pro obnovu adheze v kontaminovaném kontaktu kolo/kolejnice. U všech kontaminantů při jeho aplikaci dochází k výraznému navýšení adheze. Pískovat je třeba hlavně u kontaminantů způsobujících velmi nízkou adhezi, mezi něž řadíme olej a listí. Nevýhodou pískování je velké opotřebení kola i kolejnice [50] a také jeho negativní vliv na detekci vlaku bezpečnostním systémem (izolace) [52, 54]. Míra opotřebení je ovlivněna hlavně rostoucím skluzem a velikostí částic písku [47]. Nebezpečí elektrické izolace roste s dodávaným množstvím písku a jeho menší zrnitostí [52]. Špatný vliv na izolaci má také zmenšující se rychlost a velikost skluzu. Mezi nejdůležitější parametry ovlivňující efektivnost pískování patří dodávané množství písku za čas a velikost částic [52]. Na pískování má také vliv rychlost a aktuální velikost skluzu. Společně určují velikost skluzové rychlosti v kontaktu a ovlivňují tak také efektivnost pískování.

Poznatky, které jsou důležité pro řešení této práce a byly získány z vypracované rešerše, lze shrnout do několika následujících hlavních bodů:

- **Experimentální zařízení** – jaká zařízení se pro studium kontaminace a pískování využívají
- **Parametry experimentů** – používané parametry při realizaci experimentů
- **Kontaminanty** – zjištění kontaminantů, které se v kolejové dopravě nejčastěji vyskytují a jak ovlivňují chování kontaktu kolo/kolejnice
- **Aplikace kontaminantů a pískování** – používané způsoby přípravy a aplikace kontaminantů i pískovacího materiálu
- **Vyhodnocení** – způsoby vyhodnocení experimentů a jejich prezentace

2.2 Analýza problému

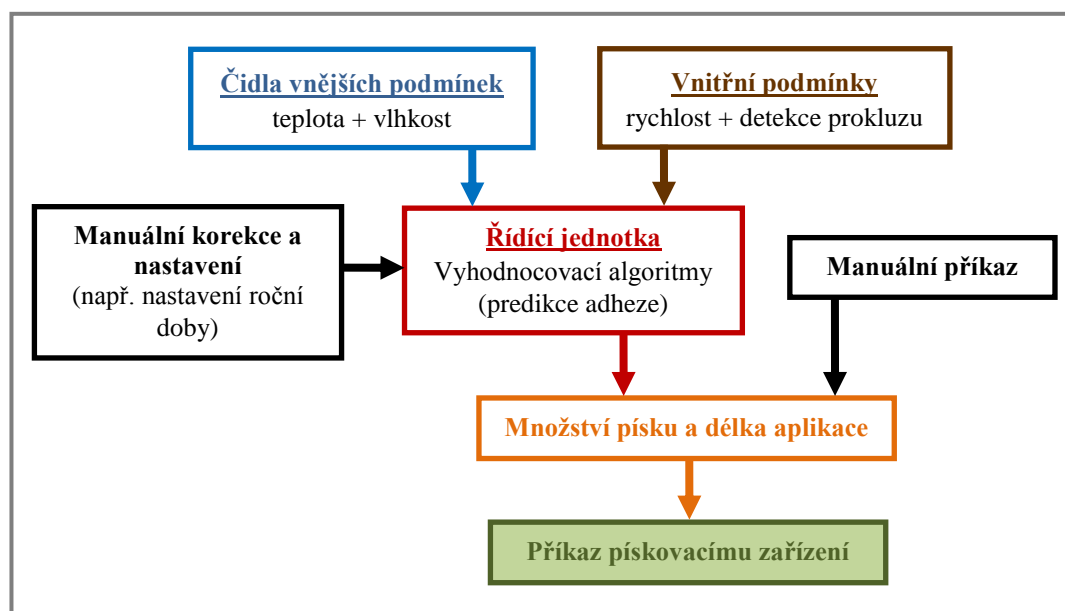
Pískovací zařízení používaná pro aplikaci písku do kontaktu mezi kolem a kolejničí jsou většinou ovládána z kabiny řidiče kolejového vozidla pomocí stisku tlačítka nebo pedálu, přičemž doba aplikace je dána délkou stisku. Příkaz k použití pískování tedy závisí na daném člověku a jeho uvážení, zda je či není nutné a možné v dané situaci pískovat. Právě z tohoto důvodu může být pískování nevhodně používáno i v situacích kdy to není zapotřebí, přičemž může být zároveň aplikováno i nadměrné množství písku. Tyto skutečnosti potom vedou ke zvýšenému projevu všech nepříznivých vlivů spojených s pískováním (opotřebení, prašnost atd.). Z důvodu rozvoje a snižování nákladů je nutné tyto nepříznivé účinky naopak minimalizovat a zajistit co nejefektivnější využití procesu pískování. Prostředkem k dosažení tohoto cíle je použití inteligentních pískovacích systémů, které se začínají postupně využívat. Tyto systémy ovládají funkci pískovacího zařízení a určují, jaké má být aplikováno množství písku při aktuálních provozních podmínkách. Při pískování je zohledňován i současný požadavek na trakci či intenzitu brzdění.

Pro optimalizaci těchto systémů jsou požadovány informace o adhezi za různých podmínek a pískování. Experimenty na zkušební trati, prováděné za účelem získání těchto informací jsou však velmi nákladné. Levnější alternativou

je použití vhodného laboratorního zařízení, s menším modelovým zkreslením, které poskytuje výsledky blížíící se právě měřením v reálných podmínkách.

Pro řízení pískování za účelem zajistit jeho co nejefektivnější použití je třeba znát aktuální vnitřní i vnější podmínky. K vnitřním podmínkám patří hlavně snadno zjistitelná rychlost vozidla a dále velikost skluzu v kontaktu, který se dá vypočítat z již známé rychlosti vozidla a rychlosti otáčení hnací nápravy. Mezi vnější podmínky patří sklon tratě, teplota a druh kontaminantu v kontaktu kolo/kolejnice, který je obtížné, až nemožné přesně určit, přičemž se navíc jednotlivé kontaminanty většinou nevyskytují samostatně. Nicméně základní informace o vnějších podmínkách je možné získat pomocí čidel teploty a vlhkosti. Systém řízení by měl fungovat tak, že na základě shromážděných aktuálních vnitřních a vnějších podmínek bude řídicí jednotka pomocí teoretických modelů predikovat velikost adheze v kontaktu. Ve spolupráci se systémem detekce prokluzu pak pomocí vyhodnocovacích algoritmů určí množství písku a délku aplikace.

Je třeba říci, že problematická může být především detekce vnějších podmínek, a to zejména kontaminantů. Řešení tohoto problému, ale není náplní této práce.



Obr. 2-1 Schematické znázornění funkce pískovacího systému

2.3 Cíl a podstata práce

Cílem práce je objasnit chování pískovacího materiálu a kontaminantů v kontaktu železničního kola a kolejnice užitím vyvíjeného dvoudiskového experimentálního zařízení.

Práce se zaměřuje na studium vlivu množství pískovacího materiálu na adhezi v kontaminovaném kontaktu kola a kolejnice. V rámci řešení bude uvažován i vliv provozních parametrů na efektivnost pískování. Přínosem řešení této práce budou experimentální data, která budou využita při optimalizaci procesu pískování prostřednictvím vyvíjeného systému.

Vědecká otázka:

„Jaký je vliv množství pískovacího materiálu na navýšení adheze v kontaktu mezi kolem a kolejnicí při uvažování různých provozních parametrů a kontaminantů?“

Vyslovené hypotézy:

„S rostoucím množstvím písku roste míra obnovení adheze, přičemž existuje hraniční množství, různé pro každý kontaminant, od kterého se adheze již dále významně nezvyšuje.“

2.4 Výstup práce

Výstupem řešení této diplomové práce v kategoriích definovaných pro základní výzkum v souladu s platnou metodikou hodnocení výsledků výzkumu a vývoje [57] je článek v impaktovaném časopise (**J_{imp}**), a to ve stavu odesláno k posouzení vydavatelem.

2.5 Odůvodnění nutnosti a potřebnosti řešení

Železniční doprava je ekologický a velice efektivní způsob dopravy s nízkými energetickými nároky. I tak se ale stále zvyšují nároky na ještě větší efektivnost, rychlost a zejména bezpečnost. Tyto požadavky jsou mimo jiné přímo spojeny s konkurenceschopností tohoto způsobu dopravy. Pro splnění těchto požadavků je třeba zajistit dostatečnou adhezi v kontaktu kolo/kolejnice pro přenos sil při trakci nebo brzdění. Uvádí se, že odhadované roční náklady spojené se špatnou adhezí jsou na evropských železnicích ve výši 90 mil. € (rok 2003) [2]. Správný management adheze kontaktu kolo/kolejnice pak může ušetřit až 30 % energie [2]. Úspory ve zvládnutí problému nízké adheze a v případné optimalizaci velikosti adheze mohou být tedy značné. Pískování je neúčinnějším a nejpoužívanějším způsobem pro obnovu adheze, avšak jeho využití se také promítá do nákladů (zvýšené opotřebení atd.). Prostředkem pro další snížení nákladů spojených s nízkou adhezí a pískováním je optimalizace procesu pískování a jeho správné využití.

Doposud se problémem pískování kontaminovaného kontaktu v souvislosti se studiem adheze zabývalo jen velmi málo publikovaných prací, které se zaměřily jen na některé kontaminanty nebo parametry pískování. Případně pak byly

předmětem výzkumu jiné negativní následky pískování, jako je opotřebení nebo nebezpečí el. izolace. Je zde tedy stále jistá mezera ve výzkumu vlivu kontaminantů na adhezi při aplikaci pískování, kterou by tato práce měla alespoň částečně, do jisté míry vyplnit. Práce přispěje novými poznatky v oblasti pískování kontaktu kolo/kolejnice a může tak případně v budoucnu poskytnout podklady pro další výzkum.

2.6 Použité metody vědeckého zkoumání

2.6

Tato diplomová práce využívá empirické metody zkoumání, které jsou založeny na získávání zkušeností z pozorování živého obrazu reality. Potřebná data jsou v tomto případě sbírána za pomoci uskutečnění experimentů, při nichž je modelová situace cíleně pozorována, a to za předem zvolených podmínek. Vliv těchto podmínek na chování systému je následně vyhodnocován a je nabýváno nových zkušeností. Při vyhodnocení a interpretaci výsledků je pak nutné pamatovat na míru modelového zkreslení reality.

Pro řešení této práce je použita metoda vědeckého zkoumání pomocí indukce a dedukce. Nejprve je ze získaných znalostí s využitím metody indukce vyvozen obecný závěr ve formě vyslovené hypotézy. Následnou dedukcí, jejímž prostředkem je i experiment pak dojde k vyvrácení, nebo potvrzení této hypotézy a získání nových zkušeností. Na základě nových zkušeností může být formulována hypotéza nová a celý cyklus se opakuje. Výsledkem tohoto procesu je nabytí nových znalostí z potvrzených hypotéz.

2.7 Rozsah práce autora

2.7

Předložená diplomová práce je součástí rozsáhlého projektu řešeného v rámci týmu. Rozsah práce autora byl následující:

- Příprava experimentů a experimentálního materiálu
- Návrh provozních parametrů a podmínek
- Realizace experimentů – ve spolupráci s dalším členem týmu z důvodu potřeby dvoučlenné obsluhy laboratorního zařízení
- Zpracování a vyhodnocení provedených měření spolu s vyvozením závěrů



Tato práce vznikla v rámci řešení projektu č. TA02030850 s názvem "Výzkum a vývoj progresivního pískovacího systému kolejových vozidel" podpořeného ze státního rozpočtu prostřednictvím programu Alfa Technologické agentury České republiky.

3 MATERIÁL A METODY

3.1 Metodika řešení

Prvním bodem postupu řešení je výběr zařízení pro realizaci experimentů. V tomto případě bylo použito nově vyvinuté dvoudiskové zařízení. Mezi následné body postupu patří volba provozních parametrů, které se zčásti odvíjí od použitého zařízení. Dále je nutné vybrat testované kontaminanty i vhodný pískovací materiál a zajistit vhodnou přípravu, s níž přímo souvisí i způsob aplikace. Následuje samotná realizace experimentů. Finální a zároveň klíčovou částí je vyhodnocení experimentů a vyvození závěrů.

Postup řešení v bodech:

- Experimentální zařízení pro realizaci měření
- Volba provozních parametrů a podmínek
- Experimentální materiál, jeho příprava a způsob aplikace
- Realizace experimentů
- Vyhodnocení a závěry

Před experimenty s pískováním bude nejprve zkoumán vliv samotných kontaminantů na adhezi, přičemž pro porovnání jejich vlivu bude proměřen i nekontaminovaný suchý kontakt. Účelem bude zjistit, jaké výsledky poskytuje nové dvoudiskové zařízení a následně je porovnat s údaji získanými ze zařízení tohoto typu či se situací v reálných podmínkách. Uvažována bude především kontaminace vodou a listím, protože se jedná o běžné, nejčastěji se vyskytující kontaminanty. Zároveň je možné jejich výskyt předvídat v reálných podmínkách. Příprava i aplikace experimentálního materiálu musí být taková, aby simulovala reálné podmínky, přičemž je nutné zajistit *dostatečnou a rovnoměrnou* kontaminaci disků.

Účinek pískování na adhezi bude opět studován především u kontaminace vodou a listím. Následovat bude již ne tak podrobné proměření dalších kontaminantů. Bude zkoumán vliv množství písku na navýšení adheze prostřednictvím různého množství písku dodávaného do kontaktu během krátké doby, která bude dostatečná pro sledování velikosti nárůstu adheze, který bude následně porovnáván. Doba experimentů bude co nejkratší, aby se zamezilo nadměrnému opotřebením kontaktních těles (disků). Pro realizaci experimentů je totiž k dispozici omezené množství disků, jejichž pořízení je nákladné a při měřeních s pískováním se extrémně rychle opotřebovávají. K aplikaci písku bude použita tryska, která je vyrobena ve stejném měřítku jako disky, což poslouží pro přibližný přepočítání aplikovaného množství písku do reálné situace.

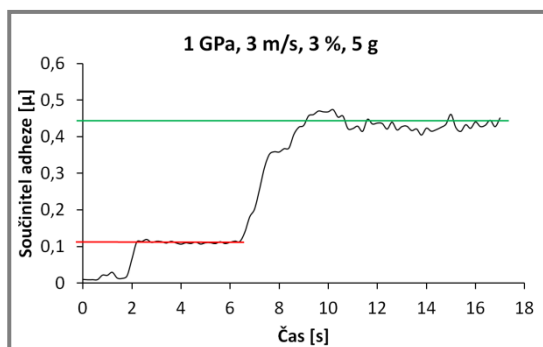
3.1.1 Postup měření a vyhodnocení

U všech měření bude pro záznam a zpracování veličin měřených na laboratorním zařízení využit software Dewesoft. Předmětem zájmu bude především, během měření zaznamenaný, průběh součinitele adheze v čase, který bude za pomoci exportu dále zpracován a vyhodnocován v Excelu.

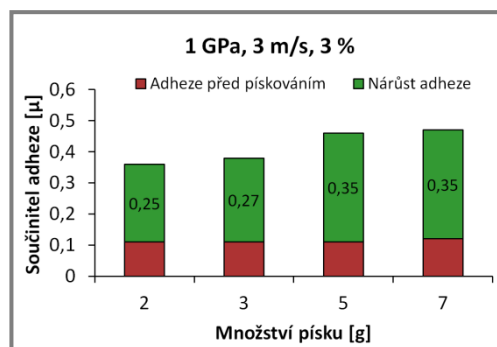
V případě experimentů pouze s kontaminanty bude ze získaného průběhu adheze odečtena průměrná velikost součinitele adheze, a to z části záznamu,

kde došlo k ustálení. Následně bude velikost adheze porovnána při různých provozních podmínkách, především za pomoci adhezních charakteristik sestrojých z bodů, naměřených při konkrétních provozních parametrech. K dalšímu vyhodnocení poslouží mimo jiné i sloupcové grafy.

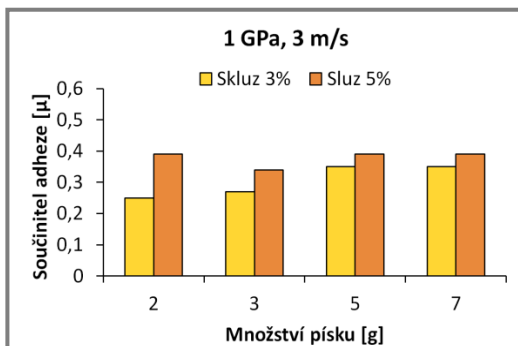
U experimentů s pískováním bude nejprve vyčkáno na stabilizaci adheze v kontaminovaném kontaktu, podobně jako při měření bez pískování. Následně dojde k aplikaci písku určitého množství, čímž se adheze na chvíli navýší. Pro vyhodnocení pak bude odečtena hodnota adheze před a po aplikaci pískování, tak jak je naznačeno na obr. 3-1. Odečtené hodnoty budou potom využity k sestrojení skládaných sloupcových grafů, na kterých bude porovnáán vliv různého množství pískovacího materiálu na adhezi, při stejných provozních parametrech (viz obr. 3-2). Sledován bude především nárůst adheze vlivem pískování, který je na obr. 3-2 zobrazen zeleně. Tento způsob vyhodnocení má minimalizovat vliv různé velikosti adheze před pískováním na následně získané výsledky ve formě nárůstu adheze. I při zajištění stejných parametrů a provozních podmínek totiž velikost adheze při jednotlivých měřeních mírně kolísá. Je to dáno tím, že je prakticky nemožné zajistit naprosto identické podmínky (opotřebení, mírně rozdílný stupeň kontaminace, atd.). Podle výše popsaného postupu budou sestrojeny grafy pro různé, měnící se parametry (skluz, rychlost) i kontaminanty. Pro přehledné zobrazení více výsledků najednou bude nakonec vždy využito skupinového sloupcového grafu, který porovná samotné hodnoty nárůstu adheze při různém množství písku za rozdílné velikosti uvažovaného skluzu (obr. 3-3).



Obr. 3-1 Odečtení velikosti adheze (extrakt z listí)



Obr. 3-2 Porovnání nárůstu adheze (extrakt z listí)



Obr. 3-3 Porovnání nárůstu adheze při různých skluzech (extrakt z listí)

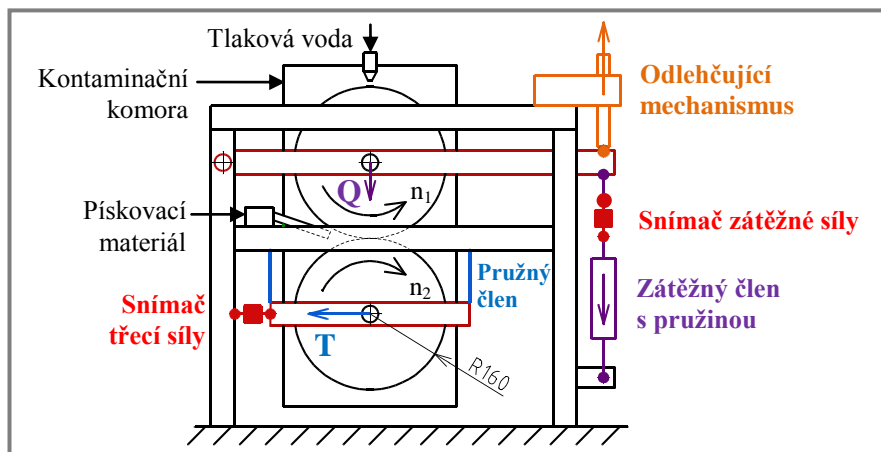
3.2 Experimentální zařízení

Dvoudiskové experimentální zařízení, na němž byl v této práci prezentovaný výzkum prováděn, má své umístění v laboratořích Ústavu mechaniky těles na FSI. Podrobný popis tohoto zařízení i s výpočty je možné nalézt v práci hlavního autora R. Galase [58]. Zařízení tvoří dva nosné rámy s komponentami a je obsluhováno z kontrolního stanoviště s PC užívaného k řízení i měření (obr. 3-5). Pro přibližnou představu o velikosti lze zmínit rozměry (1,7 x 1,9 x 1,6) m.

Primární nosný rám zařízení slouží k uložení obou disků simulujících kontakt mezi obvodem kola a pojižděnou plochou kolejnice (obr. 3-4). Vůči sobě zatěžované disky jsou umístěny nad sebou, každý v samostatném rámu. Vrchní disk reprezentující kolejnici je uložen v zatěžovacím rámu, který pro vzájemné zatížení disků využívá pákového mechanismu zvětšujícího sílu vyvozenou zátěžným členem. Síla v zátěžném členu je sledována pomocí tenzometrického snímače. Samotný zátěžný člen se skládá ze závitové tyče pro manuální vyvození zatížení a pružiny kompenzující rázy, které mohou vzniknout průchodem kontaminantu či pískovacího materiálu kontaktem. Pružina zároveň umožňuje rychlé odlehčení disků za pomoci odlehčujícího mechanismu, jenž je tvořen zdvižnou převodovkou s elektromotorem. Spodní disk kola je přimontován k rámu, který je zavěšen na pásové oceli, umožňující snadnou deformaci a tedy i posuv rámu s diskem ve vodorovném směru, což je využito pro snímání třecí síly za pomoci tenzometru. Ta je společně se snímanou zátěžnou silou, pomocí které se nastavuje potřebný kontaktní tlak, použita pro výpočet adheze v kontaktu.

Sekundární nosný rám slouží k uložení pohonu tohoto zařízení. Pro dosažení požadovaného skluzu v kontaktu mezi disky je každý disk poháněn samostatně za pomoci elektromotoru (15 kW) s převodovkou (1:4,57). Krouticí moment je přenášen z rámu pohonu na disky prostřednictvím kardanova hřídele.

