VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

VLIV KLIMATICKÝCH PODMÍNEK NA ADHEZI V KONTAKTU KOLA A KOLEJNICE
THE EFFECT OF CLIMATE CONDITIONS ON WHEEL-RAIL CONTACT ADHESION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Bc. Rostislav Nohel**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **Ing. Milan Omasta, Ph.D.**
SUPERVISOR

BRNO 2017

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	**Bc. Rostislav Nohel**
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce:	**Ing. Milan Omasta, Ph.D.**
Akademický rok:	2016/17

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:

Vliv klimatických podmínek na adhezi v kontaktu kola a kolejnice

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tření v kontaktu kola a kolejnice je v reálných podmínkách značně ovlivněno klimatickými podmínkami, zejména vlhkostí, teplotou a souvisejícím výskytem rosného bodu. Přítomnost vlhkosti dále umocňuje vliv dalších přirozených kontaminantů. Pro vývoj systémů pro řízení adheze je nezbytná znalost vlivu klimatických podmínek, kontaminantů a jejich kombinací.

Typ práce: výzkumná
Projekt: TAČR

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem je experimentálně stanovit vliv a vzájemné vazby vlhkosti a teploty a přirozených kontaminantů na adhezi kontaktu kola a kolejnice. Účelem je vytvoření vztahů pro predikci tření v kontaktu a řízení mazacích a pískovacích systémů.
Dílčí cíle diplomové práce:
- prostudovat dostupné literární zdroje a navrhnout plán experimentů v laboratorních podmínkách,
- realizovat a vyhodnotit sérii experimentů,
- sestavit empirické vztahy pro odhad adheze na základě znalosti vlhkosti a teploty,
- připravit publikaci výsledků.

Požadované výstupy: publikace, průvodní zpráva.
Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 - 50 stran textu bez obrázků).
Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:
http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf

Seznam literatury:

STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. Engineering tribology. 3rd ed. Boston: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 07-506-7836-4.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 4. 11. 2016

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
DĚKANÁT

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Předložená diplomová práce je zaměřena na experimentální výzkum vlivu klimatických podmínek na adhezi kontaktu kola a kolejnice, kde klimatickými podmínkami jsou myšleny dva parametry, a to teplota okolního vzduchu a vzdušná vlhkost. Tyto parametry vždy působí na kontakt kola a kolejnice, přičemž jejich hodnoty se během ročních období výrazně mění. Prezentovaný experimentální výzkum byl proveden na tribometru Mini Traction Machine (MTM) v konfiguraci „ball on disc“. Pro stanovení vlivu klimatických podmínek byl nejprve zjišťován vliv vzdušné vlhkosti na adhezi při určitých teplotách vzduchu, které se pohybovaly v rozsahu (1 až 50) °C. Tyto experimenty byly provedeny pro dva typy disků, přičemž jeden disk byl vystaven kontaminaci listovým extraktem. Poté byl sestaven vliv obou parametrů (vzdušné vlhkosti a teploty okolního vzduchu) na adhezi v podobě 3D mapy, přičemž byly rozlišeny stavy, kdy došlo a nedošlo ke kondenzaci. Získané výsledky v této práci budou použity pro optimalizaci řídících systémů kolejových vozidel.

KLÍČOVÁ SLOVA

Adheze, klimatické podmínky, teplota, vzdušná vlhkost, kolo, kolejnice

ABSTRACT

Presented master’s thesis is focused on the experimental research of influence of climate conditions on wheel-rail adhesion, where climate conditions are meant two parameters: ambient air temperature and air humidity. These parameters always affect wheel-raid contact and their values change significantly during the year. For presented experimental research was used tribometer Mini Traction Machine (MTM) in configuration „ball on disc“. For determination of influence climate conditions was first found out the influence of air humidity on adhesion at certain temperatures, which varied between (1 to 50) °C. These experiments were performed for two types of discs, where one disc was exposed to leaf extract contamination. After that was assembled influence of both parameters (air humidity and ambient air temperature) on adhesion in the form of a 3D map, where were distinctioned states, when condensation has occured and when didn‘t. Obtained results in this thesis will be used for optimalization of rail vehicle control systems.

KEY WORDS

Adhesion, climate conditions, temperature, air humidity, wheel, rail

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NOHEL, R. *Vliv klimatických podmínek na adhezi v kontaktu kola a kolejnice.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 85 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Milan Omasta, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že předloženou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením Ing. Milana Omasty, Ph.D. a všechny literární zdroje, ze kterých jsem čerpal, jsem uvedl v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 19. května 2017 ……..

Rostislav Nohel

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat především Ing. Milanovi Omastovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi velice pomohly při tvorbě diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat mé rodině za podporu během celého studia.

OBSAH

1 ÚVOD 15
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ 16
2.1 Základní pojmy v kolejové dopravě 16
2.1.1 Adheze 16
2.1.2 Součinitel adheze 16
2.1.3 Skluzová rychlost 17
2.1.4 Kontaktní plocha 18
2.1.5 Adhezní křivka 18
2.1.6 Kontaktní podmínky 19
2.2 Adheze za „suchých“ podmínek 20
2.3 Vliv klimatických podmínek 23
2.3.1 Teplota okolního vzduchu 23
2.3.2 Vzdušná vlhkost 24
2.4 Vliv kontaminace kontaktu 25
2.4.1 Kontaminace vodou 25
2.4.2 Kontaminace olejem 28
2.4.3 Kontaminace listy 30
2.4.4 Kontaminace pískem 32
2.5 „Third body“ systém 34
3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE 35
3.1 Shrnutí poznatků z rešeršní práce 35
3.2 Analýza problému 36
3.3 Podstata a cíl práce 36
3.3.1 Vědecká otázka 36
3.3.2 Pracovní hypotéza 36
3.4 Výstup práce 36
3.5 Odůvodnění nutnosti a potřebnosti řešení 37
4 MATERIÁL A METODY 38
4.1 Metody 38
4.1.1 Mini Traction Machine (MTM) 38
4.1.2 Temperační jednotka Haake K41 39
4.1.3 Zařízení pro regulaci vzdušné vlhkosti 40
4.2 Materiál 41
4.2.1 Kontaktní tělesa 41
4.2.2 Kontaminanty 41
4.2.3 Postup přípravy vzorku 42
4.3 Plán experimentů a experimentální podmínky 43
5 VÝSLEDKY 46
5.1 „Suché“ podmínky 46
5.2 Vliv kontaminace 46
5.2.1 Plně zaplavený kontakt vodou – vliv rychlosti 46
5.2.2 Plně zaplavený kontakt vodou – vliv teploty 47
5.2.3 Dávkování vody do kontaktu – vliv množství 48
5.2.4 Dávkování vody do kontaktu – vliv rychlosti 49
5.2.5 Dávkování listového extraktu do kontaktu – vliv množství 49

5.3 Vliv klimatických podmínek 50
5.3.1 Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 1 °C 50
5.3.2 Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 10 °C 51
5.3.3 Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 24 °C 53
5.3.4 Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 40 °C 54
5.3.5 Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 50 °C 55
5.3.6 Závislost součinitele adheze na relativní vlhkosti vzduchu 56
5.3.7 Závislost součinitele adheze na absolutní vlhkosti vzduchu 57
5.3.8 3D mapy (čistý disk) 60
5.3.9 3D mapy (kontaminovaný disk) 61
6 DISKUZE 63
6.1 Uvažovaná zjednodušení a vliv na výsledky 63
6.2 Shrnutí nejdůležitějších poznatků 64
6.3 Vědecká otázka a ověření hypotézy 65
6.4 Predikce výskytu rosného bodu 65
6.5 Diskuze a srovnání s již publikovanými výsledky 67
7 ZÁVĚR 69
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 70
9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN 74
10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ 76
11 SEZNAM TABULEK 78
12 SEZNAM PŘÍLOH 79

1 ÚVOD

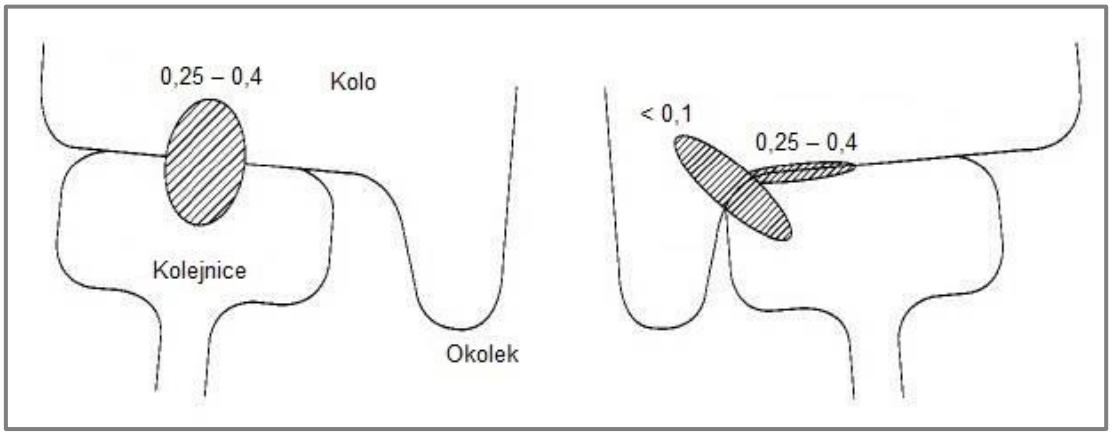
Kolejová doprava patří mezi efektivní způsob přepravy osob a nákladu na dlouhé i krátké vzdálenosti. Mezi její výhody patří zejména nízká energetická náročnost, rychlost a vysoká přepravní kapacita. Další výhodou je environmentální nezávadnost, protože ve srovnání se silniční dopravou má kolejová doprava výrazně nižší dopad na životní prostředí, a proto se úspěšně používá i jako prostředek hromadné dopravy ve městech. Mezi rozhodující parametry v železniční dopravě patří efektivnost, spolehlivost a velikost provozních nákladů. Tyto parametry ovlivňuje především kontakt kola s pojížděným povrchem (kolejnice) a valivý odpor. Kolejová doprava je charakteristická především velmi malým valivým odporem, což je klíčem jejího úspěchu.

Pohyb železničního vozidla po kolejích umožňují třecí podmínky kontaktu kola a kolejnice, a to při rozjezdu i brzdění. Při pohybu kolejového vozidla po přímé trati nastává kontakt mezi hlavou kolejnice a jízdní plochou kola. Jestliže se vozidlo pohybuje po oblouku, pak nastává navíc kontakt mezi pojížděnou plochou kolejnice a okolkem kola. V tomto případě se jedná o tzv. *dvoubodový kontakt* (obr. 1-1).

Optimální hodnota tření (adheze) při pohybu po přímé trati mezi hlavou kolejnice a jízdní plochou kola pro bezpečnost je v kolejové dopravě uvažována v rozsahu (0,25 až 0,4). Pokud navíc nastane kontakt pojížděné plochy kolejnice s okolkem kola, pak hodnota tření musí být nižší než 0,1 [1]. V opačném případě by mohlo dojít k nadměrnému opotřebení kola i kolejnice.

Hodnoty adheze jsou výrazně ovlivňovány klimatickými podmínkami (okolní teplota a vzdušná vlhkost) a přítomností kontaminantů, které se mohou běžně vyskytovat na železniční trati. Významným problémem je zpravidla přítomnost listí v podzimním období, které může v kontaktu působit jako mazivo, čímž dojde ke ztrátě adheze. Vlivem ztráty adheze může dojít k výraznému prodloužení brzdné dráhy, což je z hlediska bezpečnosti nepřijatelné.

Diplomová práce se zabývá adhezí kontaktu kola a kolejnice za různých klimatických podmínek. Práce by měla vytvořit predikční vztahy, které budou dále využívány pro aktivní systémy řízení adheze.



Obr. 1-1 Optimální hodnoty tření v kontaktu kola a kolejnice [1]

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Základní pojmy v kolejové dopravě

2.1.1 Adheze

Adheze je v kolejové dopravě definována jako schopnost přenosu trakčních či brzdných sil z kola na kolejnici. Při adhezi se uplatňují tři fyzikální jevy a to valení, skluz a spin (vrtné tření), který je pro zjednodušení zanedbáván [2]. Míra adheze je ovlivňována řadou faktorů, jako je např. přítomnost vody a nečistot v kontaktu.

2.1.2 Součinitel adheze

Součinitel adheze je bezrozměrná veličina, která se definuje jako podíl třecí a normálové síly (rovnice 2.1). Při průjezdu traťovým obloukem je nezbytné vyjádřit součinitel adheze jako vektorový součet [2]:

$$\boldsymbol{\mu} = \sqrt{\mu_x^2 + \mu_y^2} = \sqrt{\left(\frac{F_{Tx}}{Q}\right)^2 + \left(\frac{F_{Ty}}{Q}\right)^2} \qquad (2.1)$$

kde:

$\boldsymbol{\mu}$	1	je celkový součinitel adheze
μ_x, μ_y	1	– součinitel adheze v ose x, resp. v ose y
F_{Tx}, F_{Ty}	N	– třecí síla v ose x, resp. v ose y
Q	N	– normálová síla působící na kontakt

Součinitel adheze se u většiny kovových materiálů pohybuje mezi hodnotami 0,3 až 1, přičemž jeho velikost silně závisí na okolních či provozních podmínkách. Při suchých podmínkách je možné dosáhnout mezi kolem a kolejnicí hodnoty součinitele adheze 0,3 [1]. K vysokému poklesu adheze může dojít při kontaminaci kontaktu listím (zejména mokrým listím). Vlivem vysokého kontaktního tlaku je listí v kontaktu drceno, což vede k uvolňování tzv. *pektinu*. Pektin je látka, která působí jako mazivo. V takovém případě může součinitel adheze klesnout až na hodnotu 0,07 (tab. 1) [1]. Adhezi lze zvýšit za pomocí pískování, což je proces, při kterém se do kontaktu kola a kolejnice přivádí směs písku a vzduchu, a to buď mechanicky, nebo elektropneumaticky.

Tab. 1 Hodnoty součinitele adheze při různých povrchových podmínkách [1]

Povrchové podmínky koleje	Součinitel adheze
Suchá kolej	0,25 – 0,30
Mokrá kolej	0,18 – 0,20
Mokrá kolej s pískem	0,22 – 0,25
Kolej s plastickým mazivem	0,15 – 0,18
Sníh na koleji	0,10
Sníh na koleji s pískem	0,15
Mokré listí na koleji	0,07

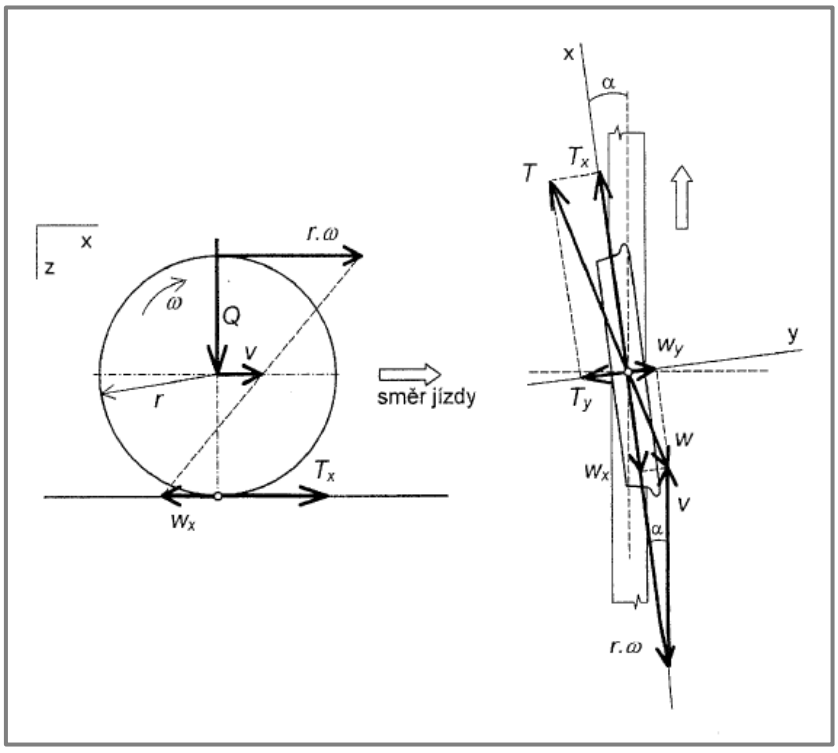
2.1.3 Skluzová rychlost

Skluzová rychlost je zpravidla definována jako rozdíl mezi obvodovou rychlostí kola a dopřednou rychlostí vozidla. Stejně jako v případě součinitele adheze je i zde při průjezdu traťovým obloukem nezbytné vyjádřit skluzovou rychlost jako vektorový součet (rovnice 2.2) [2]:

$$\mathbf{w} = \sqrt{w_x^2 + w_y^2} = \sqrt{(r \cdot \omega - v \cdot \cos\alpha)^2 + (v \cdot \sin\alpha)^2} \qquad (2.2)$$

kde:

w	$m \cdot s^{-1}$	je celková skluzová rychlost
w_x, w_y	$m \cdot s^{-1}$	– skluzová rychlost v ose x, resp. v ose y
r	m	– poloměr kola
ω	$rad \cdot s^{-1}$	– úhlová rychlost kola
v	$m \cdot s^{-1}$	– dopředná rychlost vozidla
α	°	– úhel náběhu (úhel mezi podélnou osou kola a osou kolejnice v místě styku)



Obr. 2-1 Rychlosti a silové působení na pohybujícím se kole [2]

V kolejové dopravě se často používá pojem *relativní skluz*, což je skluzová rychlost vyjádřená bezrozměrně (rovnice 2.3), nebo v procentech [2]:

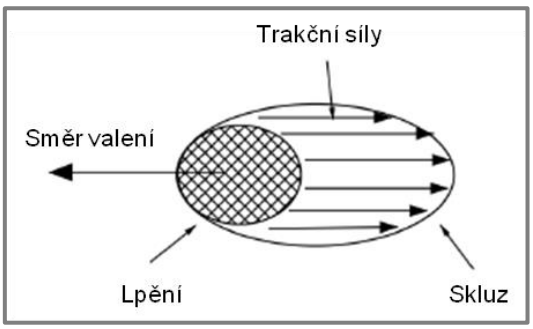
$$\mathbf{s} = \sqrt{s_x^2 + s_y^2} = \sqrt{\left(\frac{w_x}{v}\right)^2 + \left(\frac{w_y}{v}\right)^2} \qquad (2.3)$$

kde:

s	1	je celkový relativní skluz
s_x, s_y	1	– relativní skluz v ose x, resp. v ose y

2.1.4 Kontaktní plocha

Kontaktní plocha mezi kolem a kolejnicí je pro zjednodušení uvažována jako elipsa, jejíž hlavní poloosa je orientována ve směru jízdy vozidla. Kontaktní plochu lze rozdělit na dvě části, a to na oblast *lpění* a *skluzu* (obr. 2-2). Oblast lpění je tvořena mikrosvary a vzniká na náběžné straně. Povrchy kola a kolejnice se zde odvalují bez vzájemného posuvu. Oblast skluzu zajišťuje přenos trakčních sil z kola na kolejnici. V tomto případě již dochází ke vzájemnému posuvu obou povrchů [3].



Obr. 2-2 Kontaktní plocha [3]

Velikost kontaktní plochy a velikost tlaku (rovnice 2.4) lze vypočítat pomocí Hertzovy teorie [1].

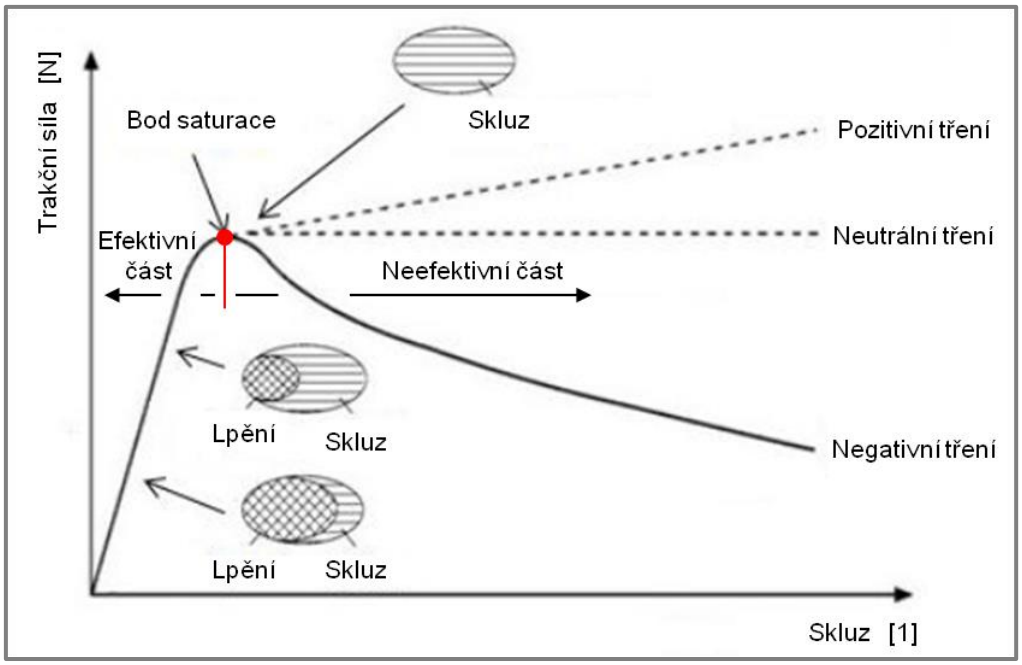
$$p = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot Q \cdot E^2}{2 \cdot \pi^3 \cdot R^2 \cdot (1-\upsilon)^2}} \tag{2.4}$$

kde:

p	MPa	je maximální Hertzův tlak
E	MPa	– redukovaný modul pružnosti
R	mm	– redukovaný poloměr křivosti
υ	1	– Poissonovo číslo

2.1.5 Adhezní křivka

Adheze v kontaktu kola a kolejnice se zpravidla zjišťuje experimentálním měřením. Pro následné vyhodnocení se používá adhezní (trakční) křivka, která je běžně sestrojována z jednotlivých bodů měření. Jedná se o závislost součinitele adheze (trakční síly) na skluzové rychlosti (relativním skluzu). Důležitou částí křivky je tzv. *bod saturace*, který rozděluje trakční křivku na efektivní a neefektivní část (obr. 2-3). Se zvyšující se trakční silou v efektivní části křivky dochází k zániku oblasti lpění, přičemž se zvětšuje oblast skluzu. Po dosažení bodu saturace zcela zanikne oblast lpění a celá kontaktní plocha se ocitne ve stavu neefektivního skluzu, který je v literatuře často označován jako „*prokluz*“ [1].



Obr. 2-3 Adhezní křivka – upraveno [1]

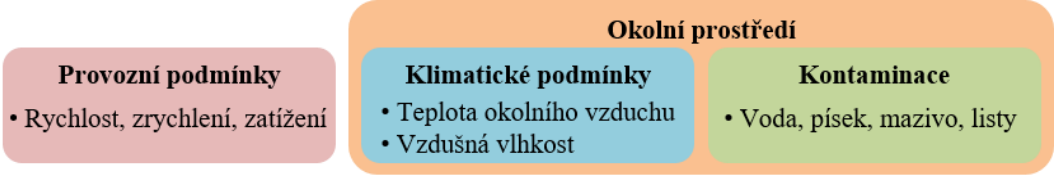
Podle sklonu adhezní křivky za bodem saturace lze rozlišit tři případy tření [1]. Za běžných okolních podmínek (suchý kontakt) má adhezní křivka průběh negativního tření, což znamená, že se zvyšujícím se skluzem dochází k poklesu součinitele adheze. Negativní tření je základním předpokladem pro vznik vlnkovitého opotřebení kolejnic.

Pozitivního tření lze dosáhnout za pomocí tzv. *modifikátoru tření* s pozitivními třecími vlastnostmi. Modifikátor tření je látka, která může mít nízký (LCF), vysoký (HPF), nebo velmi vysoký (VHPF) součinitel tření [1]. Jestliže se jedná o vysoký nebo velmi vysoký součinitel tření, pak modifikátor může být aplikován buď na temeno hlavy kolejnice pomocí stacionárních aplikátorů, nebo přímo na kónickou jízdní plochu kola. V případě kontaktu okolku kola a pojížděné plochy kolejnice se používají jako modifikátory tuhá maziva, která bývají zpravidla aplikována na okolek kola. Tato maziva upravují součinitel tření pod hodnotu 0,15, významně snižují hlučnost a zabraňují nadměrnému opotřebení [4].

2.1.6 Kontaktní podmínky

2.1.6

Kontakt kola a kolejnice je tzv. otevřený tribologický systém, což znamená, že je kontakt vystaven okolnímu prostředí, do kterého jsou zahrnuty klimatické podmínky a kontaminanty. Klimatickými podmínkami se zejména rozumí teplota okolního vzduchu a vzdušná vlhkost. Mezi kontaminanty patří voda, písek, mazivo a listy.

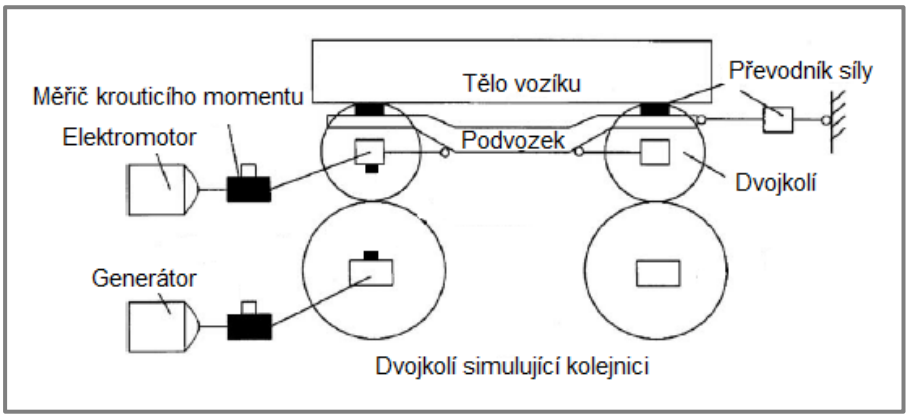


Obr. 2-4 Kontaktní podmínky kola a kolejnice

2.2 Adheze za „suchých“ podmínek

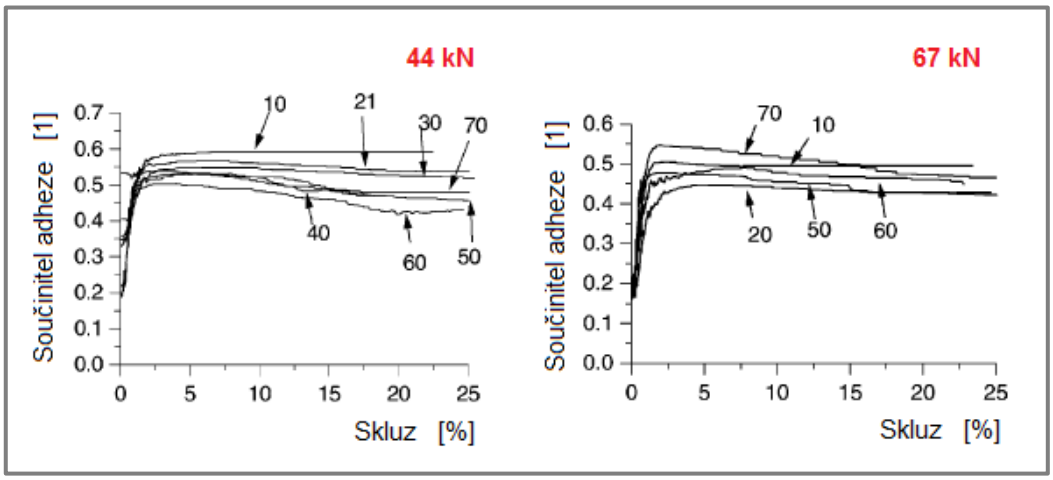
Adhezí za suchých podmínek se zabýval ve své práci [5] **W. Zhang**, [6] **Q.Y Liu** a [7] **Y. Zhu**.

Zhang své experimenty prováděl na zařízení typu *„roller rig“* (obr. 2-5). Hlavní částí tohoto zařízení je vozík se skutečnými železničními koly a jedná se tedy o tzv. *„full scale“* tribometr. Obě dvojkolí vozíku jsou poháněna elektromotorem o výkonu 800 kW, což umožňuje simulovat rychlost až 280 km/h [5]. Kontaktním tělesem železničních kol je dvojkolí, které odpovídá profilu kolejnice s označením UIC 60. Tato dvojkolí jsou připojena na generátor, který je roztáčí v opačném směru vzhledem k hornímu dvojkolí. Tímto způsobem se vytváří brzdný moment.



Obr. 2-5 Experimentální zařízení typu „roller rig“ [5]

Experimenty byly vyhodnocené v podobě adhezních křivek, přičemž aplikované zatížení na nápravu bylo v prvním případě 44 kN a ve druhém případě 67 kN (obr. 2-6).

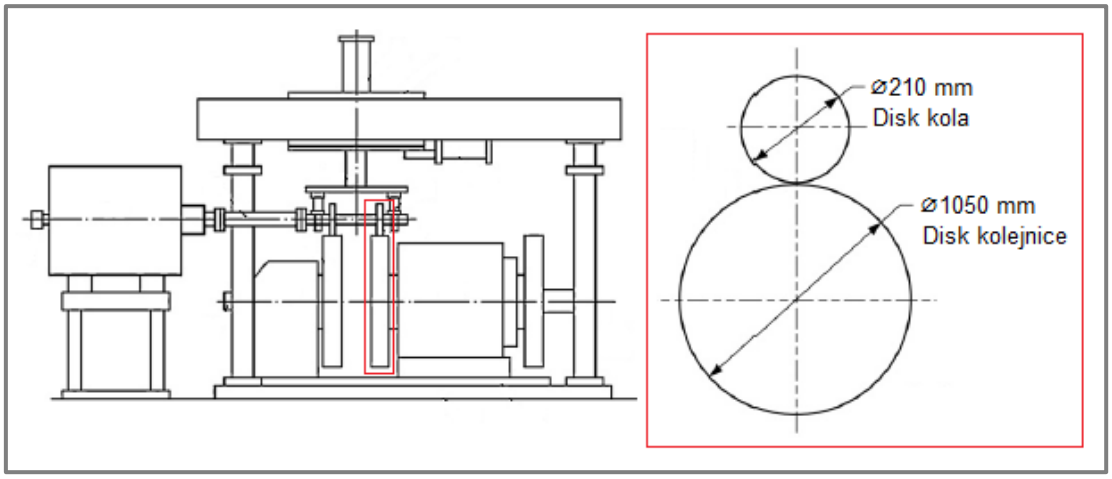


Obr. 2-6 Adhezní křivky za suchých podmínek (roller rig) [5]

Při zatížení 44 kN byl zaznamenán maximální součinitel adheze (bod saturace) kolem hodnoty 0,55, přičemž se tato hodnota nijak významně nelišila pro rozsah testovaných rychlostí (uvedené hodnoty rychlostí jsou v km/h). Naopak při zatížení 67 kN byly maximální hodnoty součinitele adheze pro různé testovací rychlosti zaznamenány

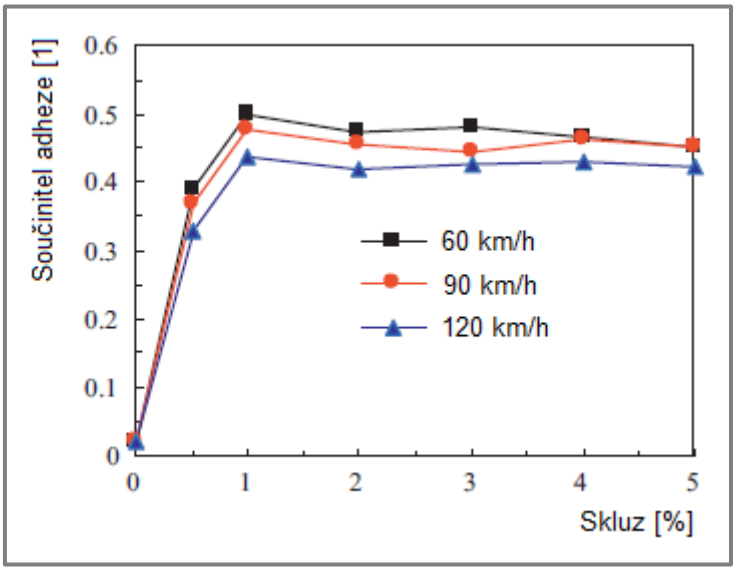
v rozsahu (0,4 až 0,55). Po dosažení bodu saturace bylo zjištěno, že v obou případech dochází k poklesu součinitele adheze se zvyšujícím se skluzem, přičemž ostrý pokles adhezní křivky vykazovaly zejména vyšší rychlosti.

Liu prováděl své experimenty na simulátoru *JD-1*, což je dvoudiskové zařízení, kde disk o průměru 210 mm představuje železniční kolo a disk o průměru 1050 mm představuje kolejnici (obr. 2-7) [6].



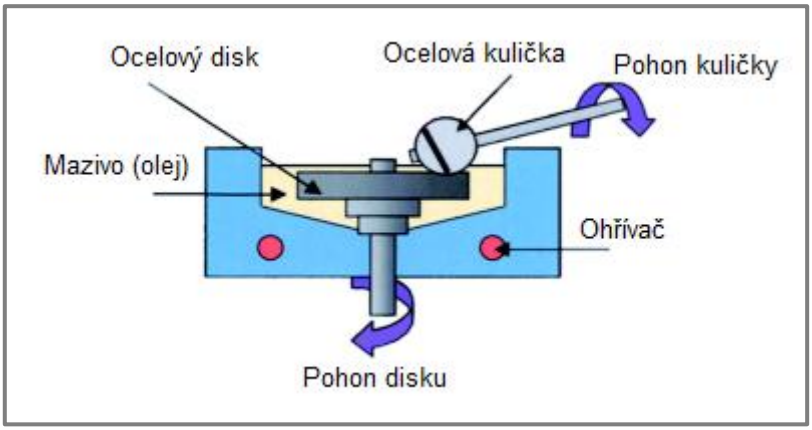
Obr. 2-7 Zařízení JD-1 – upraveno [6]

Experimenty byly provedeny v laboratorních podmínkách, kde teplota okolního vzduchu se pohybovala v rozsahu (18 až 23) °C a vzdušná vlhkost v rozsahu (50 až 70) % RH. Při experimentu byl sledován součinitel adheze v závislosti na relativním skluzu. Testy byly provedeny pro rychlosti (60, 90 a 120) km/h, přičemž aplikované zatížení na nápravu bylo 21 t, což podle Hertzovy teorie odpovídá maximálnímu kontaktnímu tlaku 1 120 MPa. Z výsledků plyne, že se zvyšující se rychlostí dochází ke snížení adheze, a to při všech testovaných hodnot skluzu, přičemž maximální hodnota adheze (0,5) byla naměřena při rychlosti 60 km/h a skluzu 1 % [6].