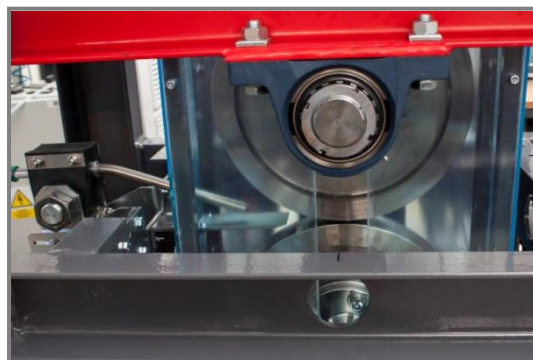
Oba disky jsou pro simulaci okolních podmínek vyskytujících se v reálném prostředí umístěny v transparentní kontaminační komoře, která zároveň poskytuje ochranu před odletujícími částicemi a znečištěním. Pro simulaci kontaminace vodou je k dispozici zásobník tlakové vody, která je přiváděna do kontaminační komory pomocí hadice ukončené tryskou s regulovatelným průtokem a rozstříkmem. Zařízení je rovněž vybaveno pískovací jednotkou, jejíž součástí je tryska v měřítku (1:3), která přivádí pískovací materiál přímo do kontaktu (obr. 3-6).



Obr. 3-4 Schéma hlavního rámu s diskem a popisem jednotlivých komponent



Obr. 3-6 Dvoudiskové experimentální zařízení [58]



Obr. 3-5 Detail kontaktu s tryskou pro pískování [58]

3.2.1 Měřicí a řídicí řetězec

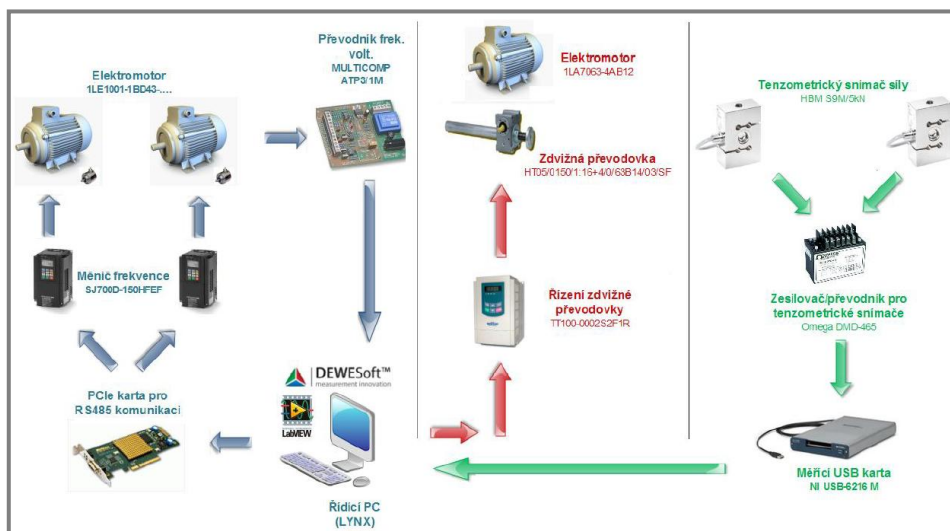
3.2.1

Elektromotory pohánějící disky testovacího zařízení jsou ovládány frekvenčními měniči, které jsou přes PCIe kartu připojeny k PC. K řízení měničů je použito k tomuto účelu naprogramované aplikace, umožňující nastavení požadovaných provozních parametrů jako je dopředná rychlost a skluz. Alternativou je potom možné nastavení otáček u obou disků. Pro kontrolu nad nastavenými parametry jsou navolené otáčky disků sledovány pomocí elektromagnetických indukčních snímačů upevněných k rámu zařízení.

Řízení elektromotoru, ovládajícího prostřednictvím zdvižné převodovky zatěžovací mechanismus, je realizováno za pomoci frekvenčního měniče. Měnič je umístěn na rámu dvoudiskového zařízení a je obsluhován pomocí ovládacího panelu, jenž je jeho součástí. Tento způsob ovládání zabezpečuje větší bezprostřední kontrolu nad procesem zatěžování a do jisté míry zvyšuje i bezpečnost.

Hlavními komponentami měřicího řetězce jsou dva tenzometrické snímače síly. První z nich snímá sílu vyvinutou zátěžným členem, přičemž druhý zaznamenává třecí sílu v kontaktu disků. Tenzometry jsou připojeny přes zesilovač/převodník k měřicí USB kartě, která převádí snímaný signál na digitální, jenž je dále zpracován v PC. Účelem měřicího řetězce je především určit součinitel adheze v kontaktu za pomoci dat z tenzometrů a následného výpočtu dle vzorce (1). Do vzorce je však v tomto případě ještě nutné zahrnout přepočtení síly v zátěžném členu, na sílu, kterou jsou disky vůči sobě zatíženy. Během měření je pak adheze kontinuálně počítána a vykreslována.

Pro ovládání celého zařízení i samotné měření slouží jeden PC a celý experiment je tak možné realizovat z jednoho stanoviště. Všechny snímané signály, jsou zaznamenávány a zpracovány softwarem Dewesoft. Průběh snímaných veličin v čase, z nichž byl filtrací odstraněn šum, je pak možné sledovat přímo v prostředí programu. Data získaná z měření lze nakonec exportovat např. do Excelu či Matlabu, dále zpracovat a vyhodnotit.



Obr. 3-7 Schéma měřicího a řídicího řetězce [58]

3.3 Experimentální materiál

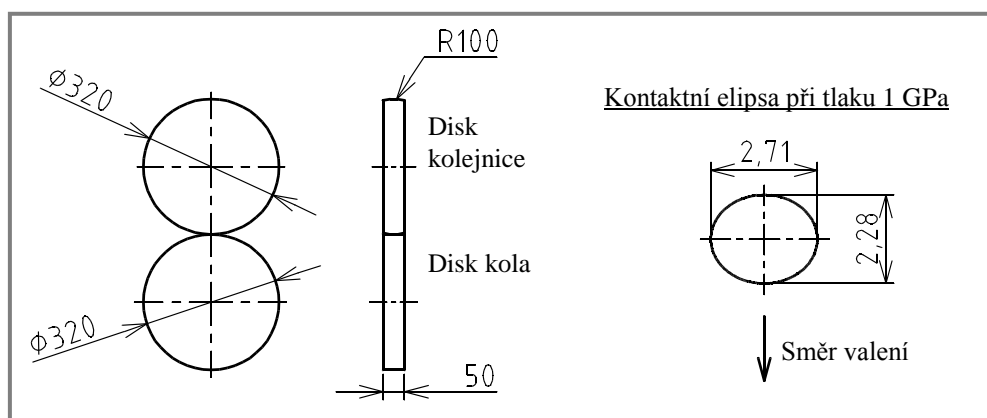
3.3.1 Kontaktní tělesa

Pro simulaci kontaktu mezi obvodem kola a pojezděnou plochou kolejnice se v případě dvoudiskového zařízení využívá dvou disků, kdy jeden z nich představuje kolo a druhý nekonečnou kolejnici. K realizaci experimentů bylo v této práci použito dvou disků stejného průměru 320 mm, které jsou v měřítku 1:3 vzhledem ke skutečnému kolu železničního dvojkolí. Kontaktní povrch disku kolejnice má po obvodě disku poloměr zaoblení 100 mm, který je opět v měřítku, a to vzhledem k zaoblení hlavy reálného profilu kolejnice s označením UIC 60. Díky tomuto zaoblení bylo docíleno kontaktní plochy tvaru elipsy, avšak s převráceným poměrem elipticity (směr hlavní poloosy není totožný se směrem valení), což bylo obětováno na úkor správnosti geometrického tvaru (zaoblení je v měřítku). Kvůli lepší aplikaci a distribuci pískovacího materiálu více odpovídající reálným podmínkám, byl disk kola umístěn pod disk kolejnice, a to z důvodu výše zmíněného zaoblení kontaktního povrchu disku kolejnice.

Oba disky jsou vyrobeny z oceli C45 (12 050), která má blízké chemické složení k oceli užívané na výrobu kol (R7T) a kolejnic (UIC 900A). Porovnání použitého materiálu s materiálem na kola a kolejnice, jež udává norma ČSN EN 13 262 + A2 [59] a ČSN 13 674 + A1 [60] je možné vidět v tab. 3-1. Disky byly při výrobě tepelně zpracovány zakalením v celém objemu, přičemž bylo dbáno na to, aby byla tvrdost funkčního povrchu disku kola menší než disku kolejnice (tab. 3-1). Tak je tomu totiž i ve skutečných podmínkách. Počáteční drsnost funkčních povrchů obou disků byla $R_a = 0,4 \mu\text{m}$.

Tab. 3-1 Materiálové vlastnosti kontaktních těles [59, 60]

Označení materiálu	Chemické složení [hmotn. %]					Tvrdość disku [HB]	
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Kola	Kolejnice
C45	0,46	0,25	0,65	0,30	0,25	245	280–300
UIC 900A	0,70	0,35	1,10	-	-		
R7T	0,52	0,40	0,80	0,30	0,30		



Obr. 3-8 Kontaktní tělesa spolu s kontaktní plochou

3.3.2 Kontaminační materiál

3.3.2

Po důkladném zvážení byly pro experimenty vybrány tyto kontaminanty: voda, plastické mazivo, mokré listí, listový extrakt. Je třeba připomenout, že voda, olej a listí jsou nejčastěji uvažované kontaminanty i v odborné literatuře, zabývající se touto problematikou. Podrobnější popis s odůvodněním použití jednotlivých kontaminantů je uveden níže.

Voda

Voda jako kontaminant byla volena především, protože se v kontaktu kolo/kolejnice vyskytuje nejčastěji, jak vyplývá z rešerše i logické úvahy. Zároveň je možné tento kontaminant v reálných podmínkách snadno předvídat pomocí čidel. Způsob aplikace vody byl volen takový, aby simuloval vlhké podmínky vyskytující se při mrholení či bezprostředně po dešti. Aplikace vody v tomto množství bylo dále případně využito i ve spojení s dalšími kontaminanty, kdy přítomnost malého množství vody podněcuje nízkou adhezi. Pro experimenty bylo dále voleno použití i druhého, většího množství vody, simulujícího podmínky odpovídající silnému dešti. Větší množství bylo voleno z důvodu, že v kontaktu působí čistícím účinkem², a tím

² I přes větší množství aplikované vody se nejednalo o situaci, kdy by byl písek z kontaktu přímo intenzivně vyplavován

pádem simuluje nejhorší podmínky pro pískování. Pro kontaminaci byla použita pitná voda o teplotě okolního prostředí (cca 20–23 °C).

Plastické mazivo

Výskyt maziva v kontaktu mezi obvodem kola a pojižděnou plochou kolejnice může být způsoben mnoha různými příčinami. Lze ale říci, že v zásadě existují dva hlavní důvody výskytu. Prvním z nich je únik maziva z některé části (nejen) kolejového vozidla. Logicky jde nejčastěji o maziva kapalná, tedy mazací oleje. Druhý hlavní důvod výskytu maziva je spojen s „nesprávnou“ funkcí mazacího systému používaného pro mazání okolků (kontaktu okolek/kolejnice), kdy může dojít k distribuci maziva (v tomto případě plastického maziva) do kontaktu přenášejícího tečné síly. Z důvodu častějšího výskytu plastických maziv a snazšího výběru reprezentativního zástupce byl pro experimenty volen tento druh maziva. Dalším důvodem volby byla možnost v praxi částečně předvídat kontaminaci tímto mazivem a to podle místa výskytu stacionárních mazacích systémů. Pro všechny experimenty bylo použito plastické mazivo Mogul EKO-OK (tab. 3-2), které běžně využívají systémy pro mazání okolků, přičemž aplikace tohoto maziva měla simulovat jednorázovou kontaminaci kontaktu právě tímto mazacím systémem.

Tab. 3-2 Specifikace použitého maziva

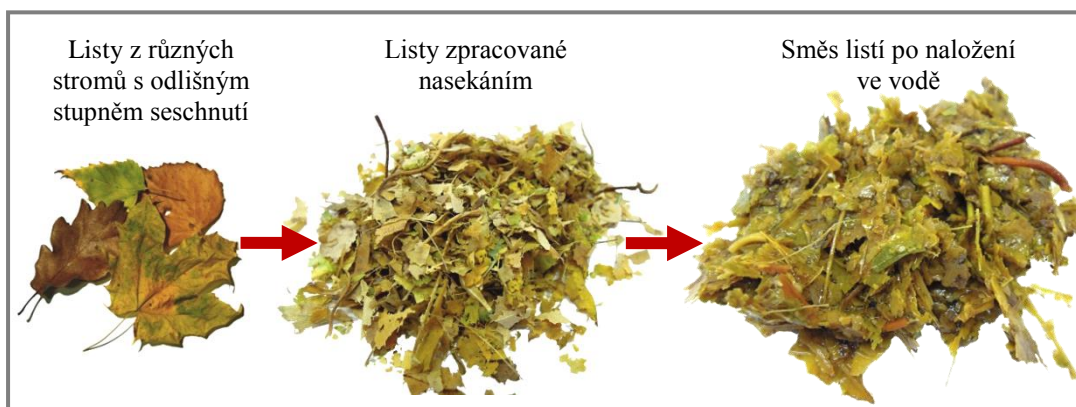
Specifikace	Norma	Jednotka	Mogul EKO-OK
Rozložitelnost	CEC L-33-A-93	%	> 90
Klasifikace NLGI	DIN 518181	-	< 000
Provozní teplota	-	°C	-15 až +50
Hustota při 20 °C	DIN 51757	g·cm ⁻³	0,905
Bod skápnutí	ISO 4625-2	°C	≥ 200
Zdánlivá viskozita při 25 °C a 10 s ⁻¹	ASTM D1824-95	Pa·s	0,97
Základový olej	-	-	Řepkový
Viskozita při 40 °C	DIN 51562	mm ² ·s ⁻¹	38,6
Index lomu při 25 °C	-	1	1,478
Zahušťovadlo	-	-	Hlinité mýdlo
Tuhá přísada	-	-	Grafit

Listí

Kontaminace mokrým listím byla volena, protože se jedná o nejhorší, „běžně“ se vyskytující kontaminant, způsobují nejvážnější problémy s nízkou adhezí. Výskyt tohoto druhu kontaminantu je spjat především s ročním obdobím a daným okolím tratě, což může být využito pro predikci výskytu v reálných podmínkách. I když může následující popis přípravy působit příliš podrobně až úsměvně, je třeba si uvědomit, že správná příprava byla klíčem pro úspěšné provedení experimentů. Práce, které se tímto kontaminantem zabývají, věnují tomuto popisu rovněž značný prostor.

Pro experimenty bylo použito spadané listí, které bylo jednorázově sesbíráno na podzim v okolí železniční tratě. Jednalo se o listy z různých listnatých stromů, které se u nás přirozeně vyskytují (především javor a dále pak např. dub, buk, jilm atd.). Byly sbírány listy „čisté“ bez hlíny a se stopkami. Při sbírání listů bylo dbáno na to, aby byly shromážděny listy s různým stupněm seschnutí, a to od úplně hnědých, „mrtvých“ listů, až po listy „čerstvě“ napadané se zelenými místy, které zcela jistě obsahují větší množství látek způsobujících vznik vrstvy z listí zodpovědné za nízkou adhezi. Použití různých druhů listů s různým stupněm seschnutí poskytlo experimentální materiál k dalšímu zpracování, který věrohodně reprezentuje tento typ kontaminantu.

U experimentů s tímto kontaminantem, bylo naprosto zásadní zajistit dříve zmíněnou dostatečnou a *rovnoměrnou* kontaminaci kontaktních povrchů. Dále bylo třeba poskytnout kontaminaci přibližně stejné úrovně pro dosažení shodných podmínek u všech experimentů. Podmínkou byl i požadavek na provedení kontaminace před spuštěním laboratorního zařízení nebo v krátké době po jeho spuštění, aby nedocházelo ke zbytečnému opotřebení disků. Na základě zmíněných skutečností byl volen způsob přípravy kontaminantu podobný tomu, který při svých experimentech použila Cannová [37] a Li [36]. Shromážděné listy byly tedy nasekány na malé kousky (velikosti cca. 5 mm) a následně naloženy v pitné vodě (1 g listí na 16 ml vody) po dobu pěti dní. V dalším kroku došlo ke scezení přebytečné vody, čímž byla získána „směs listí“ tvořená kousky listů, které měly tendenci držet při sobě. Tímto postupem došlo k vytvoření experimentálního materiálu, který bylo snadné rovnoměrně nanášet na povrch disků před jejich spuštěním. Zároveň tento materiál svým charakterem odpovídal mokrým listům vyskytujícím se na kolejích. Aby byly zajištěny stejné vlastnosti experimentálního materiálu po celou dobu testování, tak byla připravená směs listí zmrazena na základě inspirace článkem [36].



Obr. 3-9 Fáze přípravy směsi listí

Listový extrakt

Listový extrakt byl přednostně testován proto, aby bylo lépe porozuměno kontaminaci listím. Tedy procesu, který u tohoto typu kontaminace způsobuje nízkou adhezi a při kterém se na funkčním povrchu tvoří vrstva z listí. Tento kontaminant použila i Cannová [37], avšak pouze na zařízení MTM, kdy vykazoval hodnoty součinitele adheze blízké kontaminaci samotným listím. V této práci tedy dojde k ověření chování tohoto kontaminantu na dvoudiskovém zařízení a zároveň i k otestování účinnosti pískování při jeho přítomnosti v kontaktu. Druhý, neméně významný argument pro použití tohoto kontaminantu byl účel zjistit, zda nedokáže nahradit použití samotného listí pro experimenty s kontaminací listím. Aplikace tohoto extraktu je totiž daleko snadnější a zároveň poskytuje stabilnější podmínky průběhu experimentu.

Extrakt z listí byl získán z předchozího postupu použitého pro přípravu směsi listí, která je určena pro kontaminaci kontaktu samotným listím. Listovým extraktem je v této práci nazývána voda, ve které byly naloženy nasekané listy po dobu pěti dnů (1 g listí na 16 ml vody). Během této doby bylo pozorováno tmavnutí a zvětšovala se i viskozita extraktu, která byla na konci srovnatelná s viskozitou oleje. Toto chování bylo způsobeno postupným zvyšováním koncentrace látek z listů rozpustných ve vodě, mezi něž patří zejména pektin, který je používán i jako zahušňovadlo v potravinářském průmyslu [37]. Nakonec byl tedy získán extrakt, který byl vytvořen z listů přirozenou cestou, napodobující situaci v reálných podmínkách za mokrých podzimních dnů. Během těchto podmínek pak může pravděpodobně dojít při přejezdu kola přes mokré listí vlivem tlaku v kontaktu k „vylisování“ tohoto extraktu a jeho následné distribuci. Samostatně se sice tento kontaminant zcela jistě nevyskytuje, nicméně odůvodnění jeho využití pro experimenty bylo zmíněno dříve. Použitý extrakt z listí byl pro zachování stejných vlastností během celé doby testování zmrazen, stejně jako v případě směsi listí.



Obr. 3-10 Extrakt z listí

3.3.3 Pískovací materiál

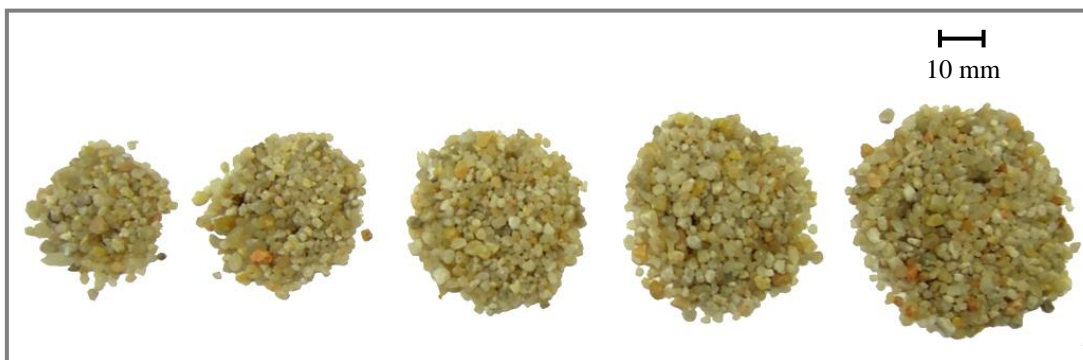
Výzkum pískování byl proveden s použitím křemičitého písku běžně užívaného k pískování reálnými pískovači. Parametry tohoto písku jsou v případě železniční dopravy dány pokynem provozovatele dráhy, jímž je SŽDC [46].

Parametry použitého křemičitého písku [46]:

- Střední velikost zrna 0,82 mm
- Rozsah zrnitosti (0,3 až 1,6) mm
- Obsah SiO_2 větší než 95 %
- Vlhkost do 8%

Experimenty by bylo ideální provést s pískem ve všech uvažovaných množstvích (2, 3, 5, 7, 10, 15) g. Všechna množství ale nemohla být vždy proměřena z důvodu extrémního opotřebení disků, které se během měření rapidně zvyšovalo. Jako referenční bylo pro jednotlivé kontaminanty bráno množství 7 g. Na základě průběžných výsledků a následného uvážení byla potom volena další testovaná množství.

Množství 7 g bylo voleno z důvodu, že při uvažované době aplikace 1,5 s, vyhovuje pokynu provozovatele dráhy SŽDC, který uvádí maximální množství písku ~17 g/s (pro rychlost < 140 km/h) [46]. Pro přibližný přepočítaného množství písku do reálného měřítka bylo využito skutečnosti, že jsou disky i tryska vyrobeny v měřítku 1:3, a tudíž je i množství písku v tomto měřítku (14 g/s). Některé publikované články často uvažují množství 7–7,5 g/m, kterému v této práci přibližně odpovídá množství 10 g při rychlosti 1 m/s (~7 g/m).