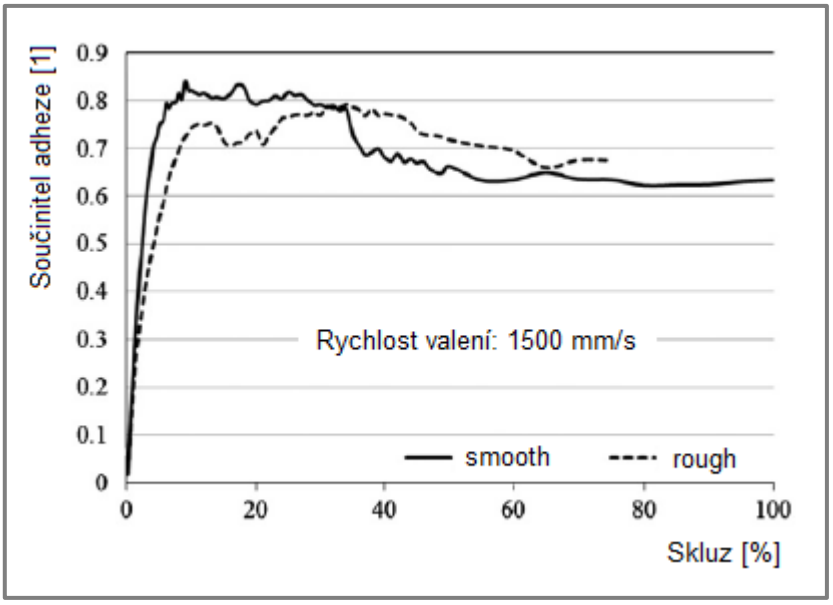
Obr. 2-8 Adhezní křivky za suchých podmínek (JD-1) [6]

Zhu ve své práci experimentálně stanovil adhezní křivku na zařízení *Mini Traction Machine* v konfiguraci *„ball on disc“* (obr. 2-9), přičemž byly uvažovány různé podmínky drsnosti povrchu. Drsnost povrchu byla kvantifikována pomocí parametru R_q, což je průměrná kvadratická úchylka profilu. Hladký povrch (*smooth*) byl kvantifikován tímto parametrem jako R_q = 0,3 µm, zatímco hrubý povrch (*rough*) odpovídal hodnotě R_q = 5 µm [7].



Obr. 2-9 Zařízení MTM v konfiguraci „ball on disc“ – upraveno [8]

Při experimentu byla sledována hodnota součinitele adheze v závislosti na relativním skluzu, přičemž rychlost valení byla 1 500 mm/s a kontaktní tlak odpovídal hodnotě 700 MPa. Z výsledků plyne, že se zvyšující se hodnotou relativního skluzu roste hodnota adheze lineárně, a to až do bodu saturace. Poté se zvyšujícím se skluzem adheze klesá. Nejvyšší hodnota adheze pro hrubý povrch byla zaznamenána 0,8 při skluzu 35 %. Pro hladký povrch byla tato hodnota nepatrně vyšší při skluzu 10 %. Ke konci obou experimentů se adheze pohybovala v rozsahu (0,6 až 0,7) [7]. Experiment s hrubým povrchem musel být ukončen z bezpečnostních důvodů při skluzu 75 %.



Obr. 2-10 Adhezní křivky za suchých podmínek (MTM) [7]

Provedené testy za suchých podmínek na různých laboratorních zařízení vykazují odlišné hodnoty součinitele adheze. Mezi faktory, které tyto hodnoty adheze ovlivňují patří rychlost, zatížení, skluz, drsnost povrchu a především modelové zkreslení experimentálních zařízení. Tab. 2 porovnává adhezi naměřenou za laboratorních podmínek na různých zařízení. Naměřená hodnota adheze se výrazně liší oproti skutečné adhezi mezi kolem a kolejnicí za „suchých“ podmínek, která se pohybuje v rozsahu (0,25 až 0,30) [1].

Tab. 2 Naměřená adheze za suchých podmínek na různých laboratorních zařízení

Experimentální zařízení	Součinitel adheze
Roller rig (44 kN)	0,40 – 0,60
Roller rig (67 kN)	0,40 – 0,55
JD-1	0,40 – 0,50
MTM	0,60 – 0,80

2.3 Vliv klimatických podmínek

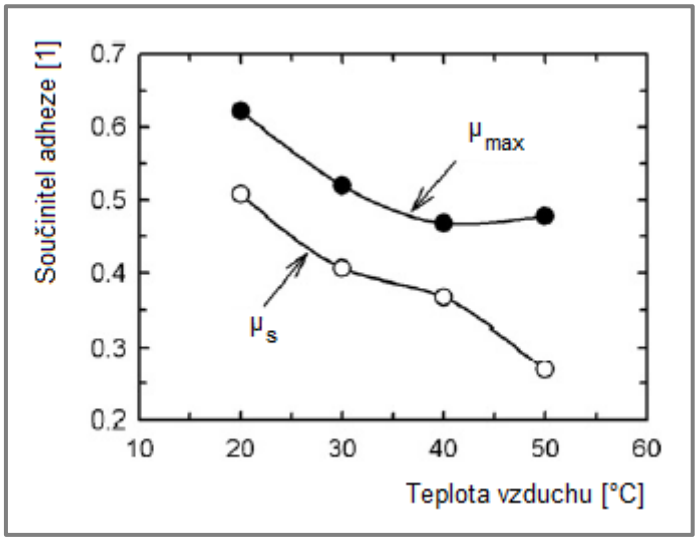
2.3

2.3.1 Teplota okolního vzduchu

2.3.1

Vlivem teploty okolního vzduchu na adhezi se ve své práci [9] zabýval **K-S. Baek**. Autor prováděl experimenty na dvoudiskovém zařízení, přičemž kontaktní tlak odpovídal hodnotě 800 MPa, rychlost valení 1,26 m/s a skluz 0,7 %.

Při experimentu byla sledována maximální a ustálená hodnota součinitele adheze v závislosti na teplotě okolního vzduchu, která byla uvažována v rozsahu (20 až 50) °C. Bylo zjištěno, že se zvyšující se teplotou okolního vzduchu dochází k poklesu maximální i ustálené hodnoty adheze (obr. 2-11), přičemž maximální hodnota se pohybovala v rozsahu (0,45 až 0,65) a ustálená hodnota v rozsahu (0,25 až 0,5) [9].

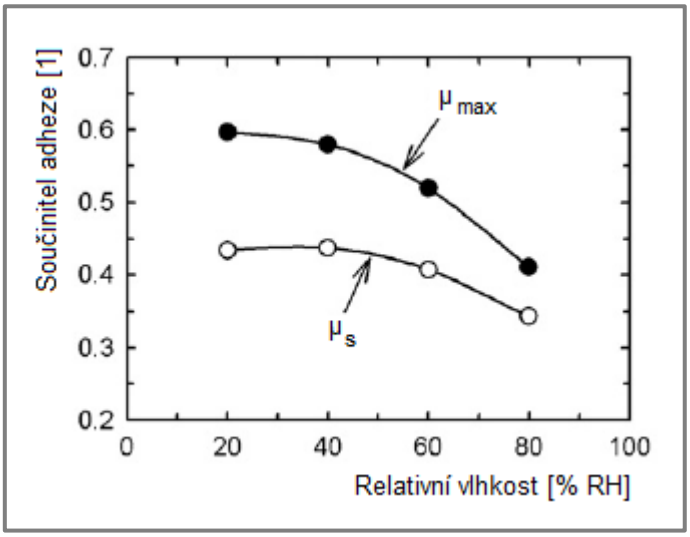


Obr. 2-11 Vliv teploty vzduchu na adhezi [9]

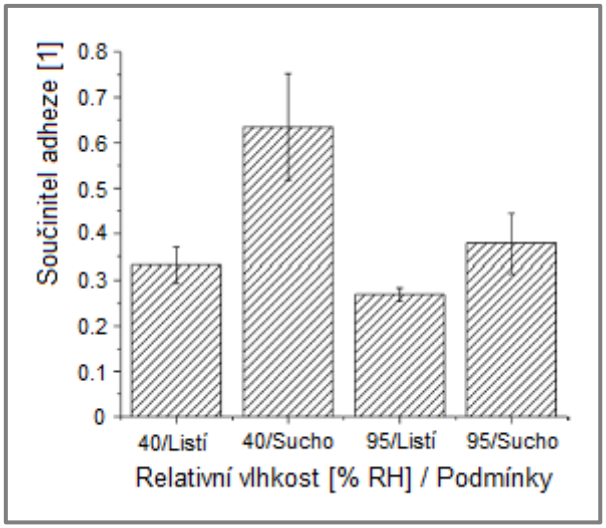
2.3.2 Vzdušná vlhkost

Vzdušná vlhkost v kontaktu kola a kolejnice působí jako mezní stav pro „suché“ a „mokré“ podmínky. Jejím vlivem na adhezi se ve své práci zabýval [9] **K-S. Baek** a [3] **U. Olofsson**.

Stejně jako v případě experimentů s okolní teplotou vzduchu, prováděl Baek i tyto experimenty na dvoudiskovém zařízení. Kontaktní podmínky byly stejné s tím rozdílem, že teplota vzduchu v tomto případě byla 30 °C a hodnota relativní vlhkosti se měnila v rozsahu (20 až 80) % RH. Při experimentu byla sledována maximální a ustálená hodnota součinitele adheze v závislosti na relativní vlhkosti. Bylo zpozorováno, že se zvyšující se relativní vlhkostí dochází k poklesu maximální i ustálené hodnoty adheze (obr. 2-12), přičemž maximální hodnota se pohybovala v rozsahu (0,4 až 0,6) a ustálená hodnota v rozsahu (0,35 až 0,45) [9].



Obr. 2-12 Vliv vzdušné vlhkosti na adhezi [9]



Obr. 2-13 Vliv vzdušné vlhkosti při kontaminaci listím [3]

Olofsson se ve své práci [3] zaměřil na experimenty, kde zkoumal vliv vlhkosti při suchých podmínkách a při kontaminaci kontaktu listím. Tyto experimenty probíhaly na tribometru typu *„pin on disc“*, přičemž kontaktní tlak odpovídal hodnotě 800 MPa a skluzová rychlost byla stanovena jako 0,1 m/s. Doba testů byla 10 minut.

Experimenty byly provedeny pro dvě úrovně relativních vlhkostí, a to 40 ± 5 % RH a 95 ± 5 % RH, při laboratorní teplotě 20 ± 2 °C. Z výsledků plyne, že součinitel adheze klesá s rostoucí relativní vlhkostí, a to i při kontaminaci kontaktu listím (obr. 2-13). Přítomnost listí ovšem vede i při nižší relativní vlhkosti k vysokému poklesu adheze oproti suchým podmínkám. Nejvyšší pokles adheze byl zaznamenán v případě suchých podmínek, a to téměř o hodnotu 0,3 [3].

Vliv vzdušné vlhkosti na adhezi potvrdili navíc ve svých pracích **M. Ishida** [10] a **D. Klaffke** [11]. Ishida zkoumal adhezi mezi kolejnicí a ocelovou kuličkou pomocí železničního tribometru (obr. 2-14), zatímco Klaffke zkoumal adhezi tribometrem typu *„ball on flat“*. Oba autoři ve svých pracích potvrdili, že se zvyšující se relativní vlhkostí vzduchu dochází k poklesu hodnoty součinitele adheze.

Obr. 2-14 Přenosný železniční tribometr [12]

2.4 Vliv kontaminace kontaktu

2.4

2.4.1 Kontaminace vodou

2.4.1

Voda je jeden z nejrozšířenějších kontaminantů, které se mohou na železniční trati vyskytovat. Adhezí kontaktu kola a kolejnice za mokrých podmínek se zabýval **W. Zhang**, **H. Chen**.

Stejně jako v případě suchých podmínek prováděl Zhang své experimenty i za mokrých podmínek pomocí tribometru typu „roller rig“. V prvním případě byla měřena hodnota součinitele adheze zejména při vyšších rychlostech valení, přičemž aplikované zatížení na nápravu bylo 44 kN. Při experimentu byla zjištěna lineární závislost součinitele adheze při malých hodnotách skluzu, přičemž jeho maximální hodnota silně závisí na rychlosti valení. Při rychlosti 280 km/h byla zaznamenána maximální hodnota adheze 0,06 (obr. 2-15*a*). Po dosažení bodu saturace byl opět se zvyšujícím se skluzem zaznamenán pokles adheze [5].

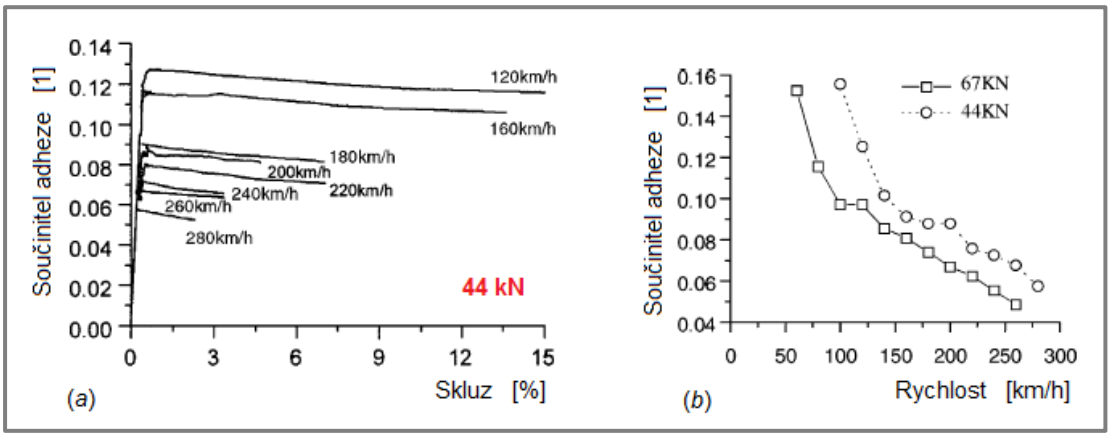
Ve druhém případě (obr. 2-15*b*) byla měřena maximální hodnota součinitele adheze (hodnota v bodě saturace), přičemž aplikované zatížení na nápravu bylo 44 kN a 67 kN. Experimentem bylo opět dokázáno, že se zvyšující se rychlostí klesá hodnota adheze, přičemž lze říct, že při menším zatížení byla adheze v kontaktu vyšší zejména při vyšších rychlostech. Získané křivky lze interpretovat následujícími empirickými vztahy [5]:

$$\mu_{44} = 0{,}05879 + 0{,}08631 \cdot e^{\frac{-1{,}3 \cdot a + 99{,}054}{86{,}38}} + 0{,}011 \cdot e^{\frac{-1{,}3 \cdot a + 99{,}054}{1682}} \quad (2.5)$$

$$\mu_{67} = 0{,}06307 + 0{,}07611 \cdot e^{\frac{-a + 58{,}889}{59{,}58}} \quad (2.6)$$

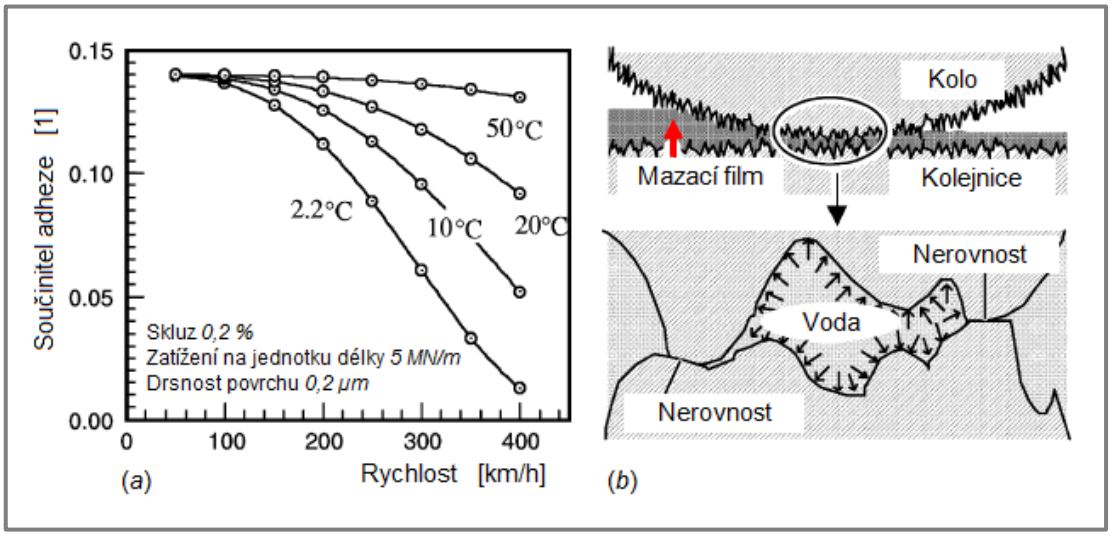
kde:

μ_{44}	1	je maximální součinitel adheze pro zatížení 44 kN
μ_{67}	1	je maximální součinitel adheze pro zatížení 67 kN
a	km/h	– rychlost valení



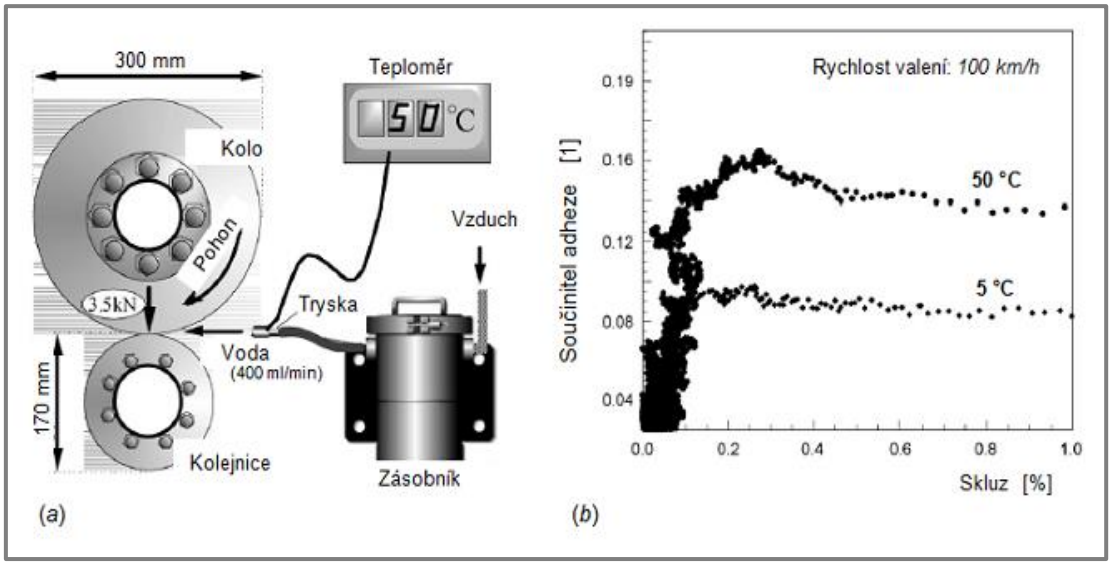
Obr. 2-15 Adheze za mokrých podmínek (roller rig) [5]

Chen se ve své práci [13] zabýval vlivem teploty vody na adhezi zejména při vyšších rychlostech valení, přičemž nebylo použito žádných experimentálních zařízení, ale pouze numerické simulace. Autor zjistil, že se snižující se teplotou vody dochází při vyšších rychlostech ke snížení adheze (obr. 2-16*a*). Tento jev souvisí s viskozitním chováním vody. Se zvyšující se teplotou dochází ke snížení viskozity. Při vyšší teplotě vody bude tedy mazací film mezi povrchem kola a kolejnice tenčí, což ve výsledku způsobí kontakt povrchových nerovností (obr. 2-16*b*), přičemž se zvýší adheze v kontaktu.



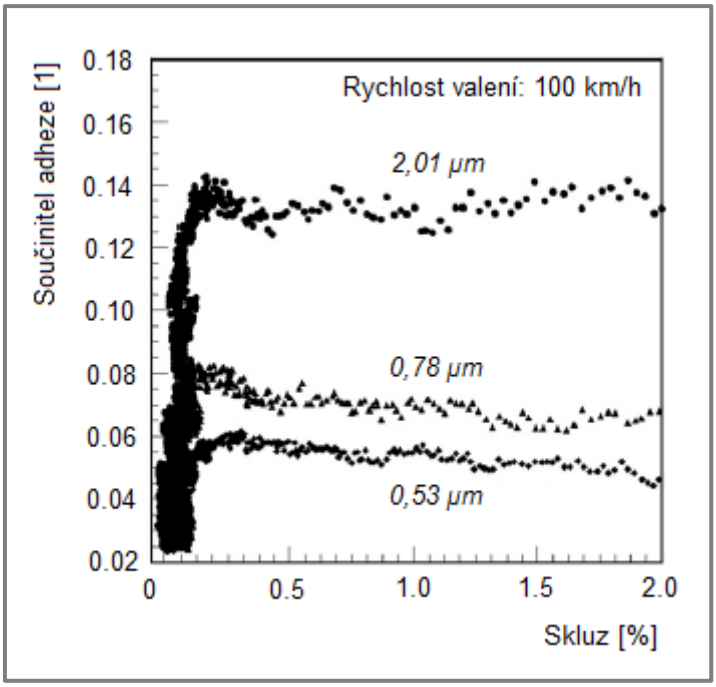
Obr. 2-16 Vliv teploty vody na adhezi (numerická simulace) [13]

Ve své další práci [14] se Chen zabýval vlivem teploty vody na adhezní křivku. Experiment byl proveden na dvoudiskovém zařízení, přičemž horní disk simuloval železniční kolo a spodní disk simuloval kolejnici (obr. 2-17*a*).



Obr. 2-17 Vliv teploty vody na adhezi (dvoudiskové zařízení) [14]

Experiment probíhal za konstantní rychlosti valení 100 km/h, přičemž testovaná teplota vody byla (5 a 50) °C. Bylo zjištěno, že po dosažení bodu saturace při teplotě vody 5 °C dochází se zvyšujícím se skluzem k velmi mírnému poklesu součinitele adheze (obr. 2-17*b*). Naproti tomu při teplotě vody 50 °C byl zpozorován značný pokles. Experimentem bylo navíc prokázáno, že teplota vody má výrazný vliv na hodnotu součinitele adheze, čímž se potvrzuje Chenova numerická simulace z předchozího zdroje [13].



Obr. 2-18 Vliv drsnosti povrchu na adhezi [14]

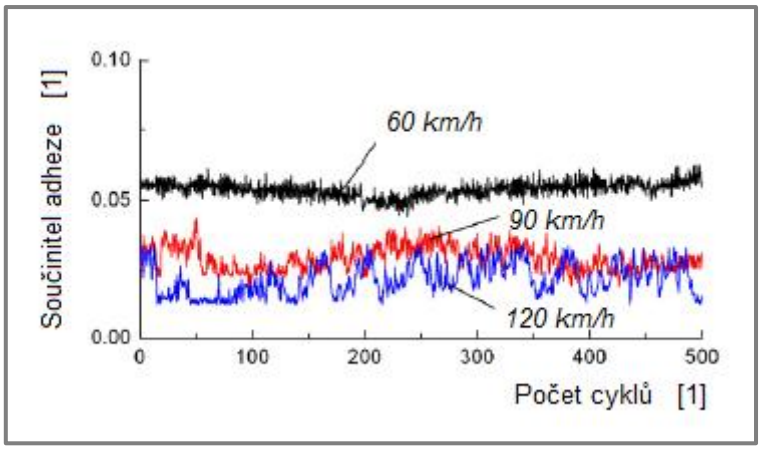
Součástí Chenovy práce byla studie zaměřená také na vliv drsnosti povrchu na adhezi v kontaktu kola a kolejnice za mokrých podmínek. Experiment byl opět proveden na dvoudiskovém zařízení, přičemž aplikovaná rychlost valení byla 100 km/h. Adhezní křivky byly sestavené pro tři různé drsnosti povrchu (obr. 2-18). Autor zjistil, že nízká drsnost povrchu za kontaminaci vody vede k extrémně nízké adhezi, což může být velmi nebezpečné zejména při brzdění. Ve výsledku tedy Chen ve svých pracích [13,14] zjistil, že adheze za mokrých podmínek je poměrně dobře udržovatelná zvyšováním teploty vody a drsnosti povrchu.

Voda se v kontaktu může také vyskytovat ve formě kondenzátu, což souvisí s výskytem rosného bodu. Rosný bod je teplota, při které je vzduch plně nasycen vodními parami, což znamená, že relativní vlhkost vzduchu dosáhne 100 %. Jestliže teplota povrchu tělesa klesne pod teplotu rosného bodu, pak nastává kondenzace [15]. Teplota rosného bodu silně závisí na okolní teplotě a relativní vlhkosti vzduchu.

2.4.2 Kontaminace olejem

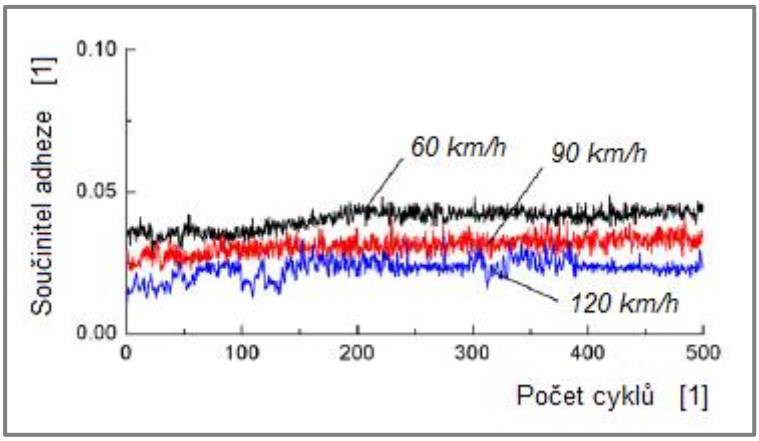
Dalším běžným kontaminantem, který se může na železniční trati vyskytovat je olej. Jeho vliv zkoumal **W. J. Wang** na zařízení JD-1 [16] a **Y. Zhu** na MTM [7].

Wang ve své práci [16] prováděl experiment, při kterém byl sledován součinitel adheze v závislosti na počtu cyklů. Experiment probíhal pro tři různé rychlosti v rozsahu (60 až 120) km/h. Bylo zjištěno, že stejně jako v případě vody hodnota adheze klesá se zvyšující se rychlostí i v případě kontaminace kontaktu olejem. Při rychlosti 60 km/h byla zjištěna poměrně konstantní hodnota adheze, přičemž součinitel adheze se pohyboval kolem hodnoty 0,055. Při vyšších rychlostech byla zjištěna vysoká fluktuace (obr. 2-19), což bylo pravděpodobně způsobeno vibracemi experimentálního zařízení. Nicméně nejnižší naměřená hodnota adheze byla 0,02 při rychlosti 120 km/h. Kontaminace kontaktu olejem tedy způsobuje až 5krát nižší adhezi než kontaminace vodou.



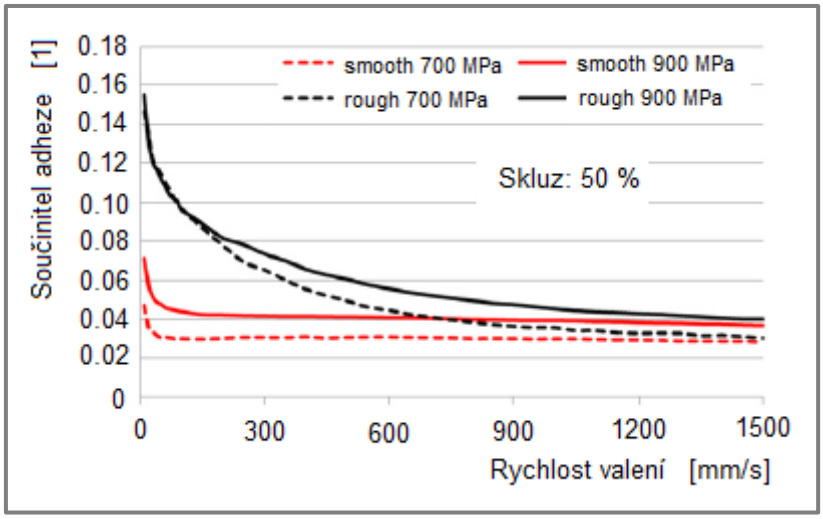
Obr. 2-19 Vliv rychlosti na adhezi při kontaminaci kontaktu olejem [16]

Součástí Wangovy práce byla studie zaměřená na vliv oleje v kombinaci s vodou. Bylo zjištěno, že olej v kombinaci s vodou je dokonalý lubrikant. Dosažená hodnota součinitele adheze při nejnižší testované rychlosti (60 km/h) byla zaznamenána 0,04 (obr. 2-20), zatímco při kontaminaci kontaktu pouze olejem byla tato hodnota 0,055. Při vyšších rychlostech byl zaznamenán ještě vyšší pokles adheze.



Obr. 2-20 Vliv rychlosti na adhezi při kontaminaci kontaktu olejem s vodou [16]

Zhu se ve své práci [7] zabýval vlivem součinitele adheze na rychlosti valení při kontaminaci olejem. Experimenty byly provedeny na tribometru MTM, přičemž byly uvažovány různé podmínky drsnosti povrchu a kontaktního tlaku. Drsnost povrchu byla kvantifikována pomocí parametru R_q stejně jako v případě suchých podmínek (kap. 2.2). Pro kontaktní tlak byly stanoveny dvě hodnoty, a to (700 a 900) MPa. Relativní skluz po celou dobu experimentu odpovídal hodnotě 50 %.

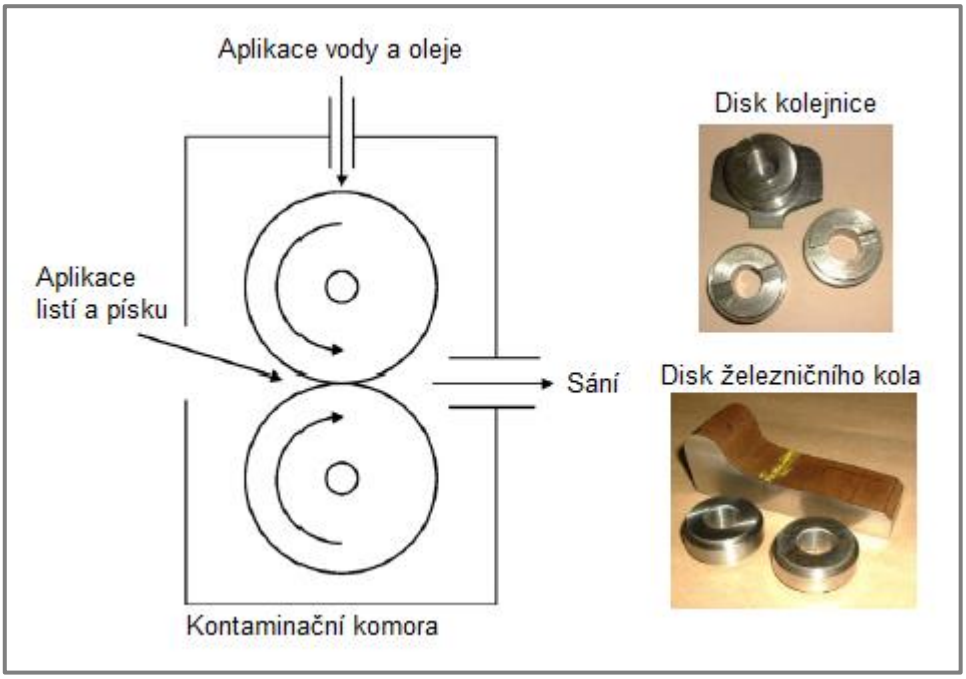


Obr. 2-21 Stribeckova křivka při kontaminaci olejem [7]

Zhu výsledky experimentu ve své práci interpretoval v podobě Stribeckovy křivky (obr. 2-21). Bylo zjištěno, že se zvyšující se rychlostí valení dochází k poklesu součinitele adheze, a to pro hladký i hrubý povrch, přičemž zejména při nízkých rychlostech hrubý povrch vykazoval vyšší hodnotu adheze. Při hrubém povrchu lépe dochází ke kontaktu mikronerovností, což způsobí nárůst adheze. Bylo prokázáno, že při vyšších rychlostech valení má kontaktní tlak větší vliv než drsnost povrchu. Při rychlosti 1 500 mm/s byl zaznamenán totožný součinitel adheze pro hladký i hrubý povrch, avšak hodnota adheze pro zatížení 900 MPa byla 0,04 a pro zatížení 700 MPa byla tato hodnota 0,03.

2.4.3 Kontaminace listy

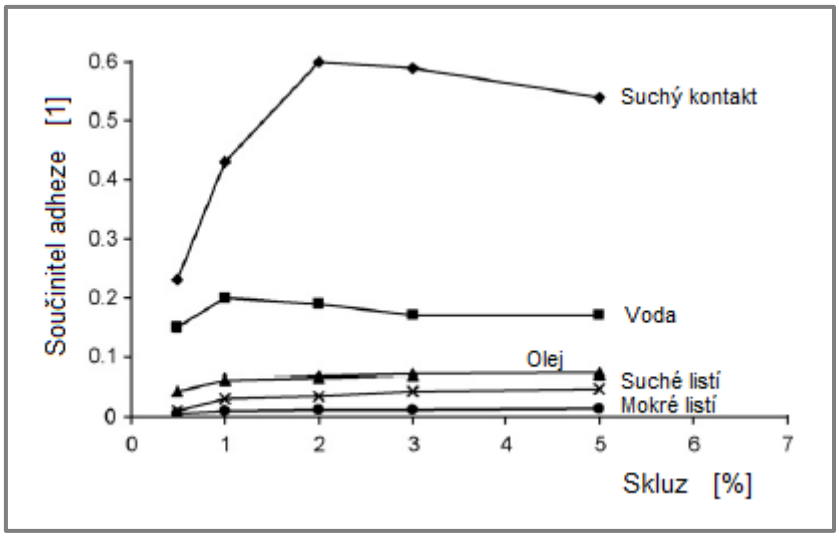
Kontaminací listy se zabývali **E. A. Gallardo-Hernandez** a **R. Lewis**. Autoři ve své práci [17] prováděli experimenty na *„scaled“* dvoudiskovém zařízení (obr. 2-22), přičemž horní disk (*braking disc*) odpovídal kolejnici (materiál *UIC60 900A*) a spodní disk (*driving disc*) představoval železniční kolo (materiál *R8T*). Při experimentech byla uvažována nominální rychlost 2 m/s a kontaktní tlak 1 500 MPa, což odpovídá běžnému tlaku mezi kónickou jízdní plochou kola a hlavou kolejnice.