Obr. 3-11 Pískovací materiál v testovaných množstvích (3, 5, 7, 10, 15) g

3.4 Parametry experimentů

Parametry experimentů byly voleny tak, aby co nejvěrněji simulovaly reálné podmínky v železniční dopravě (volen tlak především 1 GPa). Byl testován režim nízké rychlosti a experimenty tedy odpovídají situaci při rozjezdu. Maximální velikost skluzu byla uvažována 10 %, což už může být v některých případech maximální hodnota povolená systémem detekce prokluzu [50]. Zároveň jsou volené parametry v rozsahu těch, které jsou uvažovány i v jiných výzkumných pracích. Všechna měření byla realizována při teplotě 20–23 °C a vlhkosti 40–50 %.

U některých kontaminantů bylo po jejich aplikaci na disky využito tzv. záběhu kontaminace, kdy došlo během řádově několika otáček k samovolné a rovnoměrné kontaminaci disků při velmi mírných provozních parametrech.

Parametry experimentů s kontaminanty:

- Kontaktní tlak: (0,8; 1; 1,2) GPa
- Dopředná rychlost: (0,8; 1; 1,5; 3) m/s
- Velikost skluzu: (1, 3, 5, 8, 10) %

Parametry záběhu kontaminace:

- Kontaktní tlak: 1 GPa
- Dopředná rychlost: 0,4 m/s
- Velikost skluzu: 1 %

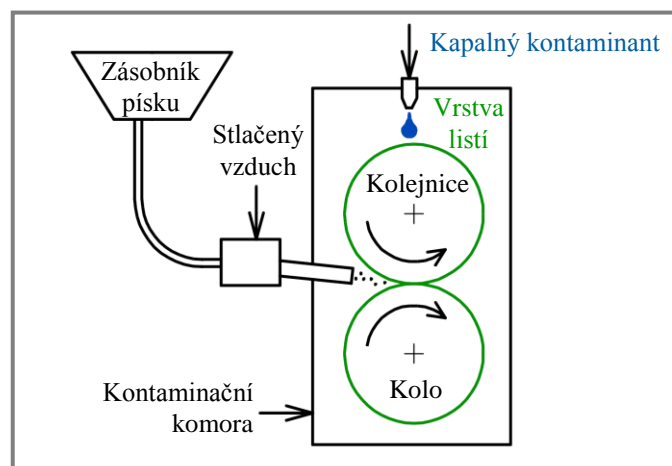
Parametry experimentů s pískováním:

- Kontaktní tlak: 1 GPa
- Dopředná rychlost: (1 a 3) m/s
- Velikost skluzu: (1, 3, 5, 10) %
- Množství písku: (2, 3, 5, 7, 10) g
- Doba pískování: 1,5 s

3.5 Průběh experimentů

Před testováním pro tuto práci nejdůležitějších kontaminantů, mezi něž patří voda a listí, byly při přechodu na jiný typ kontaminantu vyměněny oba disky. U kontaminace plastickým mazivem pak byly použity bohužel disky již do určité míry opotřebené předchozím měřením. Pokud byly disky nově vyměněny, tak bylo nutné před samotným měřením provést nejdříve jejich zaběhnutí za suchých podmínek. Účelem tohoto záběhu byla stabilizace kontaktních podmínek a dosažení stabilní referenční hodnoty adheze.

Aplikace jednotlivých kontaminantů a pískování byla provedena, tak jak je schematicky znázorněno na obr. 3-12. Po každém provedeném měření byly disky důkladně očištěny od aktuálně použitého kontaminantu a dalších nečistot. V případě kontaminace mazivem, mokrým listím a extraktem z listí byly disky ještě jemně přebroušeny a následně odmaštěny.



Obr. 3-12 Schéma aplikace kontaminantů a pískování

Kontaminace kontaktu vodou byla při měření s tímto kontaminantem provedena pomocí trysky, do které byla přiváděna voda pod stálým tlakem o teplotě okolního prostředí. Voda byla během měření kontinuálně aplikována na horní disk kolejnice ve formě kapek nebo slabého proudu v závislosti na simulovaných podmínkách. Při množství vody pohybujícího se kolem 10 ml/min se jednalo o simulaci mokřých podmínek formou kapek. Většímu množství 68 ml/min pak odpovídá simulace deštivých podmínek, kdy při množství 90 ml/min přešla forma aplikace až do velmi slabého proudu vody.

V případě kontaminace disků mazivem byl volen způsob nanášení pomocí pipety, která umožnila snadné a přesné dávkování. Mazivo bylo ve formě kapek rovnoměrně aplikováno na pomalu se otáčející a nezatížený vrchní disk v celkovém množství 90 μ l. Následně byly disky zatíženy a zaběhnuty, čímž došlo k distribuci maziva po obvodě obou disků. Tímto postupem bylo dosaženo rovnoměrné a jednorázové kontaminace.

Pokud se jednalo o experimenty s listím, tak byla kontaminace disků provedena manuální aplikací připravené směsi listí po obvodě obou disků, které byly v klidu. Směs byla nanášena rovnoměrně, ve vlhkém stavu, což umožnilo snadné ulpívání na povrchu disků (aplikováno vždy cca 25 g směsi). Po aplikaci bylo použito stejně jako v případě kontaminace mazivem krátké zaběhnutí, čímž došlo k rovnoměrné a jednorázové kontaminaci disků vzniklou vrstvou z listí. Během měření byla na vrchní disk tryskou dodávána voda v množství 10 ml/min, která bránila vysychání kontaktu a umožnila tak simulaci mokřých podmínek. Je třeba ještě zdůraznit, že pro každý experiment byly disky kontaminovány novou vrstvou z listí.

Extrakt z listí byl aplikován stejně jako ostatní kapalné kontaminanty na vrchní disk, avšak tentokrát pomocí injekční stříkačky. Extrakt byl během měření dodáván kontinuálně formou kapek v množství cca 20 ml/min.

U experimentů s pískováním byl do kontaktu pískovací materiál přiváděn hadicí, která byla na konci opatřena tryskou. Tryska byla nastavena tak, aby aplikace písku co nejvěrněji simulovala reálné podmínky, přičemž bylo dbáno na to, aby většina aplikovaného písku vstupovala do kontaktu. Stejně tak jako v reálných podmínkách bylo k dopravě písku využito stlačeného vzduchu. Všechna měření byla

provedena s jednotnou délkou aplikace písku 1,5 s. K aplikaci pískovacího materiálu tedy docházelo po celém obvodu disků i při nejmenší testované rychlosti 1 m/s. Doba aplikace byla zároveň dostatečná pro následné vyhodnocení nárůstu adheze pískováním. Experimenty byly svým způsobem nejbližší simulaci přejezdu několika hnacích náprav přes úsek, kde došlo k aplikaci určitého množství písku. Při měření bylo vždy před pískováním nejprve vyčkáno na stabilizaci adheze v kontaminovaném kontaktu.

4 VÝSLEDKY

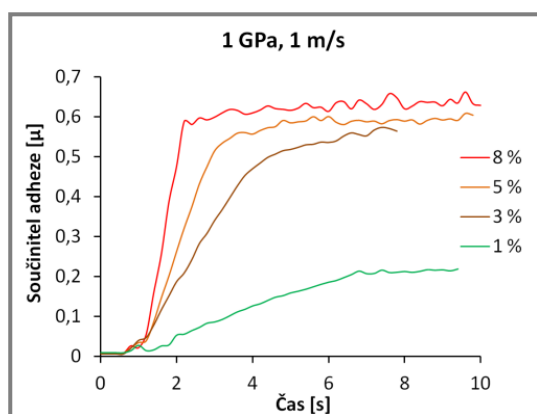
Získané výsledky byly rozděleny do níže uvedených podkapitol podle studovaných provozních podmínek. Jedná se především o suché podmínky, podmínky za přítomnosti kontaminantů a nakonec pískování kontaminovaného kontaktu. Výsledky se snaží zejména objasnit vliv kontaminantů a množství písku na adhezi. Je třeba dodat, že v rámci řešení práce bylo nutné provést mnoho experimentů a že zde prezentované výsledky jsou pouze ty nejdůležitější.

Všechny uvedené grafy mají pro lepší přehlednost uvedeny v horní části provozní parametry v tomto pořadí: kontaktní tlak (GPa), dopředná rychlost (m/s), velikost skluzu v kontaktu (%), množství vody (ml/min), množství písku (g).

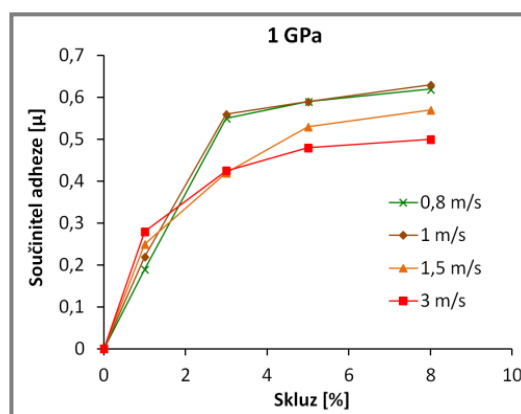
4.1 Suché podmínky

Pro porovnání poklesu adheze způsobeného různými kontaminanty byly nejprve provedeny experimenty při suchých podmínkách. Záznam průběhu adheze při různých velikostech skluzu je možné vidět na obr. 4-1, z kterého je vidět pozitivní vliv zvětšujícího se skluzu na adhezi. Jak se dalo předpokládat, tak nejmenší adhezi poskytuje skluz 1 % při kterém je zároveň průběh adheze nejhladší a u něhož trvalo dosažení stabilní hodnoty nejdéle.

Na obr. 4-2 je možné vidět sestrojené adhezní charakteristiky pro různé uvažované rychlosti při kontaktním tlaku 1 GPa. Z jejich průběhu je patrné, že nebylo dosaženo bodu saturace a že se pozitivní tření vyskytuje v celém uvažovaném rozsahu velikosti skluzu. Zároveň je však možné predikovat, že při dalším zvětšení skluzu nad 8 % by již nedocházelo k výraznému navýšení adheze. Velikost adheze se s rostoucím skluzem zvětšuje, přičemž rapidní nárůst je do skluzu 3 % od kterého se v závislosti na parametrech adheze pohybuje v rozsahu 0,42–0,63.



Obr. 4-1 Průběh adheze při různé velikosti skluzu

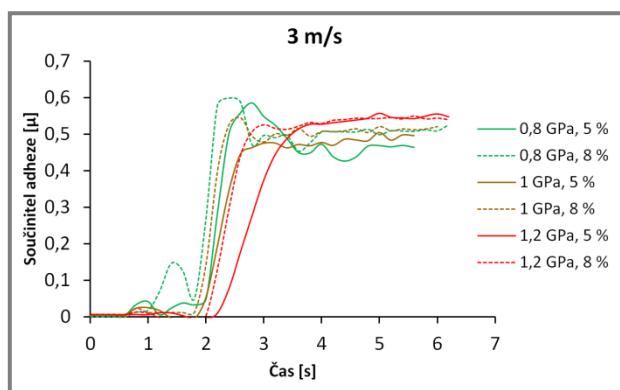


Obr. 4-2 Adhezní charakteristiky a jejich závislost na rychlosti

Trakční křivky na obr. 4-2 ukazují, že při malé velikosti skluzu dochází se zvětšující se rychlostí k nárůstu adheze. To se však mění pokud se velikost skluzu blíží k hodnotě 3 %. Při této a vyšší hodnotě skluzu dochází s rostoucí rychlostí naopak k poklesu adheze. Tento pokles je významný především u skluzu od 3 % při rychlosti

3 m/s. Dále je vidět náhlá a výrazná změna velikosti adheze při malé změně rychlosti z 1 na 1,5 m/s, ke které dochází opět při skluzu 3 %. Na základě provedených měření lze dále říci, že za vyšší rychlosti bylo rychleji dosaženo stabilní hodnoty adheze.

Byl prezentován především vliv rychlosti, protože má na adhezi daleko větší dopad než měnící se kontaktní tlak, který byl mimo jiné také zkoumán, přičemž výsledky potvrdily toto tvrzení. Na obr. 4-3 je však přesto možné vidět zajímavé porovnání vlivu velikosti tlaku na adhezi za rychlosti 3 m/s, při které byly zaznamenány největší rozdíly v průběhu adheze. Je možné pozorovat, že za tlaku 0,8 GPa dochází na začátku k výraznému chvilkovému navýšení adheze, jehož velikost se s klesajícím skluzem a rostoucím zatížením zmenšuje, a to až do jeho úplného vymizení. Zároveň je při vyšším tlaku průběh adheze daleko hladší. Počáteční nárůst adheze je pravděpodobně spojen s opotřebením disků a změnou kontaktních podmínek.



Obr. 4-3 Průběh adheze při různém tlaku a skluzu

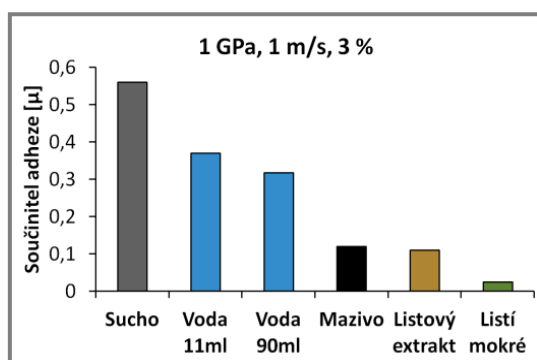
Závěr

Experimenty ukázaly, že se za sucha velikost adheze v kontaktu pohybuje v rozmezí 0,19–0,63, přičemž k největšímu nárůstu dochází při skluzu do 3 %, od kterého je rozptyl dosažených hodnot daleko menší, v rozmezí 0,42–0,63. Vliv rychlosti je takový, že se adheze při malém skluzu 1 % zvětšuje s rychlostí. Tato závislost se s rostoucím skluzem obrací a od skluzu 3 % adheze s rostoucí rychlostí naopak klesá. Trakční křivky vykazují pozitivní tření v celém rozsahu, což znamená, že v kontaktu byla přítomna stále dostatečně velká oblast lpění. Tím pádem nedocházelo k úplnému prokluzu, který by způsobil pokles adheze. Tyto výsledky jsou dány kontaktními podmínkami a materiálovými vlastnostmi kontaktních těles, přičemž vliv mělo bezesporu i velké opotřebením, ke kterému během měření docházelo a díky němuž se postupně zvětšovala velikost kontaktní oblasti, která potom mohla přenášet větší síly.

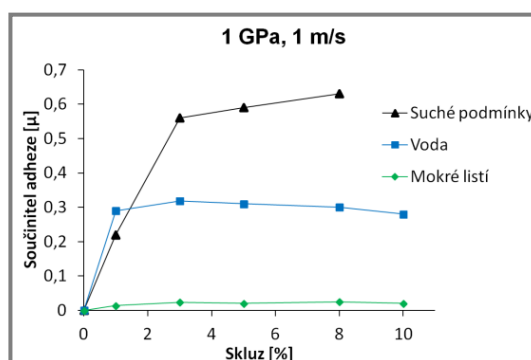
4.2 Podmínky při kontaminaci kontaktu

Na obr. 4-4 je možné vidět základní porovnání všech uvažovaných kontaminantů a jejich vlivu na velikost adheze za běžných provozních parametrů. Oproti suchým podmínkám je patrný poměrně značný pokles adheze už při kontaminaci vodou, který se navíc s jejím množstvím zvyšuje a může tak dosáhnout až 43 %. Za povšimnutí stojí zejména prakticky stejná adheze u plastického maziva a extraktu z listí. U mokrého listí je pak adheze extrémně nízká s poklesem o 96 % oproti suchým podmínkám.

Obr. 4-5 ukazuje naměřené adhezní charakteristiky při kontaminaci vodou a mokrým listím, přičemž je zároveň porovnává se situací za suchých podmínek. V případě vody je vidět neutrální až mírně negativní tření. U mokrého listí je patrná téměř neměnná velikost adheze v celém rozsahu velikostí skluzu.



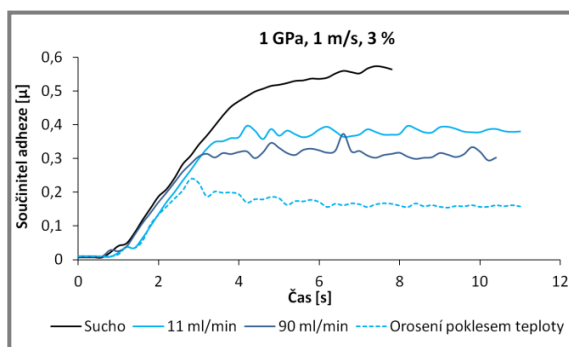
Obr. 4-4 Vliv kontaminantů na adhezi



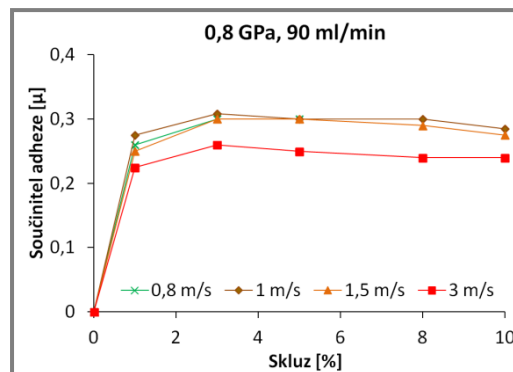
Obr. 4-5 Adhezní charakteristiky za různých podmínek

4.2.1 Voda

U experimentů s vodou měl průběh adheze hladší charakter, přičemž při skluzu 1 % byl nárůst adheze na stabilní hodnoty velmi pozvolný (za nízké rychlosti až 10 s). Na obr. 4-6 jsou vidět průběhy adheze porovnávající vliv různého množství vody, ze kterých vyplývá, že při kontinuální aplikaci vody do kontaktu dochází s rostoucím množstvím k většímu poklesu adheze. Další experimenty byly proto provedeny s větším množstvím vody, přičemž bylo dosaženo adheze v rozmezí hodnot 0,22–0,32, které odpovídají dostatečné adhezi ($\mu > 0,1$) [12].



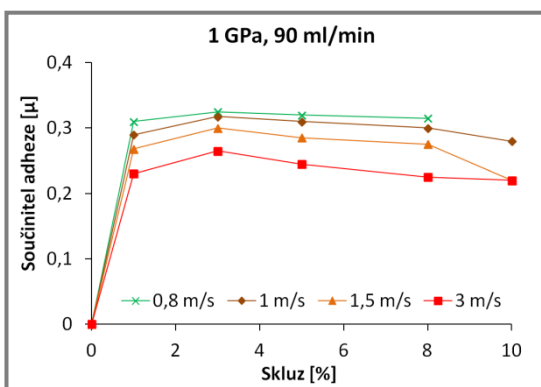
Obr. 4-6 Průběh adheze při různém množství vody



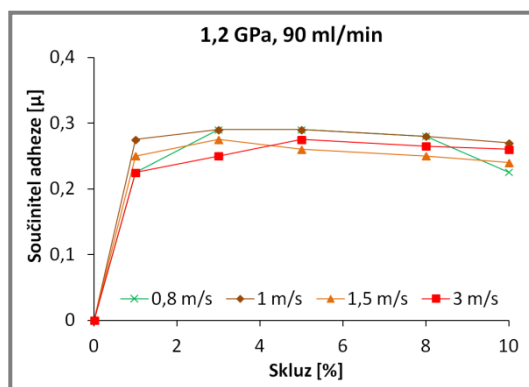
Obr. 4-7 Adhezní charakteristiky a jejich závislost na rychlosti při tlaku 0,8 GPa

Obr. 4-7, 4-8, 4-9 zobrazují vliv měnící se dopředné rychlosti na naměřené trakční křivky při různé velikosti kontaktního tlaku. Především obr. 4-8, který zobrazuje křivky pro běžný tlak 1 GPa, ukazuje značný pokles adheze s rostoucí rychlostí. Pokles je dosti znatelný především při rychlosti 3 m/s, u které je zároveň tento pokles patrný i na obr. 4-7 za tlaku 0,8 GPa, kde však vliv menších rychlostí nebyl tak výrazný. Obr. 4-9 naměřený při vysokém tlaku pak i přes jisté kolísání hodnot potvrzuje stejný trend klesající adheze s rostoucí rychlostí. Větší rychlost obecně, stejně jako v případě suchých podmínek, přispívá k rychlejšímu nárůstu adheze a stabilnějšímu průběhu.

Na obr. 4-7, 4-8, 4-9 je možné si mimo jiné povšimnout, že i když adheze s měnícím se tlakem při různých rychlostech kolísá, tak je zde jasná tendence poklesu s rostoucí velikostí tlaku, což je patrné především u nízké rychlosti 0,8 m/s. Na všech prezentovaných trakčních křivkách je patrný bod saturace při velikosti skluzu kolem 1–2 %, přičemž křivky od tohoto bodu vykazují neutrální, až mírně negativní tření. Negativní tření se začíná objevovat za tlaku 1 GPa především při vyšších rychlostech (obr. 4-8).



Obr. 4-8 Adhezní charakteristiky a jejich závislost na rychlosti při tlaku 1 GPa



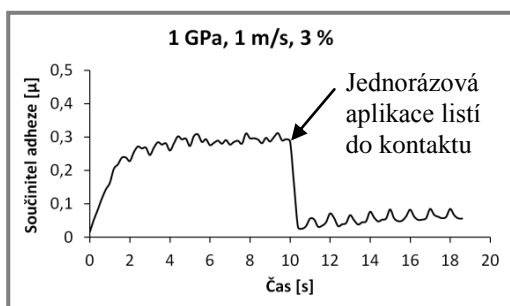
Obr. 4-9 Adhezní charakteristiky a jejich závislost na rychlosti při tlaku 1,2 GPa

Závěr

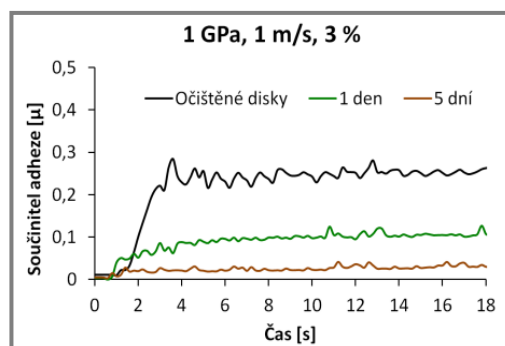
Voda jako kontaminant v praxi zpravidla nezpůsobuje vážnější pokles adheze, což potvrzují i hodnoty adheze 0,22–0,32, získané experimenty. Bylo zjištěno, že s rostoucím množstvím vody v kontaktu klesá velikost adheze. U naměřených trakčních křivek byl zaznamenán bod saturace při skluzu kolem 1–2 %, přičemž při dalším navýšení skluzu docházelo k mírnému poklesu adheze pouze za vyšší rychlosti při tlaku 1 GPa. Významný závěr je, že s rostoucí rychlostí dochází k poklesu adheze, který se v menší míře objevuje i při zvětšování kontaktního tlaku.

4.2.2 Mokr  listy

Je dabr  známo, že mokr  listy v kontaktu kolo/kolejnice je nejhor m způsobem kontaminace. To jasn  dokazuje i proveden  experiment s velmi mal m množstvím listy, které bylo do kontaktu aplikováno za pomoci hadice se stla en m vzduchem. Na obr. 4-10 je zobrazen průběh tohoto experimentu, z něhož je patrn  okam it  a extrémně pokles adheze. Po aplikaci listy je vidět zna n  periodick  kolis n  adheze, kter  bylo způsobeno ulp n m listy na obvod  disků pouze v jednom m st . Nicméně i při lok ln  aplikaci takto malého množství došlo k okamžitému roznesení kontaminantu po obvod  disků, kter  způsobilo sice kolisaj c , ale trvale nízkou adhezi. Právě z důvodu rovnom rn  kontaminace byla u dal s ch experimentů volena aplikace manuálním nanesen m směsi listy po obvod  disků (obr. 4-12). Obr. 4-11 porovnává vliv různé doby nalo en  listy ve vodě a je z něj patrn , že del s  dobou nalo en  vznikne směs listy, kter  způsobuje v t s  míru kontaminace.



Obr. 4-10 Průběh adheze při aplikaci listy



Obr. 4-11 Vliv směsi listy na průběh adheze

Na obr. 4-13 je vidět typick  situace po experimentu, kdy bylo mo n  na povrchu disků pozorovat místy se tvořící černou vrstvu z listy, kter  je u tohoto kontaminantu zodpov dn  za nízkou adhezi. Obr. 4-11 ukazuje, že i po o i ten  disků dosahovala adheze poměrně n zk  hodnoty pohybující se b e n  kolem 0,2. Z toho důvodu muselo být pro obnoven  adheze vždy p stoupeno k důkladnému přebroušení povrchu disků.

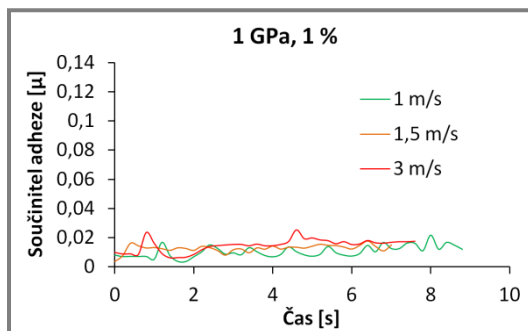


Obr. 4-12 Směs listy aplikovan  na disk kolejnice

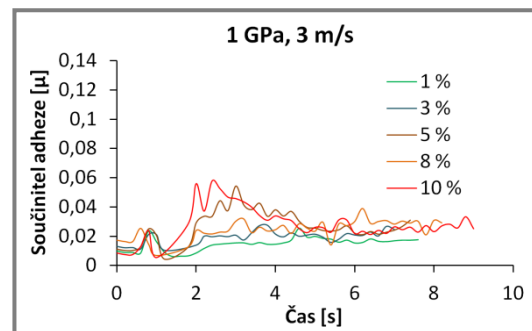


Obr. 4-13 Disk kolejničky po experimentu spolu s vytvořenou vrstvou z listí

Proměřením tohoto kontaminantu za různých provozních parametrů bylo zjištěno, že se velikost adheze pohybuje rozsahu 0,014–0,026, což jsou hodnoty odpovídající velmi nízké adhezi ($\mu < 0,05$) [13]. Na obr. 4-14 zobrazujícím průběh adheze je očividné, že v případě malého skluzu 1 %, který poskytoval nejmenší adhezi, byla adheze velice stabilní při všech rychlostech. Obr. 4-15 potom ukazuje značnou počáteční nestabilitu adheze při vyšších skluzech. Během této doby docházelo pravděpodobně ke stabilizaci kontaktních podmínek, které vedly k následnému ustálení adheze, přičemž její další průběh byl klidný zejména při vyšších rychlostech.

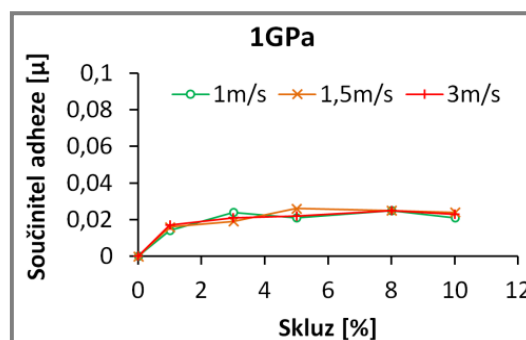


Obr. 4-14 Průběh adheze za nízkého skluzu 1 %



Obr. 4-15 Průběh adheze při různých skluzech

Obr. 4-16 prezentuje naměřené trakční křivky při rychlosti 1–3 m/s. Není patrný žádný vliv měnící se rychlosti na tvar či průběh těchto křivek, přičemž je viditelné, že se vzájemně téměř překrývají. Za všech uvažovaných rychlostí dochází s rostoucím skluzem k pozvolnému růstu adheze, a to až do hodnoty 4 %, od které se již hodnota adheze téměř nemění.



Obr. 4-16 Adhezní charakteristiky a jejich závislost na rychlosti

Závěr

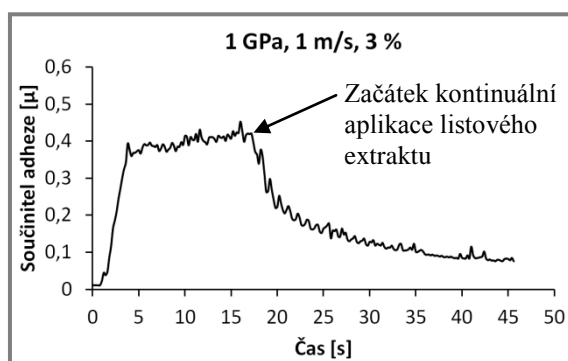
Experimenty potvrdily situaci v reálných podmínkách, kdy je listí nejhorším způsobem kontaminace. Během měření bylo dosaženo velmi nízké adheze v rozmezí hodnot 0,014–0,026. Zároveň byla pozorována značná agresivita tohoto kontaminantu, kdy i při jeho malém množství docházelo k dalšímu šíření kontaminace a tvorbě kluzké vrstvy z listí. I po odstranění této viditelné vrstvy byl na povrchu disků přítomen tenký mazací film poskytující adhezi kolem hodnoty 0,2, která může být již kritická, zvláště při působení dalších vnějších vlivů. Nebyl prokázán žádný vliv rychlosti na velikost adheze, přičemž pro zajištění jejího nejvyšší hodnoty je vhodné zajistit velký skluz 4 % a více.

4.2.3 Listový extrakt

4.2.3

Záznam průběhu adheze s náhlým počátkem kontinuální aplikace listového extraktu je uveden na obr. 4-17. Z průběhu je patrný významný pokles adheze až na hodnotu 0,09, která byla u tohoto kontaminantu zároveň nejnižší naměřená. Pokles je velmi pozvolný a pro dosažení nejnižší hodnoty bylo tedy potřeba relativně dlouhé doby aplikace extraktu. Z toho lze usuzovat, že i když je extrakt viskózní, podobný oleji, tak jako takový nemá příliš dobré mazací vlastnosti. Pro dosažení nízké adheze bylo třeba především dlouhého působení v kontaktu, což vede k předpokladu chemické reakce látek v extraktu s ocelovým povrchem, díky které se teprve potom vytvoří tenký mazací film, který pozorovala ve své práci Cannová [37].

Tento kontaminant sice nebyl důkladně proměřován při různých provozních parametrech, ale na základě dalších výsledků při pískování je možné konstatovat, že poskytuje velice stabilní hodnoty nízké adheze kolem hodnoty 0,1, která je již kritická pro dostatečnou trakci [12]. I po ukončení aplikace extraktu zůstávala v kontaktu nízká adheze. Aby došlo k odstranění mazacího filmu a obnovení adheze v kontaktu, tak muselo být přistoupeno k jemnému přebroušení disků.



Obr. 4-17 Průběh adheze při aplikaci extraktu z listí

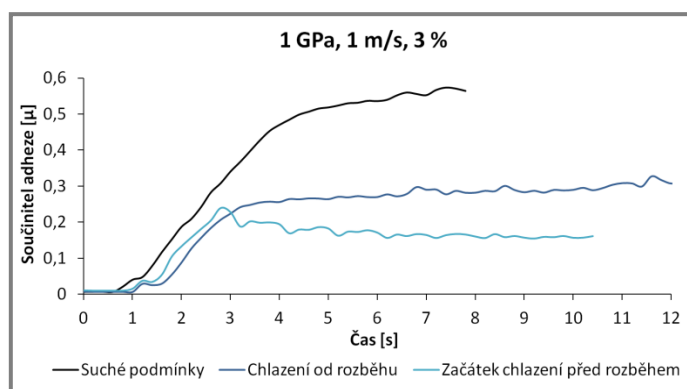
Závěr

Při všech testovaných rychlostech (1 a 3 m/s) a skluzech (3 a 5 %) tento kontaminant poskytoval velice stabilní adhezi kolem hodnoty 0,1. Listí však stále představuje daleko agresivnější kontaminant způsobující nejen nízkou ($0,1 > \mu > 0,05$), ale velmi nízkou adhezi ($\mu < 0,05$) [13].

4.3 Vliv teploty

Mezi významné vnější vlivy, které na kontakt mimo kontaminanty působí, patří i teplota. Simulace vlivu teploty je však na pro tuto práci zvoleném zařízení komplikovaná. Navíc jsou předmětem zájmu kontaminanty. I přesto byly ale provedeny doplňkové experimenty, které zkoumaly vliv nízké teploty. Pro ochlazení kontaktu bylo při měřeních použito mrazícího spreje, který je běžně k dostání a umožňuje lokální ochlazení až na teoretickou hodnotu $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tento sprej byl během celého experimentu kontinuálně dodáván aplikátorem přímo do kontaktu. Tímto způsobem bylo v kontaktu dosaženo nízké teploty pohybující se kolem bodu mrazu.

Na obr. 4-18 je možné vidět výsledky experimentů, z kterých je patrné, že vlivem ochlazení došlo k poklesu adheze, která se pohybovala v rozmezí hodnot 0,16–0,29 v závislosti na intenzitě chlazení. Takto velký pokles však napovídá působení nějakého dalšího vlivu. Následnými testy bylo potvrzeno, že v důsledku lokálního ochlazení pod teplotu rosného bodu dochází na povrchu disků ke kondenzaci vodních par ze vzduchu. Ve své podstatě tedy tyto experimenty odpovídaly spíše kontaminaci kontaktu vodou a simulovaly reálné podmínky při orosení kolejí.



Obr. 4-18 Vliv chlazení na průběh adheze

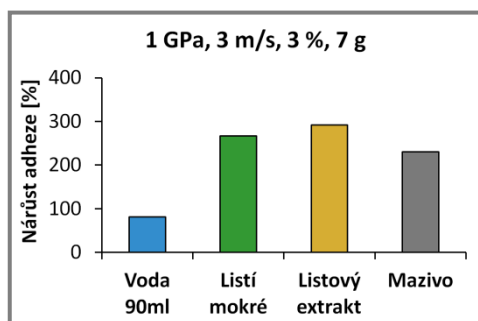
Závěr

Namísto vlivu teploty byl spíše zkoumán vliv malého množství vody, a to formou experimentů s orosenými povrchy kontaktních těles. Na druhou stranu je výskyt rosy spojen právě s poklesem teploty. Závěrem lze říci, že při velmi malém množství vody, jejíž výskyt může být způsoben poklesem teploty, dochází k velkému poklesu adheze, který je větší než při běžných mokrých podmínkách (děšť).

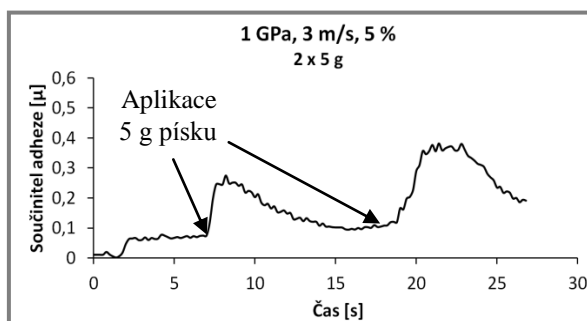
4.4 Pískování

Aplikací pískování do kontaminovaného kontaktu došlo vždy k chvilkovému navýšení adheze. Obr. 4-19 ukazuje porovnání procentuální velikosti tohoto navýšení oproti původní hodnotě. Pro porovnání byly voleny reprezentativní provozní parametry a referenční množství písku 7 g. Je patrné poměrně malé navýšení u vody, zatímco u ostatních kontaminantů se navýšení blížilo až k hodnotě 300 %.

Obr. 4-20 ukazuje průběh adheze v případě opětovné aplikace písku do kontaktu. Bylo testováno malé množství písku 5 g za nejhorsích podmínek, které jsou při kontaminaci kontaktu listím. Po opětovné aplikaci je očividný další velice výrazný nárůst adheze. Na základě tohoto průběhu adheze lze říci, že opětovná či delší aplikace písku by u následně provedených experimentů způsobila další nárůst adheze. V této práci prezentované hodnoty nárůstu jsou tedy do jisté míry pouze počáteční a další aplikací písku by bylo možné dosáhnout většího obnovení adheze.



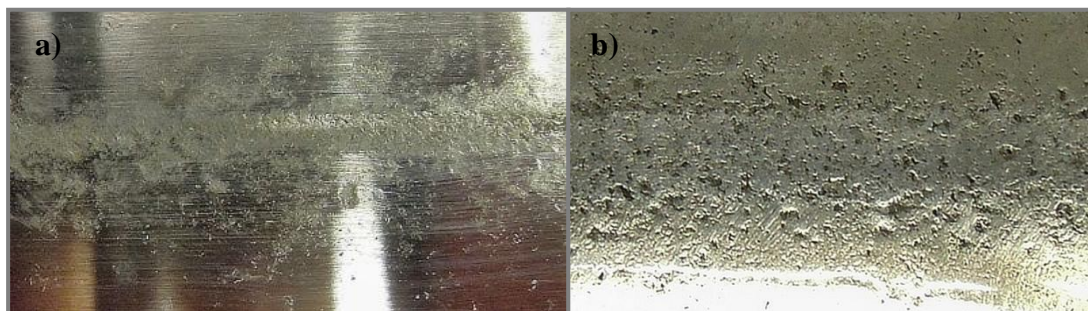
Obr. 4-19 Procentuální nárůst adheze pro různé kontaminanty



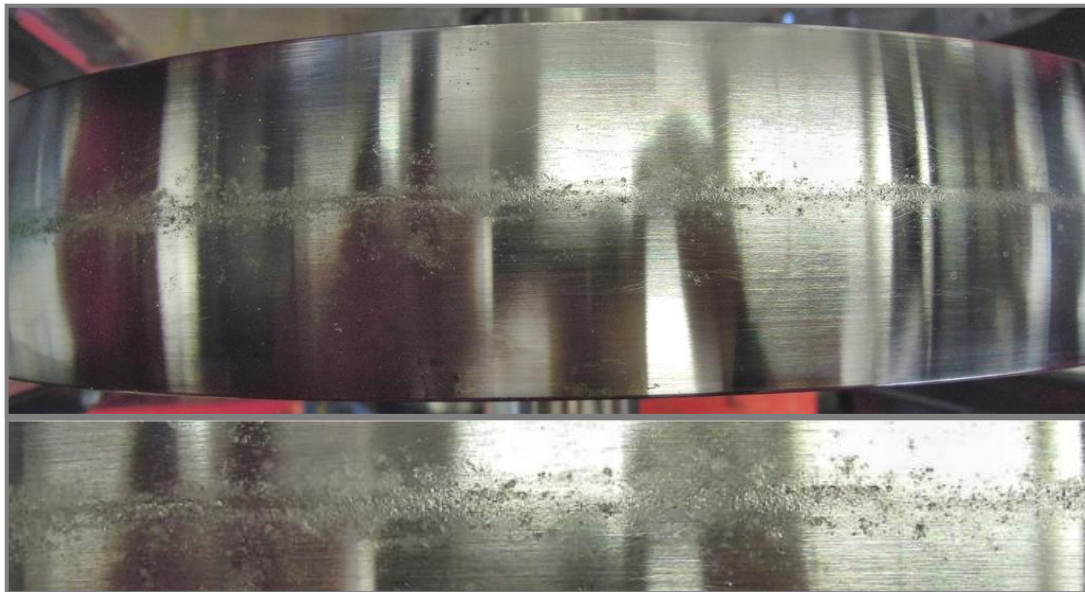
Obr. 4-20 Průběh adheze s opětovnou aplikací písku při kontaminaci mokrým listím

Při experimentech za rychlosti 3 m/s došlo u všech kontaminantů po aplikaci pískování k výrazně většímu navýšení adheze vlivem vyšší dopředné, a tedy i skluzové rychlosti. Zrna písku do kontaktu vstupovala lépe a především rovnoměrněji, což přispívalo i k lepší distribuci aplikovaného písku po obvodě disků.

Povrch disků již po několika experimentech vykazoval značnou míru opotřebení, což je viditelné i na přiloženém obr. 4-21 a 4-22. Byly patrné především vruby ve formě „důlků“, které vznikaly během drcení písku v kontaktu vlivem vtisku jednotlivých zrn či částic písku do povrchu materiálu. Obr. 4-21 ukazuje, že aplikovaný písek zjevně aktivně působil na šírce disku, která je větší než šířka kontaktu. Třecí síly tedy byly přenášeny oblastí větší, než jaká odpovídá velikost kontaktu. Mezi diskem kola a kolejnice nebyl okem patrný výrazný rozdíl v charakteru opotřebení.



Obr. 4-21 Detail povrchu poškozeného pískováním a) po 5ti experimentech; b) před výměnou disků

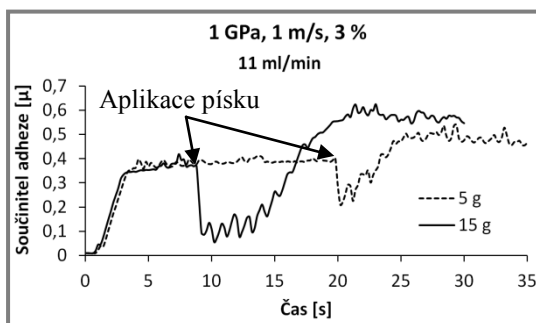


Obr. 4-22 Povrch disku kolejnice po 5ti experimentech s pískováním

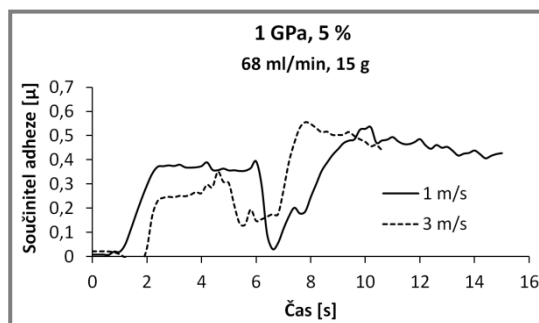
4.4.1 Mokré podmínky + pískování

Jako první byl pro pískování vybrán mokrá kontakt, který byl zároveň nejvíce proměřen z důvodu, že se voda v reálných podmínkách vyskytuje nejčastěji. Při pískování tento kontaminant vykazoval při větší rychlosti 3 m/s a menším množství písku jak 10 g nejhladší průběh adheze ze všech testovaných kontaminantů.

Pro pískování mokrého kontaktu bylo typické, že při aplikaci písku do kontaktu docházelo nejprve k počátečnímu poklesu adheze a teprve poté následoval požadovaný nárůst oproti původní hodnotě. Obr. 4-23 tento jev ukazuje na průběhu adheze při malém množství vody (11 ml/min). Zároveň je na něm vidět porovnání vlivu různého množství aplikovaného písku, z kterého je patrný větší a delší pokles při větším množství písku. Na obr. 4-24 je zobrazen počáteční pokles při podobných provozních parametrech, avšak v tomto případě za použití většího množství vody (68 ml/min). Je patrné, že v tomto případě je pokles při stejné rychlosti 1 m/s daleko kratší. Obr. 4-24 dále ukazuje dosažení menšího poklesu delšího trvání, pokud je rychlost zvýšena. Z výše uvedeného vyplývá, že počáteční pokles adheze podporuje písek ve větším a voda v menším množství. To následně vede k myšlence možného chvilkového vysušení kontaktu při počátečním drcení zrn.