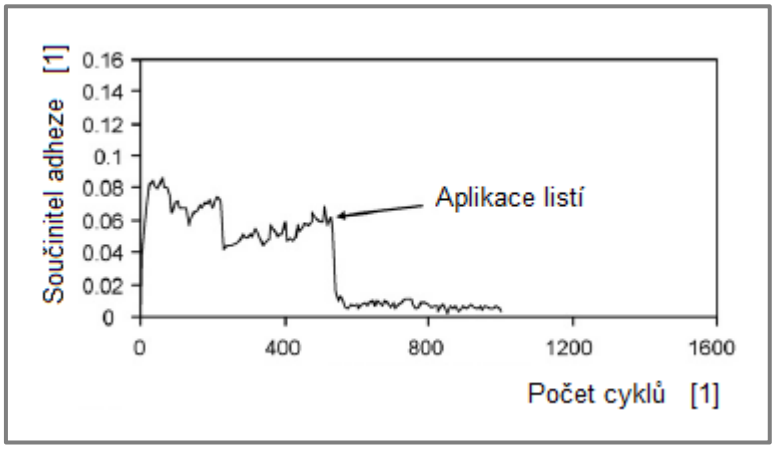
Obr. 2-22 Princip dvoudiskového zařízení – upraveno [17]

Při experimentu byla měřena ustálená hodnota součinitele adheze pro určitou hodnotu skluzu, která se pohybovala v rozsahu (0,5 až 5) %. Bylo zjištěno, že listí je téměř dokonalým lubrikantem. Hodnota adheze při kontaminaci kontaktu listím je nižší než při kontaminaci olejem, přičemž toto tvrzení platí jak pro suché, tak i pro mokré listí (obr. 2-23). Z experimentu lze říct, že v některých případech dochází po dosažení bodu saturace k mírnému poklesu adheze, který je pravděpodobně způsobený nárůstem teploty v kontaktu. Teplota v kontaktu roste především se zvyšujícím se skluzem, což autoři potvrdili ve své další práci [18]. Za suchých podmínek může zvýšená teplota způsobit tvorbu oxidů, které snižují adhezi. Za mokrých podmínek dojde při vyšší teplotě ke snížení viskozity maziva, což se zvyšujícím se skluzem opět vede k nižší adhezi v kontaktu.

Při dalším experimentu byl zjišťován pokles adheze v závislosti na počtu cyklů. Experiment byl proveden za mokrých podmínek, přičemž hodnota relativního skluzu byla 0,5 %. Hodnota součinitele adheze byla zpočátku 0,08 a se zvyšujícím se počtem cyklů adheze mírně klesala. Po 550 cyklech bylo do kontaktu přidáno listí, které společně s vodou způsobilo okamžitý pokles adheze až po hodnotu 0,01 (obr. 2-24). Tato hodnota vykazovala konstantní trend do konce experimentu, který byl ukončen po 1 000 cyklech [17].

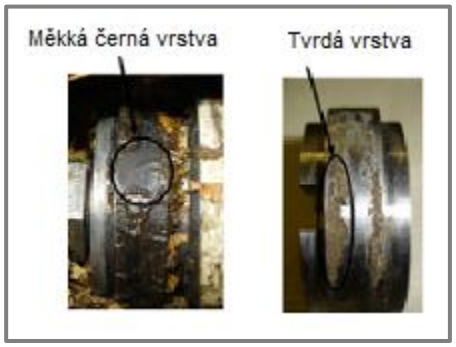


Obr. 2-23 Vliv kontaminantů na adhezi [17]



Obr. 2-24 Pokles adheze za mokrých podmínek při aplikaci listí [17]

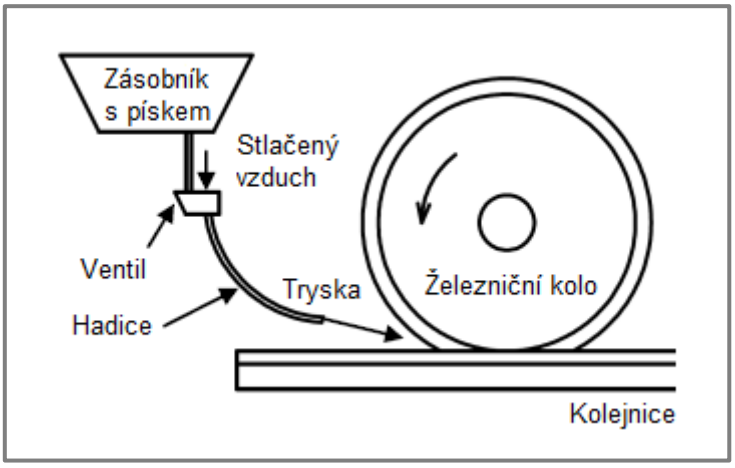
Při experimentech bylo navíc zjištěno, že listy vytvoří na povrchu kontaktních těles vrstvu (obr. 2-25). Při kontaminaci mokrým listí vzniká nejprve měkká černá vrstva, kterou lze poměrně dobře odstranit. Ovšem po odstranění této vrstvy zůstává na kontaktním tělese tvrdá vrstva, jejíž odstranění vyžaduje značné úsilí, a proto se používá upravené kolejové vozidlo, které koleje čistí pomocí tlakové vody [16,1].



Obr. 2-25 Vrstvy při kontaminaci mokrým listím – upraveno [17]

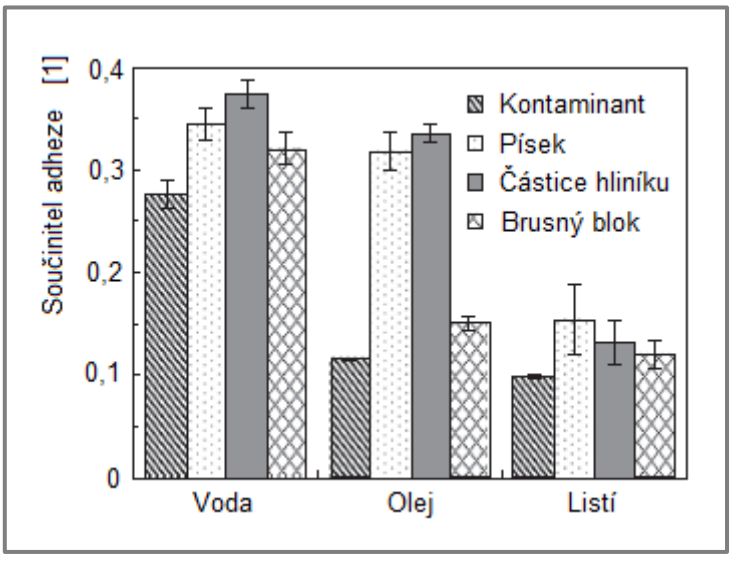
2.4.4 Kontaminace pískem

Kontaminace kontaktu pískem je především spojena s pískováním, což je proces, při kterém je do kontaktu kola a kolejnice záměrně přiváděn písek za účelem zvýšení adheze (obr. 2-26). Pískování je nejpoužívanější způsob zvýšení adheze a snížení nadměrného skluzu v kontaktu [1].



Obr. 2-26 Princip pískování [19]

Vlivem písku na adhezi se ve své práci [20] zabýval **Q. Y. Liu**. Experimenty byly provedené na *„scaled“* tribometru typu *„twindisc“*, přičemž byl vyvinut maximální kontaktní tlak 1 230 MPa. Testovací doba pro každý test byla 60 minut a hodnota skluzu 1,95 %. V experimentu byly uvažovány tři různé látky jako modifikátory tření (písek, částice hliníku a brusný blok[1]), které byly testovány při kontaminaci vodou, olejem a listím.

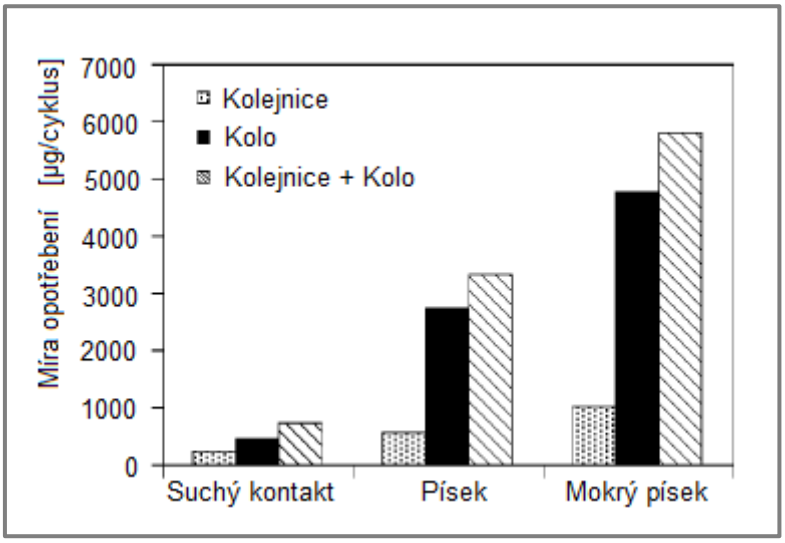


Obr. 2-27 Zvýšení adheze pomocí písku, částic hliníku a abraziva [20]

[1] Brusný blok je syntetický pryskyřičný materiál, přičemž mezi hlavní kompoziční prvky patří železo, měď, zinek, hliník, vápník, křemík, kyslík a uhlík.

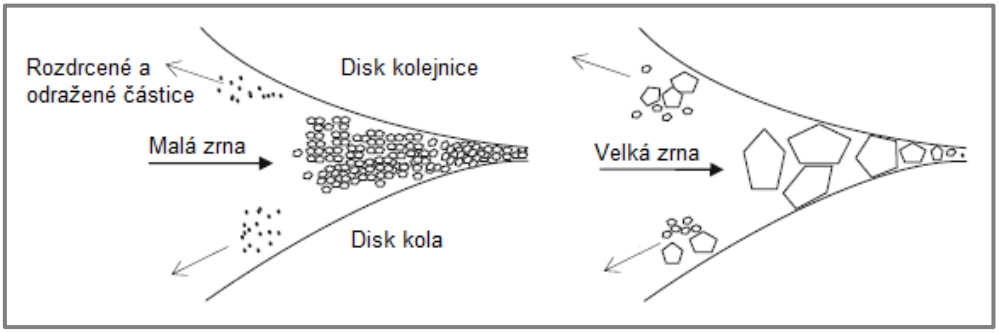
Při experimentech bylo zjištěno, že nejvyšší nárůst adheze způsobí částice hliníku, pokud je kontakt kontaminován vodou nebo olejem. Při kontaminaci olejem byl nárůst adheze 3násobný oproti vodě, přičemž součinitel adheze byl ale nižší než v případě vody. V případě kontaminace listy se jako nejlepší modifikátor jeví písek, ale i tak je nárůst adheze malý (obr. 2-27). Testy s abrazivním blokem vykazovaly velmi malý nárůst adheze, a to zejména při kontaminaci olejem [20].

Písek v kontaktu má pozitivní vliv na adhezi, ale navíc má významný vliv na opotřebení kola a kolejnice. Laboratorní testy ukázaly, že písek v kontaktu působí jako *„třetí těleso“* a zvyšuje míru opotřebení až 100násobně. Na opotřebení má mimo jiné velice významný vliv tvrdost materiálu. Materiál železničního kola má zpravidla menší tvrdost než materiál kolejnice, a proto míra opotřebení u kola je mnohem vyšší než u kolejnice (obr. 2-28) [1].



Obr. 2-28 Míra opotřebení kola a kolejnice při aplikaci písku [1]

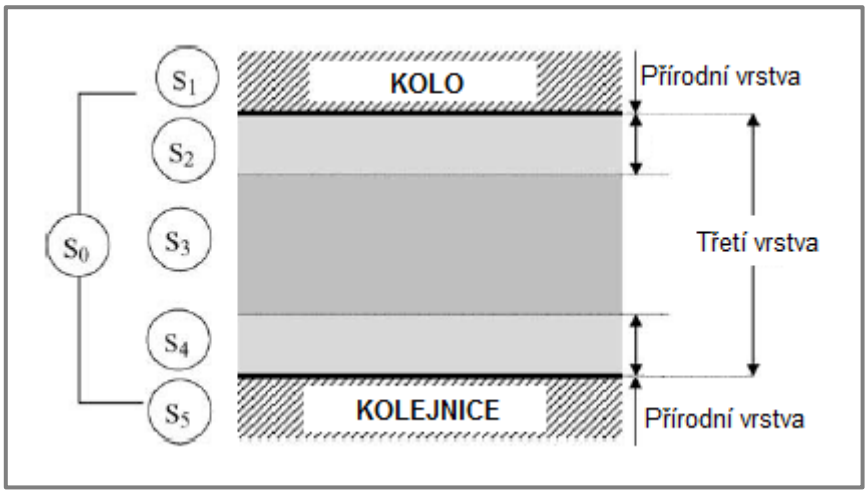
Písek v kontaktu může navíc způsobit elektrickou izolaci, což výrazně ovlivní schopnost detekci vozidla na trati a může tak dojít k tragické nehodě. Elektrickou izolací v souvislosti s pískováním se zabýval ve své práci [21] **O. Arias-Cuevas**. Experimenty bylo zjištěno, že z hlediska bezpečnosti je lepší aplikovat menší dávky písku o větší zrnitosti zejména při vyšších hodnotách skluzu. Jestliže je aplikován písek o menší zrnitosti (0,4 mm), pak při množství 7,5 g/m dochází k izolaci i při vyšších hodnotách skluzu. Obr. 2-29 schematicky znázorňuje vstup zrn písku do kontaktu kola a kolejnice na dvoudiskovém zařízení.



Obr. 2-29 Schematické znázornění vstupu zrn písku do kontaktu – upraveno [21]

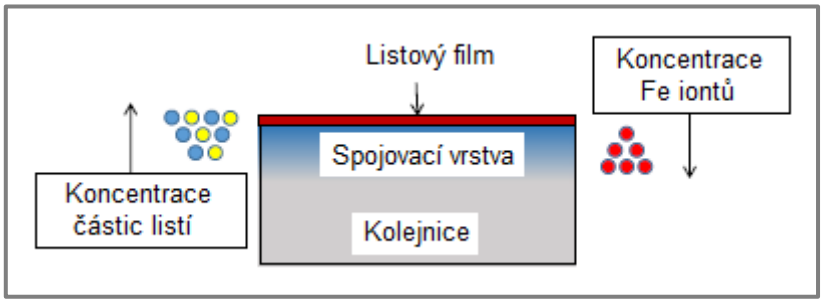
2.5 „Third body“ systém

„Third body“ systém představuje tribologickou trojici v kontaktu kola a kolejnice, která je tvořena mechanismem S_0 a třetí vrstvou S_3. Mechanismus S_0 představuje experimentální zařízení, které zahrnuje do modelu první dvě tělesa, přičemž se jedná o kolo S_1 a kolejnici S_5 (obr. 2-30). Třetí vrstva je tvořena částicemi opotřebení z prvních dvou těles. Tato vrstva navíc obsahuje přírodní vrstvy (S_2, S_4), které vznikají vlivem chemické reakce povrchů s okolním prostředím, a proto se přírodní vrstvy vždy vytvoří na povrchu prvních dvou těles [22].



Obr. 2-30 Tribologická trojice v kontaktu kola a kolejnice [22]

Při kontaminaci kontaktu biologickými kontaminanty (listím, listovým extraktem) je třetí vrstva tvořena navíc listovým filmem. **R. Lewis** ve své práci [23] navrhl model, který tento jev popisuje.



Obr. 2-31 Lewisův navrhovaný model [23]

V tomto modelu je listový film spojen s kolejnicí přes tzv. *spojovací vrstvu*, která zároveň působí jako podpůrná vrstva (obr. 2-24). Spojovací vrstva představuje střední charakteristiku mezi listovým filmem a kolejnicí, přičemž jejím úkolem je absorbovat rozdíl v materiálových vlastnostech [23], což ve výsledku vede k velmi silnému spojení. Za zmínku dále stojí koncentrace částic listí a Fe iontů, která se ve spojovací vrstvě postupně mění. Na povrchu vrstvy lze pozorovat vyšší koncentraci částic listí a nižší koncentraci Fe iontů, zatímco ve spodní části je přítomno více Fe iontů a méně částic listí. Tento jev také pozoroval i ve své práci [24] **Y. Zhu**.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Shrnutí poznatků z rešeršní práce

Na základě provedené rešerše lze říct, že problematika kontaktu kola a kolejnice je velmi rozsáhlá a není zcela vyřešená. Je to kvůli tomu, že kontakt se chová jako otevřený tribologický systém, což znamená, že mimo vnitřní vlivy (jako je zatížení, rychlost a zrychlení) na kontakt navíc působí několik vnějších vlivů jako přítomnost různých kontaminantů, okolní teplota, vzdušná vlhkost s čímž souvisí zejména změna ročního období.