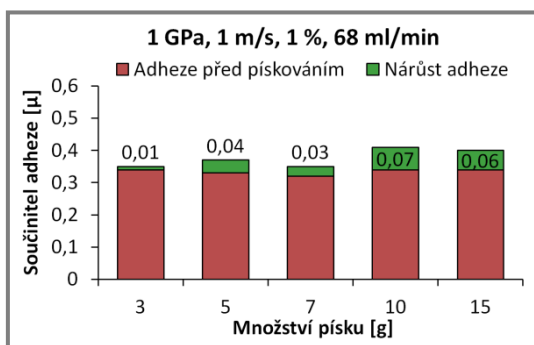


Obr. 4-23 Průběh adheze a vliv množství písku

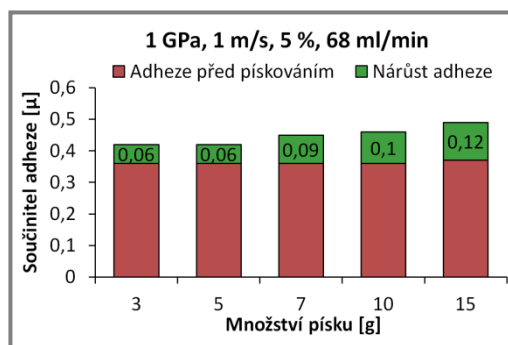


Obr. 4-24 Průběh adheze s vlivem rychlosti

Obr. 4-25, 4-26, 4-27 porovnávají velikost nárůstu adheze po aplikaci různého množství písku do kontaktu kontaminovaného větším množstvím vody (68 ml/min). Každý z nich ukazuje výsledky při rychlosti 1 m/s a odlišné velikosti skluzu v kontaktu. Nárůsty při nejmenším skluzu, zobrazené na obr. 4-25, dosahují velice nízkých hodnot a je na nich patrný pouze jistý trend růstu se zvětšujícím se množstvím písku. Obr. 4-26 za většího skluzu 5 % ukazuje zvětšující se nárůst adheze od množství 7 g a více.

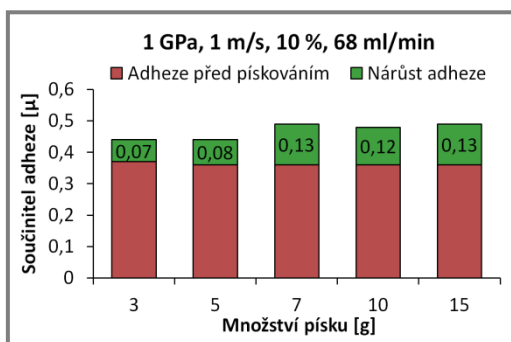


Obr. 4-25 Změna adheze (1 m/s, 1 %)

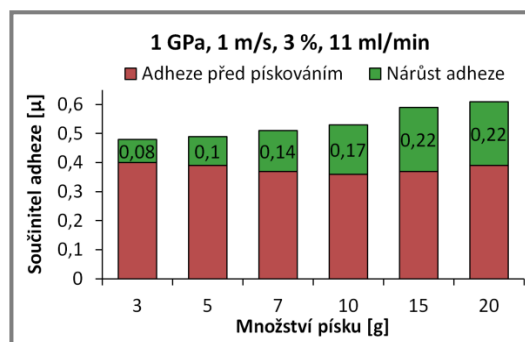


Obr. 4-26 Změna adheze (1 m/s, 5 %)

Náhly nárůst u množství 7 g je viditelný i na obr. 4-27 s výsledky dosaženými za velkého skluzu 10 %. V tomto případě však s dalším nárůstem množství nedochází k navýšení adheze, ale naopak se objevuje stagnace.



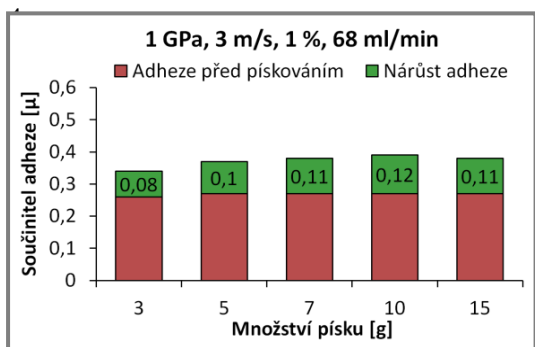
Obr. 4-27 Změna adheze (1 m/s, 10 %)



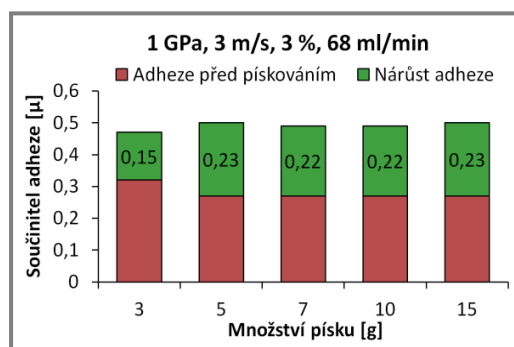
Obr. 4-28 Změna adheze u menšího množství vody 11 ml/min (1 m/s, 3 %)

Nabízí se zajímavá možnost porovnání předešlých výsledků s výsledky získanými z experimentů s menším množstvím vody (11 ml/min). Data z těchto měření jsou na obr. 4-28 a ukazují růst adheze s množstvím písku již od jeho malého množství. Tento růst se zastavuje až na množství 15 g, od kterého již k dalšímu navýšení nedochází. To je spojeno pravděpodobně s faktem, že při tomto množství byla překročena velikost adheze za suchých podmínek před aplikací vody ($\mu = 0,56$). Je třeba ještě říci, že největší nárůst je právě při množství 15 g, přičemž od toho množství zároveň docházelo k výraznému zvětšení počátečního poklesu adheze. Porovnáním těchto výsledků s předchozími zjistíme, že při menším množství vody je pískování daleko účinnější a dochází k většímu, až přibližně dvojnásobnému navýšení adheze.

Obr. 4-29 až 4-32 ukazují opět nárůst adheze, avšak tentokrát při zvýšení rychlosti na 3 m/s. Je možné pozorovat značné navýšení účinnosti pískování již samotným zvýšením rychlosti. Za těchto podmínek docházelo k obnově adheze na hodnoty před aplikací vody, přičemž byla tato hodnota i mírně překročena. Při skluzu 1 a 3 % je na obr. 4-29 a 4-30 patrné, že k navýšení adheze dochází pouze při množství 5 g. S dalším navýšením množství již nedochází žádnému výraznému nárůstu adheze, přičemž tato hodnota pouze kolísá.

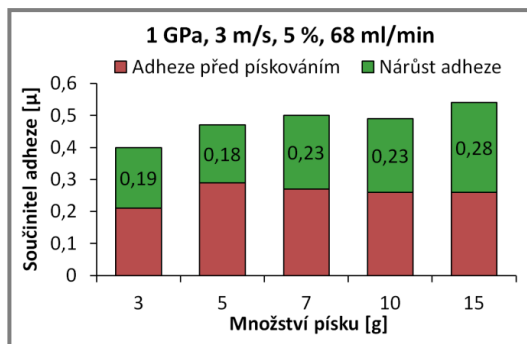


Obr. 4-29 Změna adheze (3 m/s, 1 %)

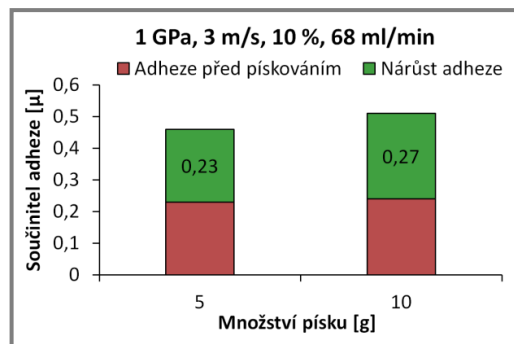


Obr. 4-30 Změna adheze (3 m/s, 3 %)

Obr. 4-31 ukazuje, že oproti menším skluzům dochází při skluzu 5 % k výraznějšímu navýšení adheze až u množství 7 g, přičemž je možné pozorovat i další navýšení u velkého množství 15 g. Toto další navýšení však není adekvátní, protože pro jeho dosažení je nutné použít více jak dvojnásobné množství písku. Obr. 4-32 se snaží nastínit situaci při velkém skluzu, kde je vidět další možný nárůst adheze.



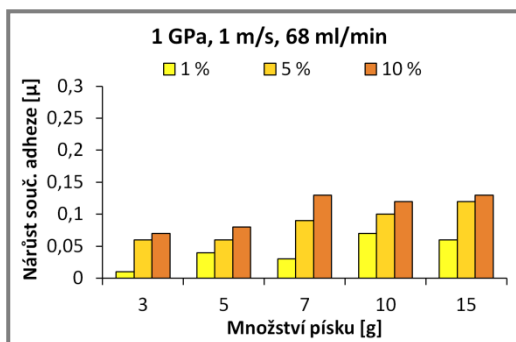
Obr. 4-31 Změna adheze (3 m/s, 5 %)



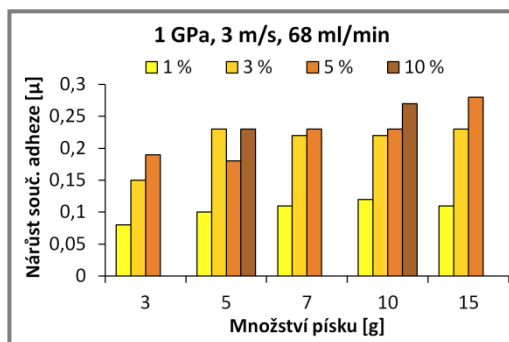
Obr. 4-32 Změna adheze (3 m/s, 10 %)

Na obr. 4-33 a 4-34 je vidět celkový přehled ve formě zobrazení pouze nárůstu adheze po aplikaci různého množství písku při odlišných skluzech. Obr. 4-33 pro rychlost 1 m/s jasně ukazuje výhodnost použití 7 g písku, která je dána tím, že s větším množstvím nedochází k dalšímu výraznému navýšení hodnoty nárůstu. Velmi malého nárůstu adheze bylo dosaženo při malém skluzu 1 %, a to zejména u nejmenšího množství 3 g. Pokud jde o výsledky za rychlosti 3 m/s, které jsou na obr. 4-34, tak se jeví jako výhodnější použít menší množství 5 g, od kterého již nedochází adekvátnímu nárůstu adheze. Z hlediska velikosti skluzu došlo k velkému nárůstu efektivnosti pískování při jeho zvětšení z 1 na 3 %,

přičemž další zvětšení nepřineslo výrazné zlepšení. Zvýšení rychlosti přineslo větší navýšení adheze u malého množství, které bylo přibližně 3násobné.



Obr. 4-33 Nárůst adheze (1 m/s)



Obr. 4-34 Nárůst adheze (3 m/s)

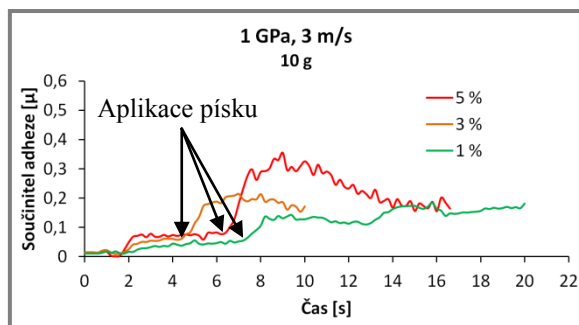
Závěr

Na základě provedených experimentů bylo zjištěno, že u mokrého kontaktu dochází při aplikaci pískování nejprve k počátečnímu poklesu adheze, který je teprve potom doprovázen následným nárůstem oproti hodnotě původní. Tento počáteční pokles se s rostoucím množstvím písku zvětšuje a naopak zmenšuje s rostoucím množstvím vody. Zároveň byl zaznamenán značně negativní vliv většího množství vody na efektivnost pískování (v tomto případě přibližně poloviční nárůst adheze). Při experimentech za menšího množství vody stejně jako při vyšší rychlosti u většího množství vody, bylo dosaženo adheze odpovídající suchým podmínkám, která mnohdy dosahovala i vyšších hodnot. Bylo zjištěno, že existuje množství písku, od kterého nedochází s rostoucím množstvím k adekvátnímu navýšení adheze (7 g pro 1 m/s, 5 g pro 3 m/s). V případě větší rychlosti to mohlo být především u vyššího množství spojeno s dosažením adheze, která je vyšší než za suchých podmínek, čemuž odpovídá i pouze 2násobné navýšení vlivem rychlosti od 10 g a více. Při trojnásobném zvýšení rychlosti došlo v průměru i ke stejně velkému navýšení nárůstu adheze. Zvýšení rychlosti se zároveň projevilo i ve zmenšení optimálního množství písku (ze 7 na 5 g). Při malé velikosti skluzu (1 %) není zpravidla ani zdaleka využít potenciál jakéhokoliv aplikovaného množství písku. Dále se ukázalo, že i při relativně malé aktuální velikosti skluzu v kontaktu, pohybující se kolem 3–5 %, dojde k výraznému nárůstu adheze, a tedy i k efektivnímu využití pískování. Další zvýšení skluzu nepřináší výrazný nárůst adheze.

4.4.2 Mokrý listí + pískování

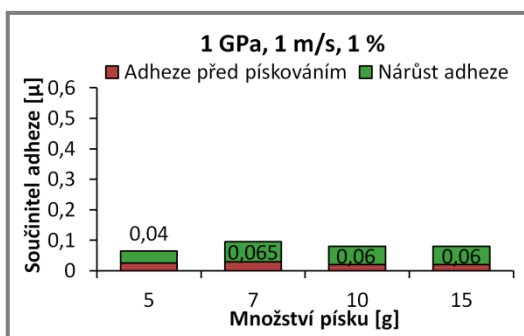
4.4.2

Pískování listím kontaminovaného kontaktu bylo málo účinné především, protože listí bránilo distribuci písku po obvodě disků. Značné zlepšení nastalo až za zvýšené rychlosti. Právě případ za rychlosti 3 m/s je zobrazen na obr. 4-35, který ukazuje průběh adheze za různé velikosti skluzu. Je jasně patrné, že s rostoucím skluzem docházelo především k rychlejšímu, ale i většímu nárůstu adheze.

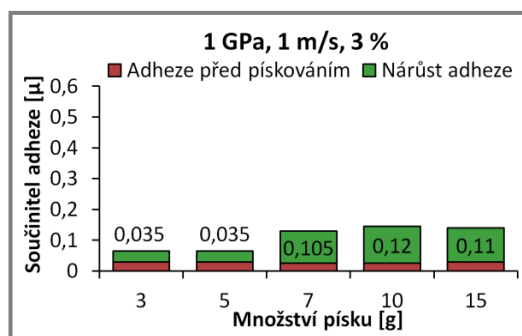


Obr. 4-35 Průběh adheze při různé velikosti skluzu

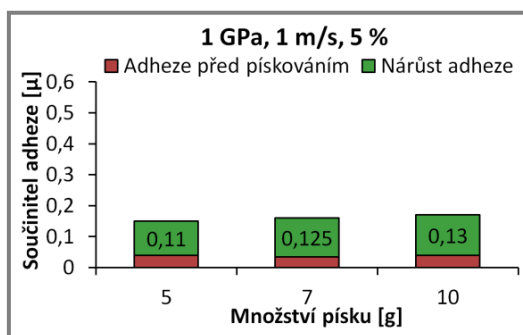
Obr. 4-36 až 4-38 prezentují navýšení adheze za různých skluzů při rychlosti 1 m/s. Obr. 4-36 ukazuje, že během malého skluzu bylo zaznamenáno pouze minimální navýšení adheze a dále spíše jen naznačuje jisté navýšení od množství 7 g. Toto navýšení potvrzuje až obr. 4-37 při větším skluzu, přičemž u 10 g dochází k dalšímu navýšení adheze, které má však tendenci s opětovným navýšením množství klesat. Dále je u obr. 4-37 třeba ještě poukázat na to, že u 7 g a více došlo k celkovému navýšení adheze nad hodnotu 0,1, která je označována jako minimální pro trakci [12]. Této minimální hodnoty bylo dosaženo i u všech testovaných množství za vyššího skluzu a rychlosti. Na obr. 4-38 je po nastavení většího skluzu zřetelné značné navýšení adheze už i u malého množství písku. S rostoucím množstvím je potom vidět tendence dalšího nárůstu adheze.



Obr. 4-36 Změna adheze (1 m/s, 1 %)



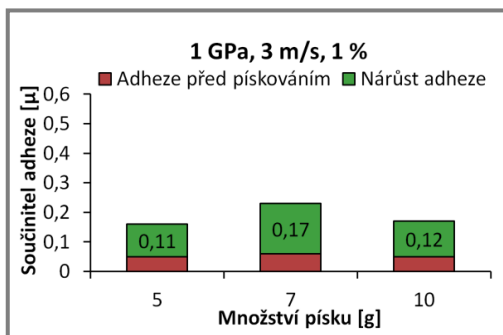
Obr. 4-37 Změna adheze (1 m/s, 3 %)



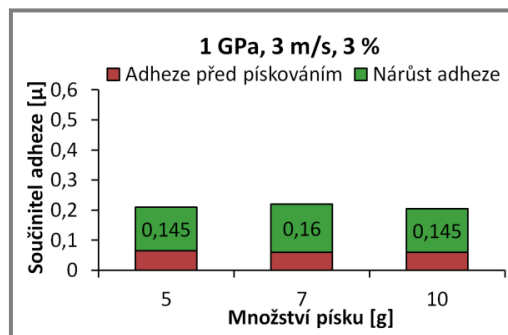
Obr. 4-38 Změna adheze (1 m/s, 5 %)

Obr. 4-39 až 4-41 ukazují výsledky při navýšení rychlosti na 3 m/s. Všechny tyto výsledky jsou podobného charakteru a vyplývá z nich největší nárůst adheze

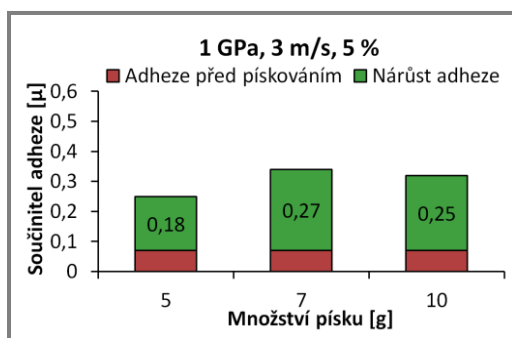
při použití středního množství písku 7 g, přičemž menší množství zpravidla vykazuje výrazně menší nárůst. U většího množství je potom pokles nárůstu adheze méně výrazný. Je třeba upozornit, že na obr. 4-39 s výsledky pro malý skluz došlo u množství 7 g poprvé k dosažení celkové velikosti adheze pohybující se nad hodnotou 0,2. Této již poměrně vysoké hodnoty dostatečné pro trakci, bylo dosaženo za většího skluzu u všech množství písku.



Obr. 4-39 Změna adheze (3 m/s, 1 %)

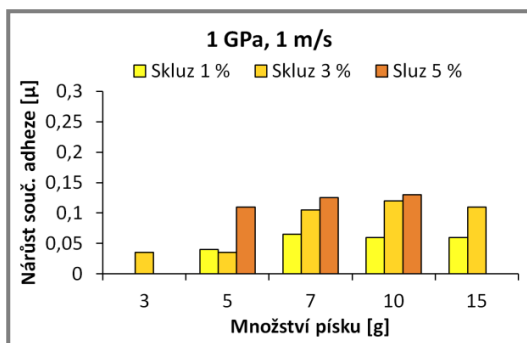


Obr. 4-40 Změna adheze (3 m/s, 3 %)

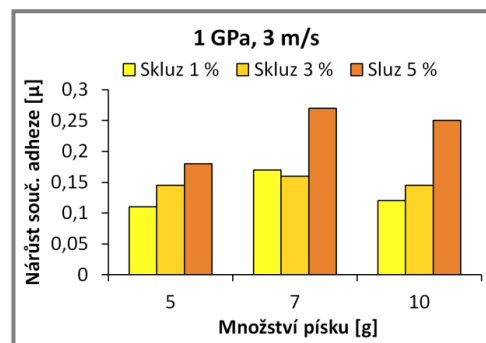


Obr. 4-41 Změna adheze (3 m/s, 5 %)

Porovnání pouze hodnot nárůstu adheze je opět přehledně zobrazeno na obr. 4-22 a 4-43. U obr. 4-42 pro rychlost 1 m/s je poměrně jasně patrné vhodné množství písku 7 g, od kterého s rostoucím množstvím nedochází k dalšímu zvětšení nárůstu adheze, ale naopak se projevuje mírný pokles u množství velkého. Více se toto chování projevuje na obr. 4-43, který ukazuje výsledky pro vyšší rychlost 3 m/s, u které se jeví jako nejvhodnější právě množství 7 g poskytující největší nárůst adheze.



Obr. 4-42 Nárůst adheze (1 m/s)



Obr. 4-43 Nárůst adheze (3 m/s)

Navýšením rychlosti došlo v průměru k dvojnásobnému navýšení účinnosti pískování, přičemž největší navýšení bylo u malého množství, kde dosáhlo až 4násobku. S rostoucím skluzem rostla i velikost adheze, protože docházelo k lepšímu odstranění vrstvy z listí, jejíž lokální vymizení je viditelné i na obr. 4-44. Za pozornost stojí především výrazné, skokové navýšení adheze, ke kterému docházelo za vyššího skluzu 5 % při rychlosti 3 m/s (obr. 4-43).



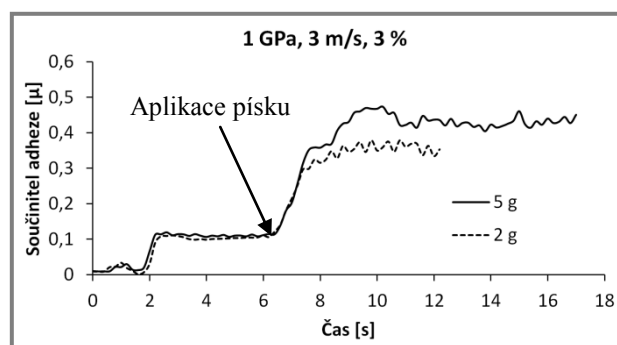
Obr. 4-44 Povrch disku kola po pískování listím kontaminovaného kontaktu

Závěr

Z výsledků pískování vyplývá, že i když je samotná hodnota nárůstu adheze relativně malá, tak se i tak jedná o výrazné navýšení adheze oproti hodnotě původní. Toto navýšení je zároveň dostatečné na to, aby poskytlo při vhodných provozních parametrech celkovou adhezi kolem hodnoty 0,1–0,34. Provedené experimenty naznačují, že existuje optimální množství písku (7 g), od kterého s rostoucím množstvím nedochází k většímu nárůstu adheze, přičemž může naopak dojít i k poklesu tohoto nárůstu. I při malé velikosti skluzu v kontaktu dochází k výraznému navýšení adheze, avšak vyšší hodnoty ($\geq 5\%$) mohou poskytnout další, až skokové navýšení, vlivem účinnějšího odstraňování vrstvy z listí.