Pokud jde o kontaminanty, pak lze říct, že voda je nejrozšířenější kontaminant a může se vyskytovat i ve formě vzdušné vlhkosti. Bylo prokázáno, že voda snižuje adhezi zejména při vysokých rychlostech valení, a to až do poměrně nízkých hodnot [5]. Na adhezi má rovněž významný vliv teplota vody. Na základě numerické simulace bylo zjištěno, že se snižující se teplotou vody dochází ke snížení adheze při vysokých rychlostech valení. Tento jev souvisí s viskozitním chováním vody. Se zvyšující se teplotou dochází ke snížení viskozity, což má dopad na tloušťku mazacího filmu v kontaktu [13]. Numerická simulace byla potvrzena i experimentem, ale podmínky experimentu byly zvoleny nevhodně. Při experimentu byla zvolena rychlost valení 100 km/h, což je rychlost, při které jsou rozdíly hodnot adheze podle simulace minimální (obr. 2-17) [14].

V souvislosti s vodou má na adhezi také významný vliv vzdušná vlhkost. Experimenty bylo zjištěno, že vyšší hodnoty vzdušné vlhkosti vedou k nižší adhezi (obr. 2-12). Baek podobný jev zjistil i u vlivu teploty okolního vzduchu, kde s rostoucí teplotou klesala hodnota adheze (obr. 2-11) [9].

Dalším kontaminantem, který se běžně na železniční trati vyskytuje, je olej. Tento kontaminant způsobuje velmi nízkou adhezi v kontaktu kola a kolejnice. Experimenty bylo zjištěno, že hodnota adheze při rychlosti 60 km/h je 0,055, přičemž s rostoucí rychlostí tato hodnota klesá (obr. 2-19). Jestliže se olej smísí s vodou, pak adheze při rychlosti 60 km/h klesne na hodnotu 0,04 (obr. 2-20) [16].

Významným kontaminantem je písek. Tento kontaminant zvyšuje adhezi v kontaktu. Experimenty bylo dokázáno, že písek opravdu zvyšuje adhezi, jestliže je kontakt kontaminován vodou, olejem nebo listím [20]. Přítomnost písku v kontaktu má ale i významný vliv na opotřebení materiálu. Laboratorní testy ukázaly, že písek v kontaktu působí jako *„třetí těleso“* a zvyšuje míru opotřebení až 100násobně (obr 2-28) [1]. Písek může navíc způsobit elektrickou izolaci, což výrazně ovlivní schopnost detekci kolejového vozidla na trati [21].

Nejhorším kontaminantem je mokré listí. Bylo zjištěno, že vlivem vysokého Hertzova tlaku je listí v kontaktu drceno a vylučuje tzv. pektin, což je látka, která působí v kontaktu jako mazivo a vede k extrémně nízké adhezi. Hodnota součinitele adheze v takovém případě je menší než 0,02 [17].

Při kontaktu kola a kolejnice se může vytvořit za určitých provozních podmínek tzv. *třetí vrstva*, která obsahuje částice opotřebení kola a kolejnice v kombinaci s přírodními vrstvami, které vznikají vlivem chemických reakcí s okolním prostředím [22]. Pokud je kontakt kontaminován listím, nebo listovým extraktem, pak může vzniknout na povrchu kontaktních těles také listový film (obr. 2-31) [23].

3.2 Analýza problému

V dnešní době existuje mnoho publikací, které se zabývají vlivem vody v kontaktu kola a kolejnice. Velmi málo publikací se ovšem zmiňuje o vzdušné vlhkosti a téměř žádné publikace neřeší vznik rosného bodu, tedy vznik kondenzace vlivem kombinace vzdušné vlhkosti a teploty okolního prostředí. Je známo, že čím vyšší je hodnota relativní vlhkosti, tím nižší je adheze v kontaktu kola a kolejnice, přičemž i při vysoké hodnotě zůstává adheze stále na bezpečné úrovni. Otázkou ovšem je, jak se adheze změní, pokud alespoň na jednom povrchu kontaktních těles nastane kondenzace. Diplomová práce by měla určit empirické vztahy pro predikci adheze v kontaktu kola a kolejnice, přičemž budou uvažovány dva stavy, a to stav kdy nedochází a dochází ke kondenzaci. Empirické vztahy by měly být dále použity pro řídící jednotky mazacích a pískovacích systémů kolejových vozidel.

3.3 Podstata a cíl práce

Diplomová práce se zabývá vlivem klimatických podmínek na adhezi v kontaktu kola a kolejnice, přičemž klimatickými podmínkami se zejména rozumí teplota a vzdušná vlhkost.

Problém diplomové práce lze rozdělit na tři úrovně. Jedná se o vliv vzdušné vlhkosti v případě, že dochází, nebo nedochází ke kondenzaci. V případě, že bude docházet ke kondenzaci, pak bude nutné zjistit vliv kondenzátu. Třetí úroveň souvisí s aplikací listového extraktu pro předchozí dva případy. Na základě problému diplomové práce je vytvořena vědecká otázka a pracovní hypotéza, která bude ověřována pomocí laboratorních experimentů.

Hlavním cílem je experimentálně stanovit vliv a vzájemné vazby vlhkosti a teploty a přirozených kontaminantů na adhezi kontaktu kola a kolejnice. Účelem je vytvoření vztahů pro predikci tření v kontaktu a řízení mazacích a pískovacích systémů.

3.3.1 Vědecká otázka

„Jaká je hodnota adheze v kontaktu kola a kolejnice, jestliže nedochází/dochází ke kondenzaci vlivem kombinace vzdušné vlhkosti a teploty okolního vzduchu?“

3.3.2 Pracovní hypotéza

„Se zvyšující se vzdušnou vlhkostí dochází k poklesu hodnoty adheze v kontaktu kola a kolejnice, přičemž při dosažení rosného bodu (kondenzace) je tento pokles adheze mnohem vyšší.“

3.4 Výstup práce

Výstupem řešení této diplomové práce je článek v impaktovaném nebo recenzovaném časopise, a to ve stavu připraveno k odeslání vydavatelem.

3.5 Odůvodnění nutnosti a potřebnosti řešení

Kolejová doprava je efektivní způsob přepravy s nízkými energetickými nároky již od počátku svého vzniku. I přes to je stále vyšší požadavek na rychlost, efektivnost a zejména bezpečnost. Současným trendem je tzv. *„friction management“*, což je aktivní řízení adheze v kontaktu kola a kolejnice. Řízení adheze umožňují řídící systémy, které ale vyžadují znalost nebo alespoň odhad aktuální míry adheze v kontaktu za různých provozních a kontaminačních podmínek. Pro tyto podmínky prozatím neexistují vztahy, které by predikovaly adhezi na základě znalosti určitých parametrů, mezi které patří mimo jiné vzdušná vlhkost a teplota okolního vzduchu.

4 MATERIÁL A METODY

V této kapitole budou nejprve zmíněna použitá laboratorní zařízení pro realizaci experimentů. Dále zde budou popsána kontaktní tělesa, kontaminanty a postup přípravy vzorku. V poslední části kapitoly bude zmíněn plán experimentů a experimentální podmínky jednotlivých testů.

4.1 Metody

4.1.1 Mini Traction Machine (MTM)

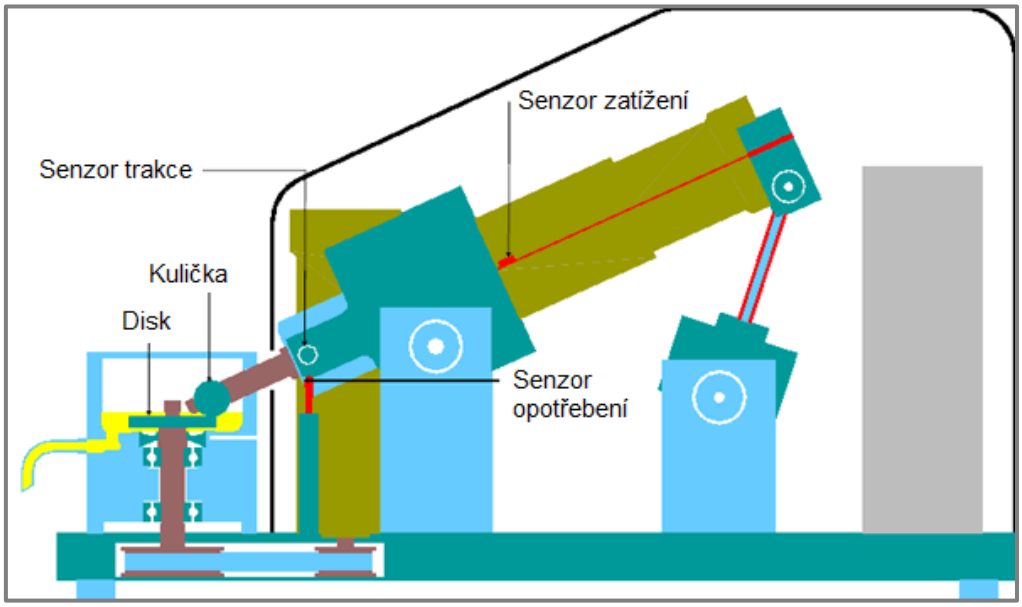
MTM (obr. 4-1) je univerzální měřicí přístroj pro měření tření mazaných i nemazaných kontaktů. Tření lze měřit v širokém rozsahu valivých a skluzových podmínek (tab. 3). MTM umožňuje aplikaci různých kontaminantů v podobě vody, oleje nebo modifikátoru tření. Dále je možné měření provádět za vyšší teploty, protože přístroj obsahuje temperanční jednotku. Mezi hlavní aplikace patří plně automatizované trakční mapování maziv za podmínek, které se běžně vyskytují ve spalovacích motorech [25]. Zařízení vyrábí a dodává na trh firma PCS Instruments.

Obr. 4-1 Mini Traction Machine (MTM) [25]

Tab. 3 Technické parametry MTM

Maximální zatížení	75 N
Maximální kontaktní tlak	1,25 MPa
Maximální rychlost valení	4 $m \cdot s^{-1}$
SRR (Slide/Roll Ratio)	(0 až 200) %
Maximální dosažitelná teplota	150 °C
Objem testovaného vzorku	35 ml
Šířka	400 mm
Hloubka	600 mm
Výška	400 mm
Váha	30 kg

Princip měření spočívá v přitlačování ocelové kuličky na ocelový disk, přičemž obě tělesa mají nezávislé pohony. Třecí síla mezi kuličkou a diskem je měřena pomocí senzoru trakce (obr. 4-2). Další senzory měří zatížení, opotřebení nebo i teplotu testovaného média. MTM lze ovládat pomocí PC, který obsahuje řídící software. Uživateli je umožněno definovat široké nastavení experimentálních podmínek, a to např. nastavení rychlosti valení, skluzu, teploty, typu vykreslování dat (Stribeckova křivka, trakční křivka, časový test) aj.



Obr. 4-2 Pracovní schéma MTM [26]

Mezi největší nevýhody MTM patří vzorkovací frekvence. Přístroj umožňuje měřit pouze jednu hodnotu za sekundu, což je ve většině případů dostačující. V některých aplikacích by ale bylo vhodné získat z měření více dat pro přesnější analýzu a následné vyhodnocení. Další nevýhodou je zajištění nižších hodnot teploty testovaného média. Temperační jednotka uvnitř MTM umožňuje pouze ohřev, a proto pro získání nižších hodnot teploty je nutné k zařízení připojit další temperanční jednotku.

4.1.2 Temperační jednotka Haake K41

Temperační jednotka (obr. 4-3) se skládá z věže Haake K41, regulátoru DC50 a kapaliny, kterou je většinou silikonový olej. Jednotka se používá zejména pro chlazení, ale umožňuje i ohřev až do 150 °C, přičemž záleží na typu kapaliny.

Tab. 4 Technické parametry temperační jednotky Haake K41 [27]

Rozsah temperace	(-40 až 150) °C
Teplotní přesnost	(0,01 až 0,04) °C
Chladicí výkon při 20 °C	1000 W
Ohřívací výkon	2000 W
Objem temperační kapaliny	15 l
Šířka x Hloubka x Výška	480 mm x 600 mm x 850 mm

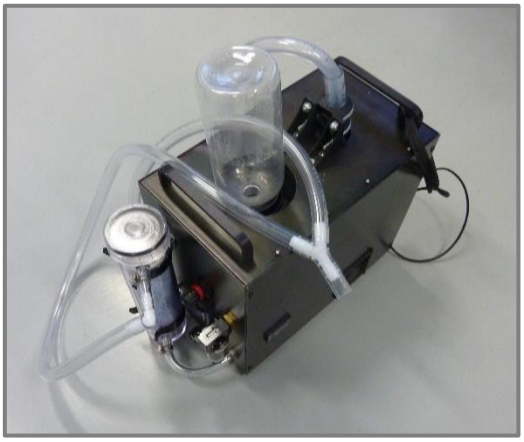
Obr. 4-3 Temperační jednotka Haake K41

Princip chlazení spočívá v tom, že temperanční kapalina cirkuluje mezi věží a tepelným výměníkem, který pohlcuje teplo v pracovní komoře MTM. Pro dosažení co nejnižší teploty média je nutné zajistit co nejkratší vedení (hadice) a vhodnou tepelnou izolaci.

Teplota temperanční kapaliny je měřena pomocí termočlánku, který je přímo součástí regulátoru DC50. Teplota média v pracovní komoře je naopak měřena pomocí termočlánku, který je součástí MTM. Tímto způsobem je možné pozorovat teplotu temperanční kapaliny i testovaného média. Nevýhodou je, že není možné přímo regulovat teplotu testovaného média, což ale při krátkých testech (maximálně 3 minuty) není závažný problém.

4.1.3 Zařízení pro regulaci vzdušné vlhkosti

Jednotka pro regulaci vzdušné vlhkosti (obr. 4-4) je samostatné zařízení tribometru Rtec. Toto zařízení produkuje vzduch o určité relativní vlhkosti, kterou je možné nastavit v rozsahu (10 až 90) RH. Vzduch je do pracovní komory MTM dopravován pomocí hadice a relativní vlhkost v komoře je měřena pomocí snímače vlhkosti, který je připojen k samotnému zařízení. Na základě PID regulace je řízen průtok vzduchu do pracovní komory.



Obr. 4-4 Zařízení pro regulaci vzdušné vlhkosti

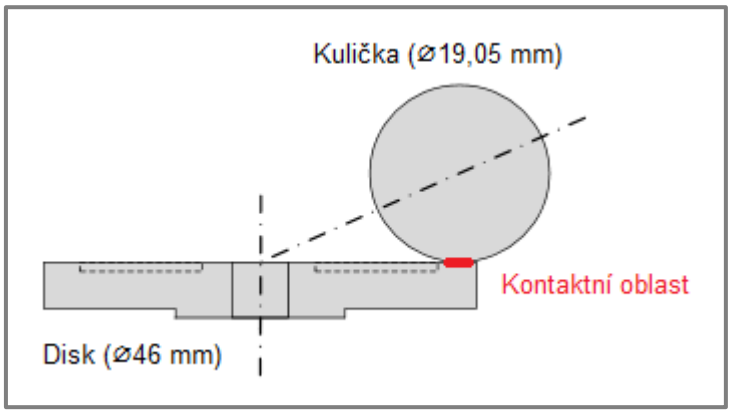
4.2 Materiál

4.2

4.2.1 Kontaktní tělesa

4.2.1

Simulátor MTM je využíván pro měření zejména v konfiguraci „ball on disk“, přičemž kontaktní tělesa jsou ocelová kulička a disk (obr. 4-5). Materiál obou kontaktních těles je ocel AISI 52100 [28].



Obr. 4-5 Kontaktní tělesa MTM – upraveno [28]

Povrch kontaktních těles je vysoce leštěný, přičemž hodnota drsnosti povrchu disku v kontaktní oblasti (funkční plocha) se pohybuje kolem Ra 0,01. Další plochy disku jsou vyrobené tak, že jejich povrch odpovídá drsnosti Ra 0,5. Disky mohou být tepelně zpravované tak, aby bylo dosaženo různé tvrdosti pro odlišné aplikace. Například plně žíhaný disk odpovídá tvrdosti 185 HV, zatímco vysoce kalené disky se pohybují v hodnotách tvrdosti kolem 760 HV [28]. Hodnota drsnosti povrchu kuličky odpovídá stejně jako v případě disku Ra 0,01.

Uvedené rozměry kontaktních těles na obr. 4-5 jsou označeny jako standardní konfigurace. Tato konfigurace umožňuje dosáhnout hodnoty Hertzova tlaku až 1,25 GPa, což je dostačující pro všechny typy experimentů, kterými se bude tato práce zabývat.

4.2.2 Kontaminanty

4.2.2

Diplomová práce se zabývá vlivem vzdušné vlhkosti a teploty na adhezi v kontaktu kola a kolejnice. V praxi ovšem nelze dosáhnout takových podmínek jako v laboratorním prostředí (např. dokonale čisté povrchy kontaktních těles), a proto je nutné vzdušnou vlhkost i teplotu kombinovat s kontaminanty. Pro práci byly vybrány kontaminanty v podobě **vody** a **listového extraktu**. Voda byla vybrána jako jeden z extrémů pro určení vlivu vzdušné vlhkosti. Dávkování malého množství vody může navíc objasnit chování kontaktu při výskytu kondenzátu. Listový extrakt byl připraven z listí, které bylo smíchané s vodou a odstavené po dobu 5 dní. Během této doby listí uvolnilo pektin, což v kombinaci s vodou vytvořilo mazivo, které vede k většímu poklesu adheze než samotná voda. Listí bylo dále odfiltrované pomocí síta a samotný listový extrakt byl zamrazen a uložen pro budoucí experimenty.