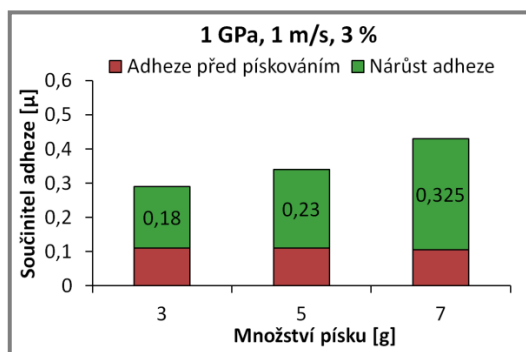
4.4.3 Listový extrakt + pískování

Během experimentů s extraktem z listí bylo zjištěno, že pískování tento kontaminant velice efektivně odstraňuje. Na obr. 4-45 je možné vidět ukázkou průběhu adheze při aplikaci písku do kontaktu. Je patrné značné navýšení adheze i u malého množství písku, přičemž prakticky stejný počáteční průběh při použití množství jiného dokazuje značnou stabilitu procesu obnovení adheze.

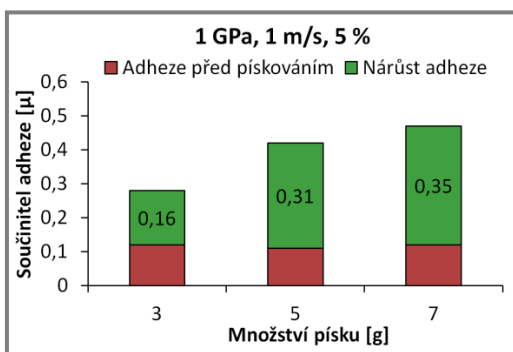


Obr. 4-45 Průběh adheze ukázkou vlivu množství písku

Obr. 4-46 a 4-47 ukazují výsledky zaznamenané při rychlosti 1 m/s, které potvrzují velkou účinnost pískování. Nejmenší dosažené hodnoty celkové adheze se blíží hodnotě 0,3, což je hodnota naprosto dostatečná pro trakci či brzdění [12]. Na získaných datech je jasně patrná tendence růstu adheze s větším množstvím písku.

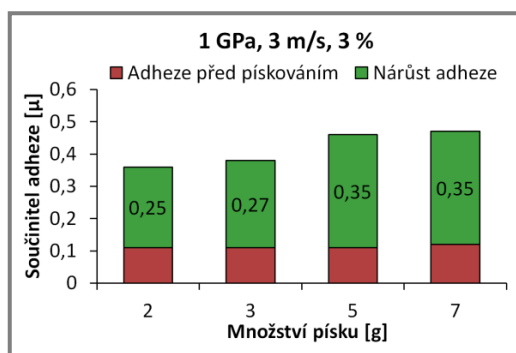


Obr. 4-46 Změna adheze (1 m/s, 3 %)

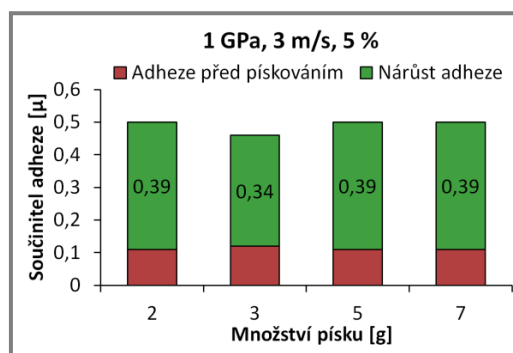


Obr. 4-47 Změna adheze (1 m/s, 5 %)

Na obr. 4-48 a 4-49 je potom možné vidět situaci po zvýšení rychlosti na 3 m/s. Konkrétně na obr. 4-48 je opět viditelný růst adheze s množstvím písku, a to až do množství 5 g. Výsledky od tohoto množství jsou však stejně jako všechny další výsledky na obr. 4-49, pravděpodobně ovlivněny dosažením „maximální hodnoty“ adheze, kterou lze v tomto případě pískováním dosáhnout. Hodnoty nárůstu adheze se totiž i s výrazným navýšením množství písku nemění, přičemž bylo zároveň dosaženo velmi vysoké hodnoty adheze 0,5.



Obr. 4-48 Změna adheze (3 m/s, 3 %)



Obr. 4-49 Změna adheze (3 m/s, 5 %)

Obr. 4-50 a 4-51 pořízené po experimentu ukazují značné znečištění povrchu disků extraktem z listí, který společně částicemi písku tvoří až kašovitou hmotu. Zároveň jsou převážně na povrchu disku kola viditelné černé shluky rozdrčených částic písku, které zřejmě přispívají k navýšení adheze.



Obr. 4-50 Disk kolejnice po experimentu



Obr. 4-51 Disk kola po experimentu

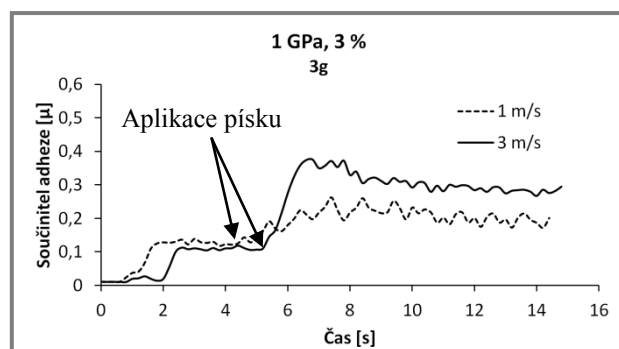
Závěr

Ačkoliv extrakt z listů způsobuje výrazný pokles adheze, tak i při aplikaci minimálního množství písku dojde k obnově adheze na hodnoty před aplikací kontaminantu. Tento kontaminant není schopen při experimentech simulovat kontaminaci listím, které způsobuje daleko vyšší stupeň kontaminace kontaktu a pro jeho odstranění je zapotřebí mnohem více pískovat. Bylo zjištěno, že s rostoucím množstvím písku se velikost nárůstu adheze neustále zvětšuje, přičemž může být dosaženo takových provozních parametrů (zejména vyšší rychlost nebo velikost skluzu), při kterých je pískování natolik efektivní že se tento jev vůbec neprojevuje.

4.4.4 Plastické mazivo + pískování

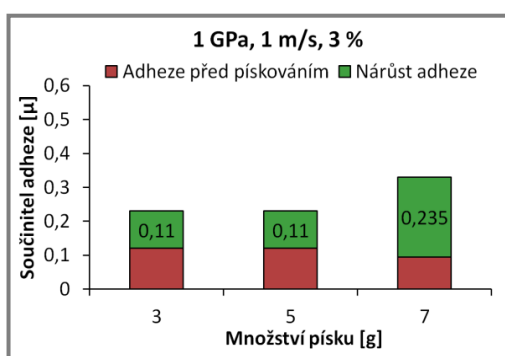
Jak už bylo řečeno dříve, experimenty s olejem byly prováděny na do jisté míry již opotřebovaných discích. To se projevilo na adhezi, která byla vyšší, než je u tohoto kontaminantu běžné. Konkrétně se velikost adheze pohybovala v rozmezí 0,095–0,12, což je na hranici dostatečné adheze ($\mu > 0,1$) [12]. Tyto hodnoty jsou ale stále velmi nízké a pískování bude zcela jistě nutné v řadě případů využít.

Obr. 4-52 ukazuje průběh adheze při aplikaci pískování, které bylo u tohoto kontaminantu velmi účinné a bylo při něm dosahováno značného navýšení adheze. Z průběhu je patrné, že i poměrně malé množství písku poskytlo výrazné navýšení. Na toto navýšení adheze měla významný vliv rychlost, kdy při vyšší rychlosti docházelo k většímu a daleko rychlejšímu nárůstu adheze, a to i u malých množstvích písku.

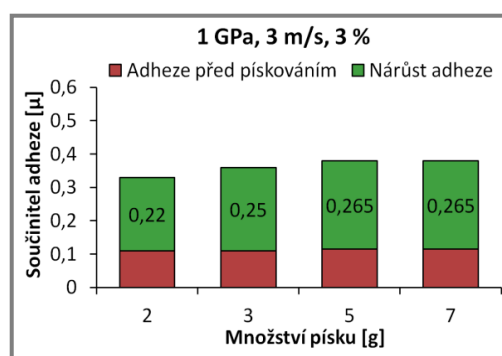


Obr. 4-52 Průběh adheze s vlivem malého množství písku

Obr. 4-53 a 4-54 názorně ukazují výše zmíněné, značně vysoké hodnoty nárůstu adheze. I nejmenší zaznamenané nárůsty poskytly celkové navýšení adheze nad hodnotu 0,2, která přibližně odpovídá kontaminaci vodou a nepředstavuje tak výrazný problém pro trakci či brzdění. Zároveň je z výsledků patrné, že ve většině případů celková adheze dosahovala hodnot nad 0,3, blízkých se až k 0,4. V případě výsledků pro rychlost 1 m/s, které jsou na obr. 4-53, byl zaznamenán skokový nárůst adheze u množství 7 g. Na obr. 4-54 pro rychlost 3 m/s není u žádného množství viditelná takto výrazná změna velikosti nárůstu. Naopak se s rostoucím množstvím velikost adheze postupně zvyšuje až do množství 5 g, od kterého není patrná žádná další tendence růstu. Je zajímavé pozorovat, že při zvýšení rychlosti došlo u množství menšího jak 7 g k výrazně většímu nárůstu adheze, který byl až téměř 2,5násobný.



Obr. 4-53 Změna adheze (1 m/s, 3 %)



Obr. 4-54 Změna adheze (3 m/s, 3 %)

Na obr. 4-55 je vidět disk kolejnice po experimentu, na kterém je možné pozorovat zbytky maziva, které bylo vytlačeno z kontaktu. Mazivo tedy rozhodně nebylo aplikováno v malém množství, které by bylo snadno odstranitelné, což bylo možné usoudit i z dříve uvedeného množství, které bylo aplikováno (90 μl). Obr. 4-56 ukazuje poněkud odlišnou situaci na disku kola, kde jsou na rozdíl od disku kolejnice jasně viditelné, černě zbarvené, shluky částic písku. V důsledku tvorby těchto shluků pravděpodobně došlo ke snížení množství maziva v kontaktu, což přispělo k tak výraznému dosahovanému obnovení adheze. Velká tendence tvorby shluků byla zřejmě způsobena tím, že je mazivo značně viskózní, což brání distribuci částic vznikajících při drcení zrn v kontaktu. Naopak zůstávají při sobě a ulpívají na povrchu.



Obr. 4-55 Disk kolejnice po experimentu



Obr. 4-56 Disk kola se shluky částic písku

Závěr

Aplikace plastického maziva způsobila pokles adheze na kritické hodnoty, které se pohybovaly v rozmezí 0,095–0,12 a jedná se tedy, hned po listí, o druhý nejhorší kontaminant. Pískování v případě tohoto kontaminantu velmi efektivně obnovuje adhezi na více než dostatečné hodnoty, a to i při použití velmi malého množství písku. Jednorázová kontaminace mazivem tedy v tomto případě při aplikaci pískování nezpůsobuje výrazný problém v dosažení dostatečné adheze. Výsledky dále ukazují, že existuje optimální množství písku, od kterého s rostoucím množstvím nedochází k dalšímu nárůstu adheze, přičemž při navýšení rychlosti se velikost tohoto optimálního množství zmenšuje.

5 DISKUZE

5.1 Uvažovaná zjednodušení a jejich vliv na výsledky

Výzkum v laboratorních podmínkách probíhá s celou řadou zjednodušení, které mohou být spolu s metodikou a vyhodnocením experimentů zdrojem možných chyb či zavádějících výsledků. Nejvíce jsou výsledky ovlivněny mírou modelového zkreslení. Práce byla řešena na zařízení typu twin-disc, které poskytuje i v malém měřítku, za velkého zjednodušení kontaktu, výsledky blíží se reálným podmínkám. To dokazuje případ hojně využívaného zařízení SUROS s disky tvořícími pouze liniový kontakt. Pro řešení této práce bylo použito disků ve velkém měřítku 1:3 vzhledem k reálnému kolu. V tomto měřítku je i použité zaoblení kontaktního povrchu disku kolejnice, díky němuž má kontaktní plocha eliptický tvar. Použité twin-disc zařízení osazené těmito disky tedy poskytuje daleko větší možnost přiblížit se reálným podmínkám, a tudíž i míra modelového zkreslení není tak velká. Rozdíl oproti reálné situaci je však mimo jiné i v orientaci eliptické kontaktní plochy, u níž není ve směru valení orientovaná hlavní, ale naopak vedlejší poloosa. To však bylo obětováno úmyslně na úkor správného geometrického tvaru disku kolejnice, který je v daném měřítku. Geometrický tvar totiž ovlivňuje vstup zrn písku do kontaktu a tedy i simulaci reálných podmínek při pískování. Získané výsledky mohou být ovlivněny i materiálovými vlastnostmi kontaktních těles. Proto zde byla snaha se co nejvíce přiblížit v praxi používaným materiálům (viz tab. 3-1).

Na výsledky měla zcela neoddiskutovatelně vliv také míra kontaminace disků. Je velice obtížné určit množství kontaminantu, jenž vytvoří podmínky simulující reálnou situaci, která je navíc mnohdy značně odlišná. Zvláště u listů může být dosaženo velmi rozdílné míry kontaminace, která je daná tloušťkou vytvořené vrstvy z listů. V rámci experimentů bylo počítáno spíše s lehčí formou kontaminace listy, která je zvláště v našich podmínkách běžnější. Míra kontaminace byla dostatečná, protože ani zdaleka nedocházelo k úplnému odstranění vrstvy z listů, přičemž podobné chování lze očekávat i u větší míry kontaminace. Rozdílná míra kontaminace u jednotlivých experimentů může poskytnout značně odlišné výsledky. Tento vliv byl minimalizován způsobem aplikace (kap. 3.5) i krátkou dobou experimentů díky, které během experimentu nedocházelo ke změnám podmínek.

Z hlediska pískování se do popředí dostává společná nevýhoda všech laboratorních zařízení, která je v simulaci valení kola po *opakujícím se* úseku kolejnice. Aplikovaný písek, který ulpí na disku kolejnice (případ twin-disc zařízení), se totiž vrací zpět do kontaktu. Ve skutečných podmínkách k této situaci samozřejmě nedochází, a již aplikovaný písek zůstává na koleji, avšak i tak může působit při přejezdu dalších hnacích náprav. Nicméně v případě laboratorního zařízení může, zvláště při delších experimentech, dojít k značnému hromadění písku na povrchu disku ve formě prášku, který ovlivňuje průběh adheze a zvyšuje množství písku v kontaktu, které je pak větší než při aplikaci stejného množství ve skutečných podmínkách. V případě provedených experimentů byl vliv opakujícího se úseku téměř zcela potlačen krátkou dobou experimentů, které tak poskytly výsledky blíží se reálným podmínkám.

Další výrazný rozdíl oproti reálné situaci, který mohl mít vliv na výsledky je odlišný způsob vstupu zrn písku do kontaktu. Písek totiž není aplikován na rovnou kolejnici, na které by mohl spočinout, ale je naopak nabírán a přiváděn do kontaktu pomocí rotujícího disku. Jednou z věcí, která se do výsledků promítá nejvíce,

je samotný způsob aplikace písku do kontaktu. Z toho důvodu byla použita aplikace hadicí s tryskou v měřítku za pomoci stlačeného vzduchu. Tryska byla sice nastavena tak, aby byl simulován částečný rozptyl písku jako v reálných podmínkách, avšak v tomto případě do kontaktu pravděpodobně vstupovalo více písku. Laboratorní podmínky se oproti reálným liší právě zejména v rozdílu mezi aplikovaným a skutečným množstvím písku v kontaktu.

Při pískování hraje výraznou roli i doba aplikace pískovacího materiálu, která může poskytnout jiné výsledky, než jaké byly získány. Na druhou stranu by doba aplikace musela být jistě řádově delší, aby se výrazněji promítla do výsledků vlivu množství písku na adhezi, což potvrzují i výsledky Ariase-Cuevase [47, 53]. S delší dobou aplikace by se měla pouze zvyšovat velikost nárůstu adheze. Navíc byla použita doba aplikace, která se blíží k té používané v praxi, kdy je pískování aplikováno pouze krátkou dobu. Z uvedeného vyplývá, že jsou výsledky ovlivněny celou řadou vlivů a nemohou být použity ke stanovení přesného množství písku, které má být aplikováno v reálných podmínkách. Výsledky tedy spíše jen objasňují chování pískovacího materiálu v kontaktu při aplikaci různého množství písku.

5.2 Shrnutí nejdůležitějších poznatků

5.2.1 Kontaminace kontaktu

Voda

- Velikost adheze v rozmezí hodnot 0,22–0,32
- Bod saturace adhezni charakteristiky při skluzu 1–2 %
 - Větší skluz způsobuje pouze velmi malý pokles adheze
- Adhezi ovlivňuje množství vody
 - Při kontinuální aplikaci adheze s množstvím vody klesá
 - Orosení způsobené nízkou teplotou kolejnice způsobuje výrazný pokles adheze (oproti kontinuální aplikaci vody pokles až o 50 %)
- S rostoucí rychlostí velikost adheze klesá
- Adheze má tendenci mírně klesat s rostoucím kontaktním tlakem

Mokrě listí

- Poskytuje extrémně nízkou adhezi v rozmezí hodnot 0,014–0,026
- Agresivní kontaminant
 - I malé množství způsobuje nízkou adhezi
 - Ihned se tvoří špatně odstranitelná vrstva z listí
- Pro úplnou obnovu adheze je potřeba zcela odstranit vrstvu z listí, která nemusí být okem patrná, a přesto může poskytovat adhezi kolem hodnoty 0,2
- Rychlost nemá vliv na velikost adheze

Extrakt z listí

- Způsobuje trvale nízkou adhezi kolem hodnoty 0,1
- Oproti listí obsahuje daleko menší množství látek způsobujících nízkou adhezi, a proto je třeba delšího působení v kontaktu

5.2.2 Pískování

Z provedených experimentů lze vyvodit, že v počáteční fázi rozjezdu bude při nízké adhezi zpravidla nutné použít maximální povolené množství písku. Se zvyšujícím se skluzem a rychlostí se potom bude množství potřebného písku až řádově snižovat. Nejdůležitější získané poznatky jsou sepsány níže.

Voda

- Po aplikaci pískování dochází nejprve k počátečnímu poklesu adheze
 - Pokles se zvětšuje s množstvím aplikovaného písku
 - Více se vyskytuje u menšího množství vody, kde je pokles zároveň i větší
- Pískováním lze obnovit adhezi na úroveň před kontaminací kontaktu
 - Závisí na množství vody, písku a především provozních parametrech
 - Může být dosaženo i vyšší adheze než za suchých podmínek
- Větší množství vody v kontaktu může negativně ovlivnit efektivnost pískování
 - Voda z kontaktu vyplavuje aktivně působící částice písku
 - Zaznamenaný pokles efektivnosti pískování u použitých množství vody o cca 50 %
- Existuje množství písku, od kterého s rostoucím množstvím nedochází k adekvátnímu nárůstu adheze
 - Toto množství se s rostoucí rychlostí zmenšuje

Mokrý listí

- Z běžných kontaminantů dochází u listí k největšímu nárůstu adheze oproti hodnotě původní (až o 386 %)
- Existuje množství písku, od kterého se s rostoucím množstvím adheze dále nezvyšuje, přičemž může naopak dojít i k poklesu nárůstu adheze
 - Zvyšující se rychlost neovlivňuje velikost tohoto množství
- Od určité velikosti skluzové rychlosti může dojít až ke skokovému nárůstu efektivnosti pískování

Extrakt z listí

- Tento kontaminant při experimentech nedokáže nahradit kontaminaci samotným listím
- Pískování je extrémně efektivní
 - Velký nárůst adheze i u malého množství písku
 - Obnova adheze na hodnoty před aplikací kontaminantu

Plastické mazivo

- Jednorázová kontaminace kontaktu nepředstavuje při použití pískování problém
 - Minimální množství písku způsobuje dostatečné navýšení adheze
 - Lze dosáhnout adheze více než dostatečné pro trakci
- Existuje množství písku, od kterého se již s rostoucím množstvím adheze dále nezvyšuje
 - Toto množství se s rostoucí rychlostí zmenšuje

Další poznatky spojené s pískováním

- Navzdory rovnoměrné aplikaci písku vstupují jednotlivá zrna do kontaktu značně nerovnoměrně
- Opakovaná aplikace písku přináší další navýšení adheze
- S rostoucí velikostí skluzu se zvyšuje účinnost pískování
 - Menší velikost skluzu pohybující se v rozsahu 3–5 % dokáže také zajistit dostatečný nárůst adheze a využít tak potenciál aplikovaného písku
- I malé navýšení rychlosti výrazně zvyšuje efektivitu pískování
 - Spojeno s navýšením skluzové rychlosti, lepším vstupem a distribucí zrn písku i částic vznikajících při rozdrčení zrn v kontaktu
 - Projevuje se především u malého množství písku, kde může být navýšení efektivit až stejně velké jako velikost navýšení rychlosti
 - Nejvíce pozitivní vliv mělo navýšení rychlosti u kontaminace vodou
- Pískování způsobuje těžké opotřebení kola i kolejnice

5.3 Vědecká otázka a ověření hypotézy

Položená vědecká otázka je: „*Jaký je vliv množství pískovacího materiálu na navýšení adheze v kontaktu mezi kolem a kolejnicí při uvažování různých provozních parametrů a kontaminantů?*“ Následně byla vytvořena pracovní hypotéza: „*S rostoucím množstvím písku roste míra obnovení adheze, přičemž existuje hraniční množství, různé pro každý kontaminant, od kterého se adheze již dále významně nezvyšuje.*“

Na základě provedených experimentů lze říci, že začátek i konec hypotézy je do jisté míry pravdivý. Experimenty prokázaly zvětšující se nárůst adheze při použití většího množství písku, a to skutečně až do jistého hraničního množství. Dále bylo prokázáno, že od tohoto hraničního množství se adheze dále ne významně, ale spíše adekvátně nezvyšuje, přičemž v případě kontaminace listím dochází dokonce i k poklesu. Hraniční množství však bylo pro všechny kontaminanty stejné (7 g). Navíc se ukázalo, že na toto množství má vliv velikost rychlosti. U plastického maziva a vody na rozdíl od listí docházelo při zvýšení rychlosti k poklesu hraničního množství (5 g).