4.2.3 Postup přípravy vzorku

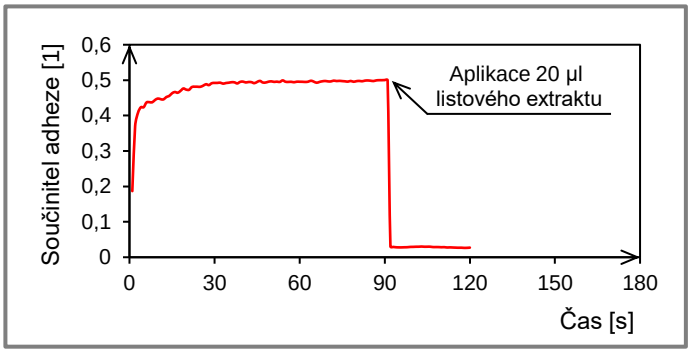
Čistá kontaktní tělesa

Před každým experimentem bylo nutné nejprve kontaktní tělesa důkladně očistit acetonem. Kontaktní tělesa byla vložena do nádoby tak, aby byly celé ponořené do acetonu. Nádoba byla následně vložena do ultrazvukové čističky tak, aby hladina acetonu byla přibližně na stejné úrovni jako hladina vody v čističce. Dále proběhlo vlastní čistění po dobu 10 minut za pokojové teploty.

Obr. 4-6 Čistý disk

Kontaminovaná kontaktní tělesa

Kontaminovaná kontaktní tělesa jsou tělesa, která podléhají jednorázovému dávkování listového extraktu do kontaktu v množství 20 µl (obr. 4-7) při rychlosti valení 0,5 m/s, skluzu 5 % a kontaktnímu tlaku 0,75 GPa. Listový extrakt vytvoří za těchto provozních podmínek na povrchu kontaktních těles vrstvu, která vede ke snížení hodnoty adheze. Vrstvu je nutné nechat zatvrdnout do druhého dne. Tato vrstva musí být navíc pravidelně obnovována před každou sérií měření.



Obr. 4-7 Aplikace listového extraktu (0,5 m/s; 5 %; 0,75 GPa)

Obr. 4-8 Kontaminovaný disk

4.3 Plán experimentů a experimentální podmínky

Plán experimentů lze rozdělit do následujících bodů:

1. **„Suché“ podmínky**

2. **Vliv kontaminace**

   Voda
   A) Plně zaplavený kontakt
      - Vliv rychlosti
      - Vliv teploty

   B) Dávkování malého množství
      - Vliv množství
      - Vliv rychlosti

   Listový extrakt
   A) Dávkování malého množství
      - Vliv množství

3. **Vliv klimatických podmínek**

   Čistý disk
      - Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 1 °C
      - Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 10 °C
      - Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 24 °C
      - Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 40 °C
      - Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 50 °C
        - 3D mapa vlivu klimatických podmínek (bez kondenzace)
        - 3D mapa vlivu klimatických podmínek (kondenzace)

   Kontaminovaný disk
      - Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 1 °C
      - Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 10 °C
      - Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 24 °C
      - Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 40 °C
      - Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 50 °C
        - 3D mapa vlivu klimatických podmínek (bez kondenzace)
        - 3D mapa vlivu klimatických podmínek (kondenzace)

Pro vliv klimatických podmínek bylo nutné stanovit vliv jednoho parametru (vliv vzdušné vlhkosti při určité teplotě vzduchu), který se skládá z několika různých testů, při kterých byl zjišťován průběh adheze v čase. Poté bylo možné sestavit vliv obou parametrů (teploty okolního vzduchu a vzdušné vlhkosti) v podobě 3D mapy, a to pro stav kdy nedochází a dochází ke kondenzaci. Experiment za suchých podmínek byl společně s experimenty při plně zaplaveném kontaktu považován jako okrajový stav. Dávkování malého množství kontaminantu umožnilo lépe pochopit chování kontaktu.

Experimentální podmínky byly pro každý test mírně odlišné. Tyto podmínky popisují následující tabulky.

- Suché podmínky

Tab. 5 Podmínky pro experiment za „suchých“ podmínek

Rychlost valení	0,3 m/s
Skluz	5 %
Kontaktní tlak	0,75 GPa

- Voda – plně zaplavený kontakt (vliv rychlosti)

Tab. 6 Podmínky pro plně zaplavený kontakt vodou (vliv rychlosti)

Rychlost valení	(0,5, 1, 2, 3) m/s
Skluz	(0 až 50) %; 12 hodnot
Kontaktní tlak	0,75 GPa

- Voda – plně zaplavený kontakt (vliv teploty)

Tab. 7 Podmínky pro plně zaplavený kontakt vodou (vliv teploty)

Rychlost valení	1 m/s
Skluz	5 %
Kontaktní tlak	0,75 GPa
Teplota vody	(5, 20, 50, 80) ± 2 °C

- Voda – dávkování malého množství (vliv množství)

Tab. 8 Podmínky pro dávkování malého množství vody (vliv množství)

Rychlost valení	0,5 m/s
Skluz	5 %
Kontaktní tlak	0,75 GPa
Aplikované množství	(1, 2, 4) µl

- Voda – dávkování malého množství (vliv rychlosti)

Tab. 9 Podmínky pro dávkování malého množství vody (vliv rychlosti)

Rychlost valení	(0,5, 1, 2, 3) m/s
Skluz	5 %
Kontaktní tlak	0,75 GPa
Množství	5 µl

- Listový extrakt – dávkování malého množství (vliv množství)

Tab. 10 Podmínky pro dávkování malého množství listového extraktu

Rychlost valení	0,5 m/s
Skluz	5 %
Kontaktní tlak	0,75 GPa
Aplikované množství	(1, 5, 10, 20) µl

- Vliv klimatických podmínek

Tab. 11 Podmínky pro stanovení vlivu klimatických podmínek

Rychlost valení	1 m/s
Skluz	5 %
Kontaktní tlak	0,75 GPa
Výdrž v daných podmínkách	10 min
Testované teploty vzduchu	(1, 10, 24, 40, 50) ± 2 °C
Testované vlhkosti vzduchu	(MIN[2], LAB, 50, 70, 90, MAX) ± 3 % RH

Ve všech případech je skluz definován následně:

$$skluz\ [\%] = \frac{skluzová\ rychlost}{valivá\ rychlost} \cdot 100$$

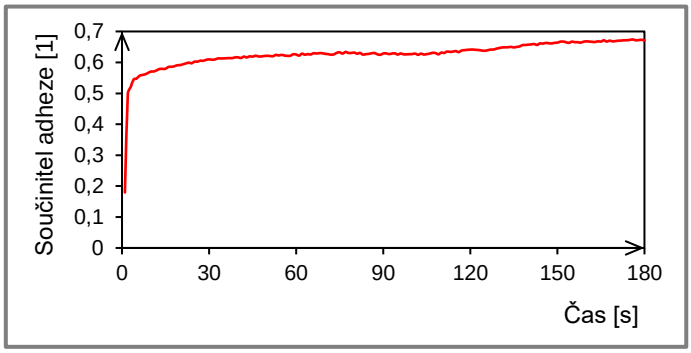
[2] MIN = minimální dosažená vlhkost vzduchu; LAB = laboratorní vlhkost vzduchu; MAX = maximální dosažená vlhkost vzduchu

5 VÝSLEDKY

5.1 „Suché“ podmínky

Adheze za sucha byla zjišťována za podmínek, kdy do kontaktu nebyly cíleně přidávány žádné další látky. Experimentální podmínky popisuje tab. 5. Nominální rychlost valení odpovídala 0,3 m/s. Doba testu byla 3 minuty. Nižší rychlost valení byla zvolena z důvodu nižšího opotřebení kontaktních těles. Co se týče laboratorních podmínek, tak teplota okolního vzduchu byla 24 °C a vzdušná vlhkost odpovídala rozsahu (31 až 36) % RH.

Z výsledků plyne, že hodnota součinitele adheze při daných podmínkách se pohybuje mezi 0,6 až 0,7 (obr. 5-1). Lze říct, že fáze záběhu proběhla poměrně rychle a to během (20 až 30) s. Dále následovala výdrž adheze na hodnotě 0,62 a poté mírný nárůst až na hodnotu 0,67.



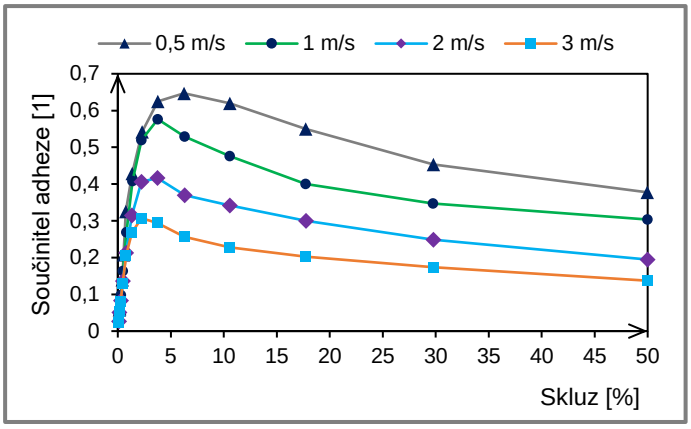
Obr. 5-1 Suchý kontakt (0,3 m/s; 5 %; 0,75 GPa)

5.2 Vliv kontaminace

5.2.1 Plně zaplavený kontakt vodou – vliv rychlosti

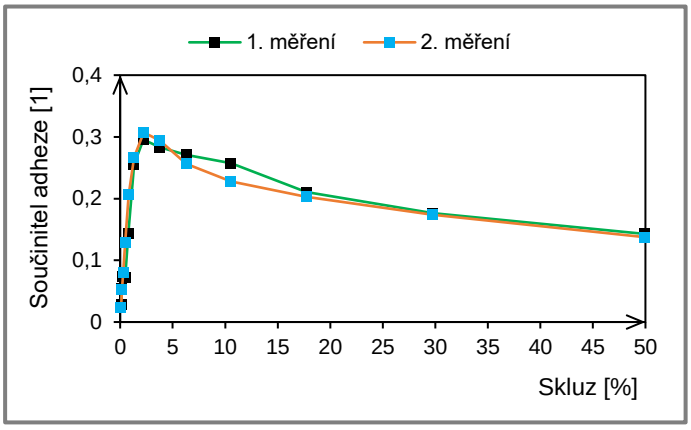
Plně zaplavenými podmínkami se rozumí stav, kdy se obě kontaktní tělesa brodí v kapalině. Podmínky daného experimentu popisuje tab. 6. Skluz byl pro tento typ testu nastaven v rozsahu (0 až 50) %, přičemž bylo počítáno s 12 hodnotami v logaritmickém měřítku, které bylo zvoleno pro bližší popis adhezní charakteristiky v její efektivní části. Rychlost valení byla v tomto případě proměnná hodnota, protože bylo provedeno několik testů pro různé rychlosti valení. Jedná se o rychlosti valení (0,5, 1, 2 a 3) m/s.

Z výsledků na první pohled plyne, že rychlost valení má významný vliv na pokles adheze při plně zaplaveném kontaktu. Při rychlosti valení 0,5 m/s byla nejvyšší hodnota adheze (adheze při bodu saturace) zaznamenána 0,64. Naopak při rychlosti valení 3 m/s byla tato hodnota adheze pouze 0,31 (obr. 5-2). Pokles adheze při jednotlivých testech byl zaznamenán i v neefektivní části adhezní křivky, což potvrzuje mnoho publikovaných výsledků. Dále je vidět, že se zvyšující se rychlostí valení se mění poloha bodu saturace. Při rychlosti 0,5 m/s se bod saturace vyskytuje při 6% skluzu, zatímco při rychlosti 3 m/s se tento bod objevuje již při 2% skluzu.



Obr. 5-2 Adhezní charakteristiky pro plně zaplavený kontakt vodou

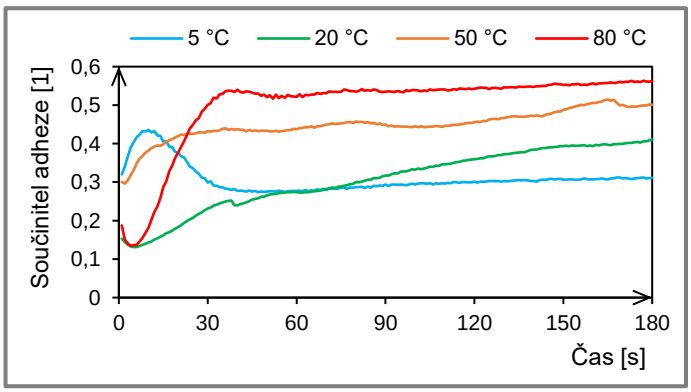
Posouzení správnosti adhezních charakteristik bylo provedeno opakováním každého testu, přičemž byly zjištěny pouze nepatrné rozdíly (viz obr. 5-3).



Obr. 5-3 Adhezní charakteristiky pro rychlost valení 3 m/s

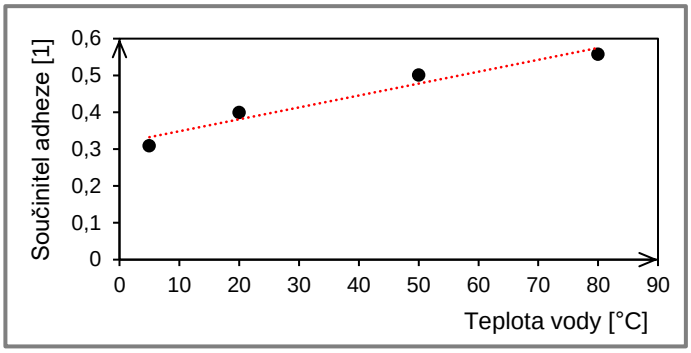
5.2.2 Plně zaplavený kontakt vodou – vliv teploty

Další experimenty byly zaměřeny na vliv teploty vody při plně zaplaveném kontaktu. Experimentální podmínky byly stanoveny opět standardně a popisuje je tab. 7. Nejprve byl naměřen průběh adheze v čase (obr. 5-4). Experiment byl spuštěn, jakmile dosáhla teplota vody požadované hodnoty. Samotný test trval 3 minuty. Pro následné vyhodnocení byly použity data z posledních 30 s jednotlivého měření.



Obr. 5-4 Průběh adheze v čase s vlivem teploty vody (1 m/s; 5 %; 0,75 GPa

Z vyhodnocení lze vidět, že teplota vody má výrazný vliv na hodnotu adheze. S rostoucí teplotou vody se zvyšuje adheze v kontaktu. Při teplotě vody 5 °C byla naměřena hodnota součinitele adheze 0,31, zatímco při teplotě vody 80 °C byla tato hodnota 0,56 (obr. 5-5).



Obr. 5-5 Vliv teploty vody na adhezi (1 m/s; 5 %; 0,75 GPa)

Nárůst adheze s rostoucí teplotou vody vykazuje lineární trend, který lze popsat následujícím vztahem:

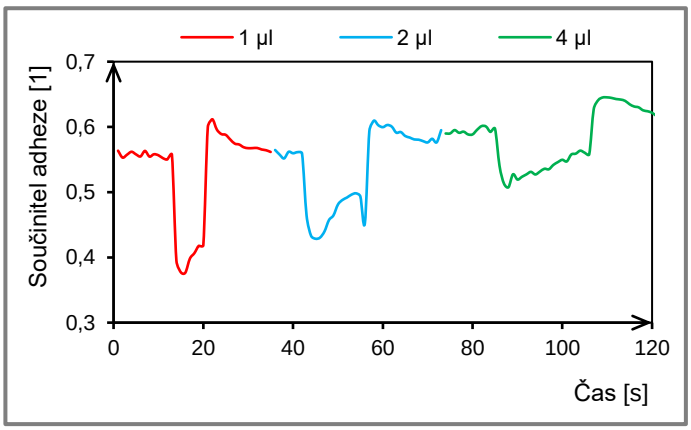
$$\mu = 0{,}0032 \cdot t_v + 0{,}3163 \qquad (5.1)$$

kde:

μ	1	je součinitel adheze
t_v	°C	– teplota vody

5.2.3 Dávkování vody do kontaktu – vliv množství

Jelikož v práci jde o popsání, jakým mechanismem vlhkost ovlivňuje adhezi, tak byly provedeny experimenty s dávkováním vody do kontaktu, které mohou být dále diskutovány a porovnávány s výskytem malého množství kondenzátu. V prvním případě byl sledován vliv množství vody na pokles adheze. Podmínky experimentu popisuje tab. 8. Nižší rychlost valení (0,5 m/s) zde byla navržena z toho důvodu, aby nedocházelo vlivem odstředivé síly k odstřiku aplikovaného množství kontaminantu mimo kontakt. Proměnnou hodnotou zde bylo množství aplikované vody, které v jednotlivých testech odpovídalo (1, 2 a 4) µl.