Lze tedy konstatovat, že vyslovená **hypotéza byla vyvrácena**.

5.4 Diskuze a srovnání s již publikovanými výsledky

5.4.1 Suchý kontakt a kontaminanty

Suchý kontakt vykazoval pozitivní tření v celém rozsahu skluzu (obr. 4-2), což je v rozporu s výsledky všech publikovaných prací kromě výzkumu Baeka [20]. Trakční křivka, kterou sestrojil, také vykazuje jistou tendenci neustálého růstu se zvětšujícím se skluzem (sestrojena ze stabilních hodnot adheze μ_s). Stejně tak jako v této práci (obr. 4-3), dále také pozoroval výrazný počáteční nárůst adheze s následným ustálením na relativně stabilní hodnotě. Je tedy možné vidět značnou podobnost výsledků. Důvodem odlišnosti od ostatních prací je velké opotřebení disků během měření, díky kterému se výrazně mění kontaktní podmínky, které jsou ovlivněny i daným materiálem kontaktních těles. Výsledky ukazují, že je v kontaktu stále dostatečně velká oblast lpění, která je schopna přenášet větší třecí síly než je za daných podmínek běžné. V této práci dosažené hodnoty adheze (0,42–0,63) odpovídají hodnotám dosahovaným i v jiných výzkumných pracích [5, 6, 29, 47, 53]. Stejně tak byl pozorován i pokles adheze vlivem rostoucí rychlosti [5, 29, 30], avšak za rychlostí daleko vyšších než v této práci. Za nízké rychlosti tento pokles pozoroval opět pouze Baek [20]. Růst adheze s rychlostí při malém skluzu nebyl v jiné práci pozorován.

V případě kontaminace vodou byly naměřeny hodnoty adheze mírně vyšší jak v jiných publikacích, ve kterých při různých rychlostech dosahovaly hodnot 0,2–0,25 [6, 25, 26, 28–30]. Někteří autoři, však při totožných parametrech jako v této práci dosáhli podobných hodnot adheze kolem 0,3 [17, 22, 55]. Zjištěný bod saturace při skluzu nad 1 % má podobnou hodnotu jako v pracích za stejných rychlostí, protože trakční křivky byly také sestrojeny z menšího množství měření [6, 25]. Při rychlostech vyšších byl však publikován bod saturace dosahující nižších hodnot 0,5 % [5, 29]. Žádný, až velice mírný pokles adheze za vysokého skluzu je u vody známý [5, 6, 25, 29]. Pokles adheze s rostoucí rychlostí byl potom prokázán již dříve, zvláště při vysokých rychlostech [5, 24, 27, 29, 30]. Baek [22] tento pokles pozoroval ale i u rychlostí menších, odpovídajících této práci. Dále byla stejně tak prokázána i zjištěná tendence adheze klesat se zvyšujícím se kontaktním tlakem [5, 25, 29, 30]. Pokles adheze s rostoucím množstvím vody shodně zaznamenal Wang [30].

Při experimentech s nízkou teplotou byl zjištěn velký pokles adheze až na hodnoty 0,16 (obr. 4-18), způsobený orosením povrchu disků. Podobně nízkých hodnot (0,2) dosahoval v reálných podmínkách Nagase [21], a to již při relativní vlhkosti pouze 63 % a teplotě 28 °C. Naproti tomu v laboratorních podmínkách dosahoval Baek [20] nepřiměřeně malého poklesu adheze na hodnotu 0,35 při vlhkosti 80 % a teplotě 30 °C, avšak další trend vykresleného průběhu naznačuje strmý pokles při vlhkosti vyšší, který napovídá dosažení také značně nízkých hodnot.

Mokrým listím kontaminovaný kontakt poskytoval adhezi 0,014–0,026 (obr. 4-16), která odpovídá experimentům provedeným i v jiných publikovaných pracích [6, 30]. Další autoři [36, 47] dosahovali poněkud vyšší adheze pohybující se kolem hodnoty 0,08, která však v průběhu experimentů neustále rostla (až na hodnotu 0,2, případně i 0,3), což bylo dáno především dlouhou dobou trvání experimentů, a tím pádem postupně se snižující mírou kontaminace. Wang [55] potom při experimentech dosahoval hodnot adheze ještě vyšších kolem 0,1,

kteře odpovídají spíše menší míře kontaminace. U kontaminace listím jsou výsledky ovlivněny především mírou kontaminace a množstvím vody. Díky tomu může být dosaženo i poměrně rozdílné adheze, která se v reálných podmínkách dle RSSB [14] pohybuje v rozmezí 0,01–0,1, což dokazují i experimenty v reálných podmínkách [31, 38]. V této práci získané výsledky tedy odpovídají reálným podmínkám i výsledkům jiných výzkumných prací.

Kontaminací extraktem z listí se zabývala pouze Cannová [37]. Během svých experimentů dosahovala při rychlosti 1 m/s nízké adheze 0,04, která byla zároveň podobná, v jejím případě naměřené, adhezi při kontaminaci listy. V této práci bylo dosaženo u extraktu hodnoty kolem 0,1 (obr. 4-17), přičemž u listí byla hodnota daleko nižší 0,014–0,026. Rozdílných výsledků oproti Cannové mohlo být dosaženo především, protože v jejím případě bylo použito MTM zařízení s velkým modelovým zkrácením, které poskytuje výsledky spíše obecně popisné. Především kontaminace listy se z důvodu velikosti MTM zařízení provádí značně obtížně. Výsledky v této práci by se tedy měli více blížit reálným podmínkám. Jeden z možných důvodů stále malého poklesu adheze oproti kontaminaci listím, může být pravděpodobně v tom, že vlivem působení kontaktního tlaku se z listů logicky „vylisuje“ podobný extrakt daleko větší koncentrace, který způsobí větší a rychlejší pokles adheze. Na základě získaných zkušeností lze říci, že poklesu adheze přispívá i přítomnost samotných listů, které ulpívají na ocelovém povrchu, a to i ve formě okem sotva patrných částic vznikajících při rozdrčení listů v kontaktu. Provedené experimenty potom naznačují, že listový extrakt, reprezentující látky z listů rozpustné ve vodě, je jednou z hlavních příčin poklesu adheze.

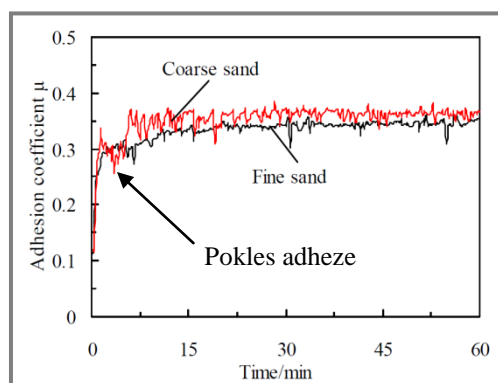
U kontaminace plastickým mazivem bylo dosahováno poměrně vysoké adheze těsně nad hodnotou 0,1 (obr. 4-52). Maximální hodnota byla 0,12. Fletcher [11] však u maziva pro mazání okolků také dosahoval podobně vysokých hodnot, které se při 1 m/s a skluzu 1 % blížily k hodnotě 0,9. Svou roli hrála jistě i jednorázová kontaminace, kterou stejně tak provedl i Wang [55] s olejem a dosáhl prakticky totožných hodnot adheze (0,12). Vyšší hodnota adheze však byla v této práci zcela jistě způsobena především již do jisté míry opotřebovanými disky a s tím spojenou i větší drsností povrchu. Toto tvrzení podporují výsledky Kumara [26], který při podobných parametrech dosahoval na dříve pískovaném povrchu adheze ~0,16 (olej). V jeho případě však na druhou stranu byly disky pravděpodobně již značně opotřebované, protože na nepískovaném povrchu dosahovala adheze naopak velice nízkých hodnot ~0,02. U ostatních publikovaných prací se, tentokrát již při kontinuální aplikaci oleje, adheze pohybovala v rozmezí 0,05–0,07 [6, 25]. Na základě výše uvedených souvislostí tedy hodnoty adheze dosažené v této práci příliš nevybočují, uvážíme-li jednorázovou kontaminaci plastickým mazivem a vyšší opotřebování povrchu.

5.4.2 Pískování

Výsledky experimentů s pískováním se porovnávají velice obtížně, což je dáno již mnohdy značně rozdílnou mírou kontaminace a odlišnými provozními parametry. Práce se z hlediska pískování liší především způsobem a dobou aplikace písku, aplikovaným množstvím a zrnitostí písku. Vzhledem k tolika různým vlivům může být tedy porovnání výsledků pískování dosti zavádějící, avšak i tak bylo provedeno níže uvedené citlivé porovnání.

V případě pískování za mokrých podmínek se výsledky blíží těm, které publikoval Lewis [50, 54]. V jeho případě byl použit především větší skluz 20 %, a to při rychlosti 1 m/s. Nejbližších parametrů z hlediska velikosti skluzové rychlosti bylo, ve zde předložené práci dosaženo, při rychlosti 3 m/s a skluzu 5 % (obr. 4-31). Použitému množství písku potom odpovídá množství 10 g. Stejně jako v jeho případě bylo i v této práci dosaženo mírně větší adheze než za suchých podmínek, čímž byla zcela potlačena kontaminace vodou. Zároveň bylo dosaženo i velice podobné hodnoty nárůstu adheze (v této práci 0,23 oproti 0,24), avšak délka experimentů Lewise není známa (pravděpodobně značně dlouhá). S těmito výsledky však nesouhlasí experimenty provedené Wangem [28, 55], které byly provedeny na dvou různých zařízeních. V žádné jeho práci však nebylo dosaženo ani polovičního obnovení adheze v kontaktu. Bude to dáno pravděpodobně především použitím několikanásobně menšího množství písku, které bylo (0,17 a 0,33) g/s, v závislosti na použitém laboratorním zařízení.

Na obr. 5-1 je vidět průběh adheze z jednoho měření, které Wang [55] provedl. Jeho účelem bylo porovnat vliv zrnitosti písku při kontaminaci vodou. I když to autor nezmiňuje, tak je viditelný menší, avšak jasně patrný počáteční pokles adheze, který byl ve větší míře pozorován i v této práci. Dále je vidět, že se projevuje jen u písku větší zrnitosti (na obr. 5-1 červený průběh adheze), který je zároveň bližší k písku použitému v této práci. Tento počáteční pokles je tedy pravděpodobně spojen i se zrnitostí použitého písku. Dále se nabízí porovnat, v této práci zjištěný, pokles adheze s pískováním suchého kontaktu, protože je možné, že vlivem pískování mohlo dojít k úplnému vysušení kontaktu. Velikost adheze se při jejím poklesu za malého množství vody a při větších množstvích pohybovala kolem hodnoty 0,12 (obr. 4-23). Porovnáním této hodnoty s výsledky Ariase-Cuevase [52], zjistíme, že při pískování za sucha by měla adheze při podobných parametrech dosahovat hodnot pohybujících se nad hodnotou 0,2. Je to přibližná hodnota, která ale naznačuje, že nedochází k úplnému vysušení kontaktu, ve kterém by byl alespoň na chvíli přítomen pouze písek, který způsobuje u suchého kontaktu pokles adheze. Tomu napovídá i použitá krátká doba aplikace písku.



Obr. 5-1 Průběh adheze při kontaminaci vodou – upraveno [55]

Odbočíme-li od pískování, tak zjistíme, že Beagley [17] pozoroval podobný chvilkový pokles adheze při vysychání mokrého kontaktu, který dosahoval hodnot až 0,15. Pokles byl způsoben velkým množstvím částic, které vznikaly při opotřebení, a které zároveň poskytovaly nízkou adhezi i při malém množství

vody. Je tedy možné, že prach vzniklý rozdrčením písku způsobil podobný efekt, předtím než byl vyplaven vodou, která v kontaktu zanechala pouze větší částice písku, které následně přispěly k navýšení adheze.

V případě listím kontaminovaného kontaktu je možné velice dobré porovnání s prací Ariase-Cuevase [47], který zjišťoval vliv zrnitosti písku, a to při kontaminaci silnou vrstvou listí. Odpovídající zrnitost má v jeho práci písek s označením R až L, což je dáno tím, že byl v této práci použit písek s větším rozsahem velikosti zrn. Pro porovnání je vhodné zvolit stejnou ujetou vzdálenost, během které bylo pískováno (1,5 m) a stejné množství písku, které bylo na této vzdálenosti aplikováno (7,5 g/m). Těmto parametrům jsou velice blízké, v této práci dosažené, výsledky při rychlosti 1 m/s a množství písku 10 g. Při skluzu 1 % (obr. 4-36) bylo dosaženo stejného obnovení adheze na hodnoty kolem 0,08, zprůměrujeme-li rozdílné hodnoty dosažené u písku R a L. Stejný byl i nárůst adheze (v této práci 0,06 oproti 0,055). Pokud následně porovnáme výsledky při skluzu 5 % (obr. 4-38), tak jsou patrně mírně rozdílné hodnoty obnovené adheze (0,17 oproti 0,22). Samotná hodnota nárůstu adheze je však prakticky stejná (0,13 oproti 0,14). Je tedy zřejmé, že výsledky velmi dobře sedí. Při porovnání s výsledky Gallardo-Hernandez [6], zjistíme, že při použití podobného množství písku (odpovídá 10 g) dosahoval pískováním při rychlosti 1 m/s podobných maximálních hodnot adheze pohybujících se kolem 0,12 (obr. 4-37). Nicméně v jeho případě toto obnovení trvalo daleko déle, což mohlo být způsobeno neustálou aplikací listí do kontaktu a extrémně silnou vrstvou z listí. Sám autor uvádí, že značná část písku prošla kontaktem bez zjevného účinku, protože vrstva z listí byla silnější, než velikost některých zrn písku. Na základě výše zmíněného, lze tedy říci, že i relativně tenká vrstva z listí, použitá při experimentech v této práci, vykazuje podobné chování a získané výsledky jsou si blízké.

Porovnání výsledků z pískování kontaktu kontaminovaného extraktem z listí není možné, protože se jím doposud nikdo nezabýval. Výsledky především ukázaly, že extrakt způsobuje nízkou adhezi, která je však pískováním velmi efektivně obnovena. Je to dáno pravděpodobně tím, že v případě listí se tvoří daleko silnější vrstva z listí bránící tak rychlému a velkému obnovení adheze.

Pískováním kontaktu kontaminovaného plastickým mazivem se doposud nikdo nezabýval. Je však možné porovnání s běžným olejem. Podobné obnovení adheze na hodnoty kolem 0,3 je možné pozorovat především v práci Wanga [55]. Naopak Kumar [26] dosáhl značně vyšších hodnot adheze blízké se až k hodnotě 0,6, a to dokonce při skluzu mírně větším jak 1 %, což naprosto vybočuje ve srovnání s předloženou, či jinou publikovanou prací. Nejvzdálenější je porovnání s experimenty při kontaminaci emulzí z vody a oleje za vysoké rychlosti (90 km/h), které provedl Wang [28]. Při jeho experimentech bylo pískováním dosaženo hodnoty adheze pouze mírně nad 0,05, což bylo pravděpodobně způsobeno především vysokou rychlostí a v tomto případě již kontinuální aplikací kontaminantu.

Za různé rychlosti pískování prováděl pouze Wang [28] u kontaminace emulzí z vody a oleje. V jeho případě se však neprojevil žádný výrazný vliv vyšší rychlosti na efektivnost pískování. Nicméně při nejvyšší rychlosti bylo pozorováno značné kolísání adheze. Tyto experimenty však probíhaly za vysoké rychlosti (60–120 km/h) a při velmi malém skluzu 0,5 %. Je dost pravděpodobné, že se nárůst efektivnosti pískování bude projevovat především při, v této práci testované, nízké rychlosti. Zmíněné výsledky Wanga pak naznačují, že od určité (vysoké)

rychlosti bude s jejím dalším nárůstem docházet naopak ke zhoršení průběhu obnovy adheze a pískování tak bude méně efektivní.

ZÁVĚR

Předložená diplomová práce se zabývá studiem vlivu kontaminantů a pískování na adhezi v kontaktu mezi kolem a kolejnici. Jedná se o experimentální výzkum, který především zkoumá vliv množství pískovacího materiálu na velikost adheze v kontaminovaném kontaktu. Pískování je dodnes nejpoužívanějším a nejúčinnějším způsobem pro obnovení adheze v kontaktu kolo/kolejnice. Lepší pochopení procesu pískování může přispět zejména k jeho efektivnějšímu používání, což mimo jiné přináší i úsporu v provozních nákladech. Značně vzestupná míra publikovaných prací jasně potvrzuje důležitost a aktuálnost výzkumu spojeného s pískováním.

V této diplomové práci je uvedeno stručné shrnutí současného stavu poznání, a to i včetně krátkého úvodu do problematiky. Současný stav poznání se zaměřuje především na to, jak působí kontaminanty a následně i pískování na velikost adheze. Důraz je přitom kladem na pískování a další parametry i problémy s ním spojené. Práce dále uvádí metodiku řešení spolu s popisem experimentálního zařízení, které bylo pro řešení práce použito, a to včetně měřicího řetězce. Velká pozornost byla věnována použitému experimentálnímu materiálu a popisu průběhu experimentů. Stěžejní je podrobná analýza získaných výsledků, která obsahuje i dílčí závěry. V obsáhlé diskuzi je potom upozorněno na uvažovaná zjednodušení, přičemž je následně uvedeno shrnutí nejdůležitějších poznatků. Na konci diskuze je podrobné srovnání s již publikovanými výsledky, které jsou zároveň i diskutovány.

Všechny cíle práce byly splněny v plném rozsahu, a to i včetně ověření pracovní hypotézy. Na nově vyvinutém laboratorním zařízení bylo objasněno, jak adhezi ovlivňují nejběžněji se vyskytující kontaminanty i pískování, a to i za různých provozních parametrů. Získaná data byla porovnána s již publikovanými výsledky, čímž byla potvrzena věrohodnost výsledků poskytovaných tímto zařízením. Práce tedy rozšířila poznatky na poli výzkumu vlivu kontaminantů a pískování na adhezi v kontaktu kolo/kolejnice. Experimenty s pískováním byl zjištěn především vliv různého množství písku na nárůst adheze v kontaktu. Bylo vyhodnoceno, že existuje množství pískovacího materiálu, od kterého se s rostoucím množstvím adheze již dále adekvátně nezvyšuje, přičemž může dokonce dojít i k jejímu mírnému poklesu. Byly tedy shromážděny potřebná data o adhezi za různých podmínek a pískování, přičemž tyto experimentální data poslouží při optimalizaci procesu pískování prostřednictvím vyvíjeného systému, který je veden jako projekt TA ČR (projekt číslo TA02030850).

Výsledkem řešení diplomové práce v kategoriích definovaných pro základní výzkum v souladu s platnou metodikou hodnocení výsledků výzkumu a vývoje [57] je článek v impaktovaném časopise (J_{imp}), který byl sepsán a odeslán k posouzení vydavatelem, tak jak bylo definováno v cílech práce.

Problematika kontaktu kolo/kolejnice je velmi rozsáhlá a je zde stále značný prostor pro další výzkum, který může přispět novými poznatky, jež mohou být následně využity i v praxi. Na dvoudiskovém zařízení použitém v této práci je možné provést celou řadu dalších experimentů, které mohou být zaměřeny například více na opotřebení. Dále by bylo možné provést několik měření s diskem kolejnice, jenž by nebyl opatřen zaoblením kontaktního povrchu. Jednalo by se tedy o experimenty s liniovým kontaktem. To je sice odchýlení od reálných podmínek, nicméně by mohlo přinést nové poznatky o chování kontaktu. Nabízí se také provést experimenty s dalšími, třeba i méně obvyklými kontaminanty jako je například

prach, bláto, emulze z vody a oleje, rez. Zajímavé by nepochybně bylo napodobit experimenty s vodou, které prováděl Beagley [17]. Jednalo se o měření s malým množstvím vody, kdy docházelo při ukončení aplikace vody k chvilkovému, avšak výraznému poklesu adheze, který byl způsoben vysycháním kontaktu. Tyto experimenty však vyžadují daleko delší průběh. Z hlediska pískování by bylo možné provést další měření s pískem jiné zrnitosti.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Wheel - Rail Interface [online]. 2013 [cit. 2014-10-5]. Dostupné z: <<http://gallery3.qrig.org/index.php/members-gallery/bazt/Wheel---Rail-Interface>>.
- [2] *Wheel-rail interface handbook*. 1st pub. Editor R Lewis, Ulf Olofsson. Cambridge: Woodhead, 2009, xxii, 842 s. Woodhead publishing in mechanical engineering. ISBN 978-1-84569-412-8.
- [3] LATA, M. *Konstrukce kolejových vozidel II*. Vyd. 1. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2004, 206 s. ISBN 80-719-4696-6.
- [4] JENKS, C.W. *Improved methods for increasing wheel/rail adhesion in the presence of natural contaminants*. Transit Co-operative Research Program, Research Results Digest, No. 17, Washington DC: Transportation Research Board, National Research Council, 1997.
- [5] ZHANG, Weihua, Jianzheng CHEN, Xuejie WU a Xuesong JIN. Wheel/rail adhesion and analysis by using full scale roller rig. *Wear*. 2002, vol. 253, 1-2, s. 82-88. DOI: 10.1016/S0043-1648(02)00086-8.
- [6] GALLARDO-HERNANDEZ, E.A. a R. LEWIS. Twin disc assessment of wheel/rail adhesion. *Wear*. roč. 265, 9-10, s. 1309-1316. ISSN 00431648. DOI: 10.1016/j.wear.2008.03.020.
- [7] CHIDDICK, K.S., EADIE, D.T. *Wheel/rail fiction management solutions*, Kelsan Technologies Corp. 1999.
- [8] Portable Tribometer. *Salient Systems* [online]. [cit. 2014-10-5]. Dostupné z: <http://www.lbfoster-salientsystems.com/Portable_Tribometer.asp#mstto=>>.
- [9] THOMPSON, D.J., MONK-STEEL, A.D., JONES, C.J.C. *Railway noise: Curve squeal, roughness growth, fiction and wear*. Rail Research UK. 2003.
- [10] POOLE, W. *Characteristics of Railhead Leaf Contamination*. London: Rail Safety and Standards Board (T354). 2007.
- [11] FLETCHER, D.I. a J.H. BEYNON. Development of a Machine for Closely Controlled Rolling Contact Fatigue and Wear Testing. *Journal of Testing and Evaluation*. 2000, roč. 28, č. 4, s. 267-. DOI: 10.1520/JTE12104J.
- [12] GM/GN2642. *Guidance on Wheel/Rail Low Adhesion Measurement*. London: Rail Safety and Standards Board. 2008.
- [13] GM/GN2695. *Guidance on Testing of Wheel Slide Protection Systems Fitted on Rail Vehicles*. London: Rail Safety and Standards Board. 2010.
- [14] FULFORD, C. R. *Review of low adhesion research*. London: Rail Safety and Standards Board. 2004.

- [15] BEAGLEY, T.M., I.J. MCEWEN a C. PRITCHARD. Wheel/rail adhesion— Boundary lubrication by oily fluids. *Wear*. 1975, vol. 31, issue 1, s. 77-88. DOI: 10.1016/0043-1648(75)90123-4.
- [16] BEAGLEY, T.M., I.J. MCEWEN a C. PRITCHARD. Wheel/rail adhesion — the influence of railhead debris. *Wear*. 1975, vol. 33, issue 1, s. 141-152. DOI: 10.1016/0043-1648(75)90230-6.
- [17] BEAGLEY, T.M. a C. PRITCHARD. Wheel/rail adhesion — the overriding influence of water. *Wear*. 1975, vol. 35, issue 2, s. 299-313. DOI: 10.1016/0043-1648(75)90078-2.
- [18] GALLARDO-HERNANDEZ, E.A., R. LEWIS a R.S. DWYER-JOYCE. Temperature in a twin-disc wheel/rail contact simulation. *Tribology International*. 2006, vol. 39, issue 12, s. 1653-1663. DOI: 10.1016/j.triboint.2006.01.028.
- [19] KOKER, J. D. Temperature and wear of rails on railway track. *Civil Engineering: Magazine of the South African Institution of Civil Engineering*, 2008, 16(5), 8-14.
- [20] BAEK, Koan-Sok, Keiji KYOGOKU. An experimental study of transient traction characteristics between rail and wheel under low slip and low speed conditions. *Wear*. 2008, vol. 265, 9-10, s. 1417-1424. DOI: 10.1016/j.wear.2008.02.044.
- [21] NAGASE, K., HAYASHY, O., NOMURA, T. Influence of atmospheric conditions upon adhesion between rails and running wheels, *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., Ser. C63* (1997) 246–251 (Japonsky).
- [22] BAEK, Koan-Sok, Keiji KYOGOKU a Tsunamitsu NAKAHARA. An experimental investigation of transient traction characteristics in rolling–sliding wheel/rail contacts under dry–wet conditions. *Wear*. 2007, vol. 263, 1-6, s. 169-179. DOI: 10.1016/j.wear.2007.01.067.
- [23] 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, vol. 271, 1-2, s. 32-39. DOI: 10.1016/j.wear.2010.10.022.
- [24] CHEN, H., T. BAN, M. ISHIDA a T. NAKAHARA. Experimental investigation of influential factors on adhesion between wheel and rail under wet conditions. *Wear*. 2008, vol. 265, 9-10. DOI: 10.1016/j.wear.2008.02.034.
- [25] LEWIS, R, E.A. GALLARDO-HERNANDEZ, T. HILTON. Effect of oil and water mixtures on adhesion in the wheel/rail contact. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2009-5-1, vol. 223, issue 3, s. 275-283. DOI: 10.1243/09544097JRRRT248.

- [26] KUMAR, S., P. K. KRISHNAMOORTHY a D. L. PRASANNA RAO. Wheel-Rail Wear and Adhesion With and Without Sand for a North American Locomotive. *Journal of Engineering for Industry*. 1986, vol. 108, issue 2, s. 141-. DOI: 10.1115/1.3187049.
- [27] OHYAMA, Tadao. Tribological studies on adhesion phenomena between wheel and rail at high speeds. *Wear*. 1991, vol. 144, 1-2, s. 263-275. DOI: 10.1016/0043-1648(91)90019-Q.
- [28] 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*. 2011, vol. 271, 9-10, s. 2693-2698. DOI: 10.1016/j.wear.2010.12.019.
- [29] WANG, W.J., P. SHEN, J.H. SONG, J. GUO, Q.Y. LIU a X.S. JIN. Experimental study on adhesion behavior of wheel/rail under dry and water conditions. *Wear*. 2011, vol. 271, 9-10, s. 2699-2705. DOI: 10.1016/j.wear.2011.01.070.
- [30] WANG, W.J., H. WANG, H.Y. WANG, J. GUO, Q.Y. LIU, M.H. ZHU a X.S. JIN. Sub-scale simulation and measurement of railroad wheel/rail adhesion under dry and wet conditions. *Wear*. 2012. DOI: 10.1016/j.wear.2012.12.014.
- [31] NAGASE, K. A study of adhesion between the rails and running wheels on main lines: results of investigations by slipping adhesion test bogie. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 1989-1996 (vols 203-210)*. 1989-6-1, vol. 203, issue 16, s. 33-43. DOI: 10.1243/PIME_PROC_1989_203_206_02.
- [32] ZHU, Y., U. OLOFSSON a K. PERSSON. Investigation of factors influencing wheel-rail adhesion using a mini-traction machine. *Wear*. 2012, 292-293, s. 218-231. DOI: 10.1016/j.wear.2012.05.006.
- [33] CHEN, H., T. BAN, M. ISHIDA a T. NAKAHARA. Adhesion between rail/wheel under water lubricated contact. *Wear*. 2002, vol. 253, 1-2, s. 75-81. DOI: 10.1016/S0043-1648(02)00085-6.
- [34] CHEN, H., M. ISHIDA a NAKAHARA. Analysis of adhesion under wet conditions for three-dimensional contact considering surface roughness. *Wear*. 2005, vol. 258, 7-8, s. 1209-1216. DOI: 10.1016/j.wear.2004.03.031.
- [35] 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*. 2004-1-1, vol. 218, issue 3, s. 235-242. DOI: 10.1243/0954409042389364.

- [36] LI, Z., O. ARIAS-CUEVAS, R. LEWIS a E. A. GALLARDO-HERNÁNDEZ. Rolling–Sliding Laboratory Tests of Friction Modifiers in Leaf Contaminated Wheel–Rail Contacts. *Tribology Letters*. 2009, vol. 33, issue 2, s. 97-109. DOI: 10.1007/s11249-008-9393-3.
- [37] CANN, P.M. The “leaves on the line” problem – a study of leaf residue film formation and lubricity under laboratory test conditions. *Tribology Letters*. 2006-11-13, vol. 24, issue 2, s. 151-158. DOI: 10.1007/s11249-006-9152-2.
- [38] ARIAS-CUEVAS, O. a Z. LI. Field investigations into the adhesion recovery in leaf-contaminated wheel-rail contacts with locomotive sanders. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2011-08-19, vol. 225, issue 5, s. 443-456. DOI: 10.1177/2041301710394921.
- [39] JOHNSON, T. *Understanding aerodynamic influences of vehicle design on wheel/rail leaf contamination*. London: Rail Safety and Standards Board (T546). 2006.
- [40] OLOFSSON, U. A multi-layer model of low adhesion between railway wheel and rail. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2007-1-1, vol. 221, issue 3, s. 385-389. DOI: 10.1243/09544097JRRT111.
- [41] LEWIS, R. a J. MASING. Static wheel/rail contact isolation due to track contamination. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2006-1-1, vol. 220, issue 1, s. 43-53. DOI: 10.1243/095440906X77919.
- [42] ARIAS-CUEVAS, O. *Low Adhesion in the Wheel-Rail Contact: Investigations towards a better understanding of the problem and its possible countermeasures*. Delf: Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, 2010. 293 s. ISBN 978-90-8570-588-8.
- [43] Performance and installation criteria for sanding systems – Summary report. London: Rail Safety and Standards Board (T797). 2013.
- [44] KOTRBA A., VAŠÍČEK J. *Nová pískovací zařízení na hnacích vozidlech typu KOVA-03D*. Nová železniční technika, 1/2009.
- [45] CHOVANEC, F. *Návrh podvozku řídicího vozu pro regionální dopravu*. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2009. 85 s.
- [46] Pokyn provozovatele dráhy pro zajištění plynulé a bezpečné drážní dopravy č. 1/2008. Praha: Správa železniční dopravní cesty, státní organizace, 2008. Dostupné z: < http://www.vlaky.net/upload/images/reports/002733/08-34741_Pokyn_PD_p%C3%ADskov%C3%A1n%C3%AD.pdf>.

- [47] ARIAS-CUEVAS, Oscar, 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*. 2011, vol. 271, 1-2, s. 14-24. DOI:10.1016/j.wear.2010.10.050.
- [48] ROZHODNUTÍ KOMISE ze dne 28. března 2006. Norma TSI-EU (oznámeno pod číslem K(2006) 964) o technické specifikaci pro interoperabilitu týkající se subsystému „Provoz a řízení dopravy“ transevropského konvenčního železničního systému (2006/679/ES).
- [49] GM/RT2461. Sanding: Equipment Fitted to Multiple Units and On-Track Machines. London: Rail Safety and Standards Board. 2001.
- [50] 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*. 2006-1-1, vol. 220, issue 1, s. 29-41. DOI: 10.1243/095440905X33260.
- [51] HALLIDAY, N., UDEH, G. *Understanding the current use of sander on multiple units*. London: Rail Safety and Standards Board (T796). 2009.
- [52] ARIAS-CUEVAS, O., LI a R. LEWIS. Investigating the Lubricity and Electrical Insulation Caused by Sanding in Dry Wheel–Rail Contacts. *Tribology Letters*. 2010, vol. 37, issue 3, s. 623-635. DOI: 10.1007/s11249-009-9560-1.
- [53] ARIAS-CUEVAS, O., Z. LI, LEWIS a E.A. GALLARDO-HERNANDEZ. Laboratory investigation of some sanding parameters to improve the adhesion in leaf-contaminated wheel–rail contacts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2010-1-1, vol. 224, issue 3, s. 139-157. DOI: 10.1243/09544097JRRT308.
- [54] LEWIS, R., R.S. DWYER-JOYCE a J. LEWIS. Disc machine study of contact isolation during railway track sanding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2003-1-1, vol. 217, issue 1, s. 11-24. DOI: 10.1243/095440903762727311.
- [55] WANG, W.J., T.F. LIU, H.Y. WANG, Q.Y. LIU, M.H. ZHU a X.S. JIN. Influence of friction modifiers on improving adhesion and surface damage of wheel/rail under low adhesion conditions. *Tribology International*. 2014, vol. 75, s. 16-23. DOI: 10.1016/j.triboint.2014.03.008.
- [56] DWYER-JOYCE, R.S., LEWIS, R., GAO, N., GRIEVE, D.G. Wear and Fatigue of Railway Track Caused by Contamination, Sanding and Surface Damage. 2003, Proceedings of 6th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2003), Gothenburg, Sweden, s. 211-220.
- [57] ČESKÁ REPUBLIKA. *Metodika hodnocení výsledků výzkumných organizací a hodnocení výsledků ukončených programů*. Praha, 2013.

- [58] GALAS, R. Konstrukce experimentálního zařízení pro studium pískování kolejových vozidel. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 102 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Šperka, Ph.D.
- [59] ČSN EN 13 262+A2. *Železniční aplikace - dvojkolí a podvozky - Kola - Požadavky na výrobek*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [60] ČSN EN 13674-2+A1. *Železniční aplikace – Kolej – Kolejnice – Část 2: Kolejnice pro výhybky a výhybkové konstrukce používané s Vignolovými železničními kolejnicemi o hmotnosti 46 kg/m a větší*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Seznam zkratk

ČSN	Česká technická norma
FEM	Finite Element Method
FM	Friction Modifier
FSI	Fakulta Strojního Inženýrství
HPF	High Positive Friction
LCF	Low Coefficient of Friction
MTM	Mini Traction Machine
RSSB	Rail Safety and Standards Board
TA	Technologická Agentura
TSI	Technical Specifications for Interoperability
SUROS	Sheffield University Rolling Sliding
SŽDC	Správa Železniční Dopravní Cesty
VHPF	Very High Positive Friction

Seznam symbolů a veličin

Q [N]	- normálová síla
R [m]	- poloměr kola
s [1]	- relativní skluz
T [N]	- tečná síla přenášená kontaktem
v [m·s ⁻¹]	- dopředná rychlost
w [m·s ⁻¹]	- skluzová rychlost
μ [1]	- součinitel adheze
ω [rad·s ⁻¹]	- úhlová rychlost kola

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Seznam obrázků

Obr. 0-1 Kontakt kolo/kolejnice a základní pojmy – upraveno [1]	14
Obr. 1-1 a) kontaktní plocha, b) rychlosti a síly působící při odvalování kola po kolejnici	15
Obr. 1-2 Adhezní charakteristika (trakční křivka)	16
Obr. 1-3 Vliv rychlosti na adhezi za suchých podmínek [5]	17
Obr. 1-4 Adhezní charakteristiky kontamino-vaného kontaktu [6]	17
Obr. 1-5 Závislost součinitele tření na skluzu při použití různých modifikátorů tření – upraveno [7]	18
Obr. 1-6 Ruční tribometr firmy Salient Systems [8]	19
Obr. 1-7 Příklad zařízení wheel-on-rail [10]	19
Obr. 1-8 Příklad dvoudiskového zařízení twin-disc SUROS [6]	20
Obr. 1-9 Kontaminační komora – upraveno [6]	20
Obr. 1-10 Vliv teploty na adhezi (μ_s – ustálená hodnota součinitele adheze) [20]	21
Obr. 1-11 Vliv teploty na adhezi při vlhkosti 55 % [21]	21
Obr. 1-12 Vliv rychlosti na adhezi při kontaminaci vodou [5]	22
Obr. 1-13 Vlhkost ovlivňující adhezi [20]	22
Obr. 1-14 Velikost adheze při kontaminaci vodou, olejem, emulzí (50% vody a 50% oleje) [28]	23
Obr. 1-15 Změna adheze při přidání listů a následné aplikaci pískování [6]	23
Obr. 1-16 Vrstvy z listů vytvořené na discích twin-disc zařízení (a) suché podmínky (b, c) mokré podmínky – upraveno [6]	24
Obr. 1-17 Schéma aplikace písku pískovacím zařízením	25
Obr. 1-18 Pískovací zařízení firmy Tribotec KOVA-03D [45]	25
Obr. 1-19 Adheze při pískování mokrého kontaktu [55]	27
Obr. 1-20 Adheze při pískování kontaktu s přítomností oleje [55]	27
Obr. 1-21 Vliv velikosti zrn na adhezi i elektrickou izolaci – upraveno [52]	28
Obr. 1-22 Schematické znázornění vstupu různě velkých zrn písku do kontaktu – upraveno [52]	28
Obr. 1-23 Vliv různého celkového množství aplikovaného písku na adhezi (množství řazené vzestupně: m1, m2, m3) [53]	29
Obr. 1-24 Vliv pískování na opotřebení [50]	30
Obr. 1-25 Vliv zrnitosti písku a velikosti skluzu na el. izolaci – upraveno [52]	30
Obr. 2-1 Schematické znázornění funkce pískovacího systému	35
Obr. 3-1 Odečtení velikosti adheze (extrakt z listů)	39
Obr. 3-2 Porovnání nárůstu adheze (extrakt z listů)	39
Obr. 3-3 Porovnání nárůstu adheze při různých skluzech (extrakt z listů)	39
Obr. 3-4 Schéma hlavního rámu s disky a popisem jednotlivých komponent	40
Obr. 3-6 Detail kontaktu s tryskou pro pískování [58]	41
Obr. 3-5 Dvoudiskové experimentální zařízení [58]	41
Obr. 3-7 Schéma měřicího a řídicího řetězce [58]	42
Obr. 3-8 Kontaktní tělesa spolu s kontaktní plochou	43
Obr. 3-9 Fáze přípravy směsi listů	45
Obr. 3-10 Extrakt z listů	46
Obr. 3-11 Pískovací materiál v testovaných množstvích (3, 5, 7, 10, 15) g	47

Obr. 3-12	Schéma aplikace kontaminantů a pískování	49
Obr. 4-1	Průběh adheze při různé velikosti skluzu	51
Obr. 4-2	Adhezní charakteristiky a jejich závislost na rychlosti	51
Obr. 4-3	Průběh adheze při různém tlaku a skluzu	52
Obr. 4-4	Vliv kontaminantů na adhezi	53
Obr. 4-5	Adhezní charakteristiky za různých podmínek	53
Obr. 4-6	Průběh adheze při různém množství vody	53
Obr. 4-7	Adhezní charakteristiky a jejich závislost na rychlosti při tlaku 0,8 GPa	53
Obr. 4-8	Adhezní charakteristiky a jejich závislost na rychlosti při tlaku 1 GPa	54
Obr. 4-9	Adhezní charakteristiky a jejich závislost na rychlosti při tlaku 1,2 GPa	54
Obr. 4-10	Průběh adheze při aplikaci listů	55
Obr. 4-11	Vliv směsi listů na průběh adheze	55
Obr. 4-12	Směs listů aplikovaná na disk kolejničky	55
Obr. 4-13	Disk kolejničky po experimentu spolu s vytvořenou vrstvou z listů	56
Obr. 4-14	Průběh adheze za nízkého skluzu 1 %	56
Obr. 4-15	Průběh adheze při různých skluzech	56
Obr. 4-16	Adhezní charakteristiky a jejich závislost na rychlosti	56
Obr. 4-17	Průběh adheze při aplikaci extraktu z listů	57
Obr. 4-18	Vliv chlazení na průběh adheze	58
Obr. 4-19	Procentuální nárůst adheze pro různé kontaminanty	59
Obr. 4-20	Průběh adheze s opětovnou aplikací písku při kontaminaci mokřím listím	59
Obr. 4-21	Detail povrchu poškozeného pískováním a) po 5ti experimentech; b) před výměnou disků	59
Obr. 4-22	Povrch disku kolejničky po 5ti experimentech s pískováním	60
Obr. 4-23	Průběh adheze a vliv množství písku	60
Obr. 4-24	Průběh adheze s vlivem rychlosti	60
Obr. 4-25	Změna adheze (1 m/s, 1 %)	61
Obr. 4-26	Změna adheze (1 m/s, 5 %)	61
Obr. 4-27	Změna adheze (1 m/s, 10 %)	61
Obr. 4-28	Změna adheze u menšího množství vody 11 ml/min (1 m/s, 3 %)	61
Obr. 4-29	Změna adheze (3 m/s, 1 %)	62
Obr. 4-30	Změna adheze (3 m/s, 3 %)	62
Obr. 4-31	Změna adheze (3 m/s, 5 %)	62
Obr. 4-32	Změna adheze (3 m/s, 10 %)	62
Obr. 4-33	Nárůst adheze (1 m/s)	63
Obr. 4-34	Nárůst adheze (3 m/s)	63
Obr. 4-35	Průběh adheze při různé velikosti skluzu	64
Obr. 4-36	Změna adheze (1 m/s, 1 %)	64
Obr. 4-37	Změna adheze (1 m/s, 3 %)	64
Obr. 4-38	Změna adheze (1 m/s, 5 %)	64
Obr. 4-39	Změna adheze (3 m/s, 1 %)	65
Obr. 4-40	Změna adheze (3 m/s, 3 %)	65
Obr. 4-41	Změna adheze (3 m/s, 5 %)	65
Obr. 4-42	Nárůst adheze (1 m/s)	65
Obr. 4-43	Nárůst adheze (3 m/s)	65
Obr. 4-44	Povrch disku kola po pískování listím kontaminovaného kontaktu	66
Obr. 4-45	Průběh adheze ukázka vlivu množství písku	66

Obr. 4-46 Změna adheze (1 m/s, 3 %)	67
Obr. 4-47 Změna adheze (1 m/s, 5 %)	67
Obr. 4-48 Změna adheze (3 m/s, 3 %)	67
Obr. 4-49 Změna adheze (3 m/s, 5 %)	67
Obr. 4-50 Disk kolejnice po experimentu	68
Obr. 4-51 Disk kola po experimentu	68
Obr. 4-52 Průběh adheze s vlivem malého množství písku	68
Obr. 4-53 Změna adheze (1 m/s, 3 %)	69
Obr. 4-54 Změna adheze (3 m/s, 3 %)	69
Obr. 4-55 Disk kolejnice po experimentu	69
Obr. 4-56 Disk kola se shluky částic písku	70
Obr. 5-1 Průběh adheze při kontaminaci vodou – upraveno [55]	77

Seznam tabulek

Tab. 1-1 Rozdělení adheze [12, 13]	20
Tab. 3-1 Materiálové vlastnosti kontaktních těles [59, 60]	43
Tab. 3-2 Specifikace použitého maziva	44

PŘÍLOHY

Fotografie disku kolejniče po experimentech s pískováním



Kontaminace mokým listím



Listový extrakt



Mazivo pro mazání okolků