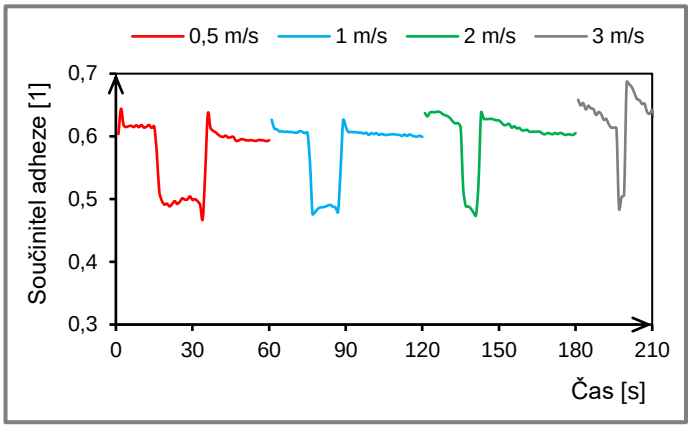
Obr. 5-6 Vliv množství vody na adhezi (0,5 m/s; 5 %; 0,75 GPa)

Vyhodnocení dílčích testů je možné vidět na obr. 5-6. Experimentem bylo zjištěno, že vyšší dávky vody vedou k menšímu poklesu adheze. Při aplikaci 1 µl vody byl zaznamenán pokles součinitele adheze o více než 0,15, zatímco při aplikaci 4 µl vody byl tento pokles méně než 0,1. Zároveň je ovlivněna výdrž adheze na nižší hodnotě. Při aplikaci 4 µl vody do kontaktu byl zaznamenaný pokles adheze téměř 25 s, zatímco při aplikaci 1 µl byl pokles pouze 7 s.

5.2.4 Dávkování vody do kontaktu – vliv rychlosti

5.2.4

Ve druhém případě byl zjišťován vliv rychlosti na adhezi při aplikaci stejného množství vody. Podmínky experimentu byly voleny stejně jako v prvním případě, s tím rozdílem, že aplikované množství vody bylo stanoveno na hodnotu 5 µl a rychlost valení byla proměnná hodnota, která se pohybovala v rozsahu (0,5 až 3) m/s (tab. 9). Bylo provedeno opět několik dílčích experimentů, jejichž vyhodnocení lze vidět na obr. 5-7. Z výsledků plyne, že rychlost valení nemá žádný vliv na pokles adheze, ale naopak s rostoucí rychlostí se snižuje výdrž. Při rychlosti valení 0,5 m/s byl pokles adheze zaznamenaný po dobu 22 s, zatímco při rychlosti 3 m/s byl tento pokles pouze 3 s.



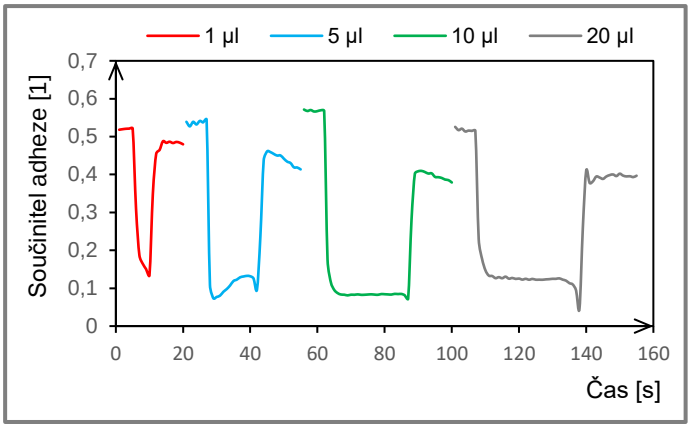
Obr. 5-7 Vliv rychlosti na aplikaci 5 µl vody (5 %; 0,75 GPa)

5.2.5 Dávkování listového extraktu do kontaktu – vliv množství

5.2.5

Podobně jako v případě dávkování vody do kontaktu byly provedeny i experimenty s dávkováním listového extraktu, kde byl sledován pouze vliv aplikovaného množství. Podmínky experimentu byly v tomto případě totožné jako u dávkování vody (tab. 10). Nejprve byly opět provedeny testy, kde byl sledován průběh adheze v čase, přičemž aplikované množství kontaminantu bylo zvoleno jako (1, 5, 10 a 20) µl.

Vyhodnocení těchto dílčích testů je vidět na obr. 5-8. Z výsledků lze říct, že jakékoliv aplikované množství listového extraktu vede k vysokému poklesu adheze, a to až pod hodnotu 0,1. Bylo navíc zjištěno, že vyšší dávky listového extraktu výrazně prodlouží dobu poklesu. Při aplikaci 1 µl byla zaznamenaná doba poklesu adheze 7 s. Při aplikaci 5 µl byla doba poklesu 16 s a při aplikaci 20 µl byla zjištěná doba poklesu adheze dokonce 33 s.



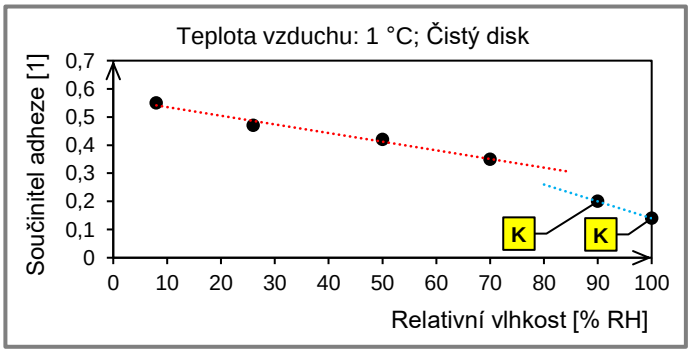
Obr. 5-8 Vliv množství listového extraktu na adhezi (0,5 m/s; 5 %; 0,75 GPa)

5.3 Vliv klimatických podmínek

Pro stanovení vlivu klimatických podmínek byl nejprve stanoven vliv jednoho parametru, a to vliv vzdušné vlhkosti při určité teplotě vzduchu. Teploty vzduchu odpovídaly hodnotám (1, 10, 24, 40, 50) °C. Nejprve byl vždy naměřen průběh adheze v čase za experimentálních podmínek, které popisuje tab. 11. Z těchto „časových" testů, které je možné vidět v příloze, byly vyhodnoceny hodnoty adheze v její ustálené formě. Poté bylo možné sestavit vliv obou parametrů, a to vliv vzdušné vlhkosti a teploty okolního vzduchu na adhezi v podobě 3D mapy, přičemž byl rozlišen stav, kdy nedocházelo ke kondenzaci a naopak stav, kdy docházelo ke kondenzaci.

5.3.1 Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 1 °C

Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 1 °C pro čistý disk byl sestaven na základě naměřených dat průběhu adheze v čase (viz příloha 1). Z vyhodnocení je vidět, že se zvyšující se relativní vlhkostí vzduchu dochází k poklesu součinitele adheze, přičemž při relativní vlhkosti (90 a 100) % nastal stav, kdy došlo ke kondenzaci (obr. 5-9). V případě 90% relativní vlhkosti byla zjištěna hodnota adheze 0,2 a při 100% relativní vlhkosti byla zjištěna adheze 0,14.



Obr. 5-9 Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 1 °C (čistý disk)

Pokles adheze s rostoucí relativní vlhkostí vzduchu při teplotě vzduchu 1 °C je možné popsat lineárním chováním v případě kdy nedošlo (vztah 5.2) i došlo (vztah 5.3) ke kondenzaci.

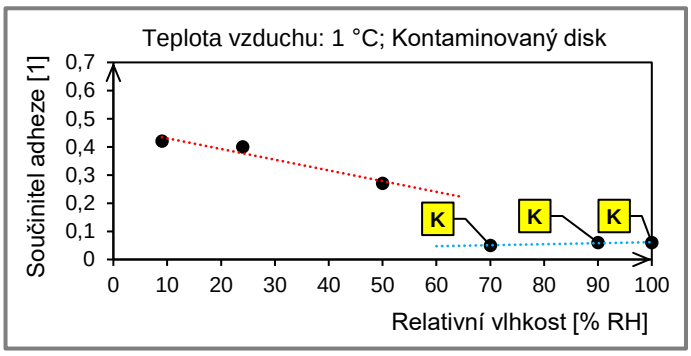
$$\mu_1 = -0{,}0031 \cdot RH + 0{,}5658 \quad (5.2)$$

$$\mu_{1k} = -0{,}006 \cdot RH + 0{,}74 \quad (5.3)$$

kde:

μ_1	1	je součinitel adheze (teplota vzduchu 1 °C)
μ_{1k}	1	je součinitel adheze (teplota vzduchu 1 °C; kondenzace)
RH	%	– relativní vlhkost vzduchu

Vliv vzdušné vlhkosti byl také sestaven pro kontaminovaný disk, přičemž naměřená data průběhu adheze v čase jsou vidět opět v příloze 1. Z vyhodnocení je možné vidět, že se zvyšující se hodnotou relativní vlhkosti dochází opět k poklesu adheze jako v případě čistého disku. Stav kondenzace byl v tomto experimentu zjištěn pro vlhkosti (70, 90 a 100) % RH. Při dosažení kondenzace byl zaznamenán pro kontaminovaný disk vysoký pokles adheze, a to až na hodnotu 0,05 (obr. 5-10). Dále bylo zjištěno, že při nižší relativní vlhkosti je hodnota adheze výrazně nižší než u čistého disku.



Obr. 5-10 Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 1 °C (kontaminovaný disk)

V případě kontaminovaného disku je možné popsat pokles adheze lineárním chováním v oblasti, kdy nedošlo ke kondenzaci (vztah 5.4). V oblasti kondenzace je možné také pozorovat lineární trend, který avšak nepopisuje pokles adheze s rostoucí relativní vlhkostí vzduchu (vztah 5.5), protože při vlhkosti 70 % byla zjištěna nižší hodnota adheze (0,05) než při vlhkosti (90 a 100) %, kde hodnota adheze byla 0,06.

$$\mu_1 = -0{,}0038 \cdot RH + 0{,}4687 \quad (5.4)$$

$$\mu_{1k} = 0{,}0004 \cdot RH + 0{,}0257 \quad (5.5)$$

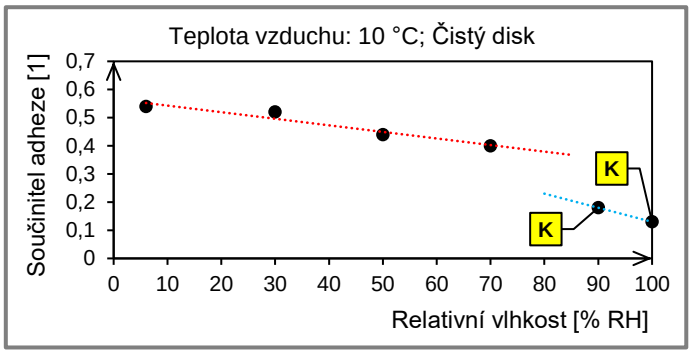
kde:

μ_1	1	je součinitel adheze (teplota vzduchu 1 °C)
μ_{1k}	1	je součinitel adheze (teplota vzduchu 1 °C; kondenzace)
RH	%	– relativní vlhkost vzduchu

5.3.2 Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 10 °C

Pro teplotu vzduchu 10 °C byl sestaven vliv vzdušné vlhkosti na základě naměřených dat průběhu adheze v čase (viz příloha 2). Kondenzace v případě čistého disku byla zjištěna při (90 a 100)% relativní vlhkosti vzduchu. Při těchto hodnotách vlhkosti

byla zjištěna adheze 0,18 a 0,13 (obr. 5-11), což jsou nižší hodnoty, než v případě teploty okolního vzduchu 1 °C, kde také došlo ke kondenzaci při stejné relativní vlhkosti vzduchu.



Obr. 5-11 Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 10 °C (čistý disk)

Pokles adheze v případě čistého disku pro teplotu okolního vzduchu 10 °C lze popsat lineárním chováním, a to v případě stavu bez kondenzace (vztah 5.6) i stavu kondenzace (vztah 5.7).

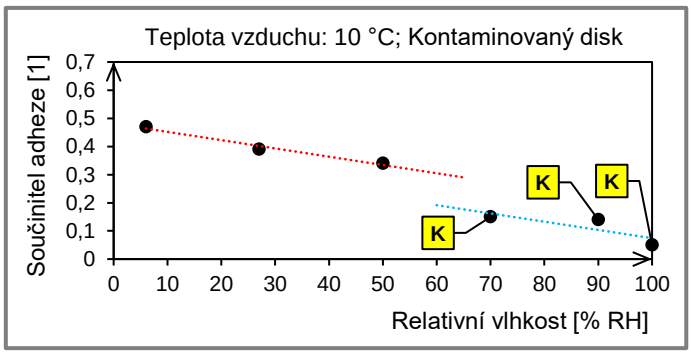
$$\mu_{10} = -0{,}0023 \cdot RH + 0{,}5661 \tag{5.6}$$

$$\mu_{10k} = -0{,}005 \cdot RH + 0{,}63 \tag{5.7}$$

kde:

μ_{10}	1	je součinitel adheze (teplota vzduchu 10 °C)
μ_{10k}	1	je součinitel adheze (teplota vzduchu 10 °C; konden.)
RH	%	– relativní vlhkost vzduchu

U kontaminovaného disku se kondenzace vyskytla opět ve třech případech, a to při (70, 90 a 100)% relativní vlhkosti vzduchu (obr. 5-12). Vysoký pokles adheze byl zpozorován pouze při 100% vlhkosti, a to na hodnotu 0,05. Při vlhkosti (70 a 90) % byla zjištěna adheze kolem hodnoty 0,15. Stav bez kondenzace vykazoval podobné chování jako bylo zjištěno u kontaminovaného disku u teploty okolního vzduchu 1 °C. Pří nízké relativní vlhkosti (6 %) byla v tomto případě (teplota vzduchu 10 °C) adheze mírně vyšší (0,47), zatímco při laboratorní vlhkosti byla zjištěná hodnota adheze téměř totožná. U relativní vlhkosti 50 % byla hodnota adheze opět vyšší (0,34).



Obr. 5-12 Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 10 °C (kontaminovaný disk)

V případě kontaminovaného disku pro teplotu okolního vzduchu 10 °C lze pokles adheze popsat lineárním chováním, a to pro stav bez kondenzace (vztah 5.8) i stav kondenzace (vztah 5.9).

$$\mu_{10} = -0{,}0029 \cdot RH + 0{,}4814 \quad (5.8)$$

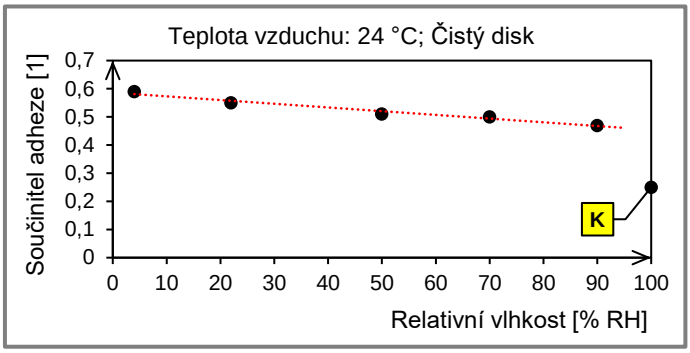
$$\mu_{10k} = -0{,}0029 \cdot RH + 0{,}3671 \quad (5.9)$$

kde:

μ_{10}	1	je součinitel adheze (teplota vzduchu 10 °C)
μ_{10k}	1	je součinitel adheze (teplota vzduchu 10 °C; konden.)
RH	%	– relativní vlhkost vzduchu

5.3.3 Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 24 °C

Pro teplotu vzduchu 24 °C lze vidět naměřená data, podle kterých byl sestaven vliv vzdušné vlhkosti, v příloze 3. Stav kondenzace pro tuto teplotu v případě čistého disku byl zjištěn pouze při relativní vlhkosti 100 %. Zjištěná adheze při tomto stavu byla 0,25 (obr. 5-13), což je mnohem vyšší hodnota než v případě kondenzace při teplotě vzduchu 10 °C nebo 1 °C. Pro stav bez kondenzace lze říct, že hodnoty adheze při určitých relativních vlhkostech byly vyšší než v případě nízkých teplot (1 a 10 °C).



Obr. 5-13 Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 24 °C (čistý disk)

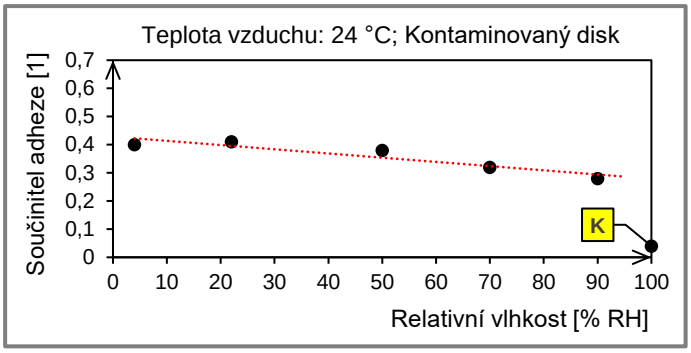
Pokles adheze při teplotě vzduchu 24 °C pro případ čistého disku a stav bez kondenzace vykazuje lineární trend, který lze popsat vztahem 5.10. Stav kondenzace byl zjištěn pouze u jedné hodnoty relativní vlhkosti.

$$\mu_{24} = -0{,}0013 \cdot RH + 0{,}5862 \quad (5.10)$$

kde:

μ_{24}	1	je součinitel adheze (teplota vzduchu 24 °C)
RH	%	– relativní vlhkost vzduchu

V případě kontaminovaného disku se stav kondenzace vyskytl také pouze při 100% relativní vlhkosti, přičemž lze říct, že adheze klesla až na kritickou hodnotu, a to 0,04 (obr. 5-14). Experimentem bylo dále prokázáno, že se zvyšující se teplotou vzduchu již nedochází k vysokému poklesu adheze jako v případě nižších teplot. Při 4 % RH byla zjištěna adheze 0,4, zatímco při 50 % RH byla hodnota adheze 0,38.



Obr. 5-14 Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 24 °C (kontaminovaný disk)

Pro případ kontaminovaného disku, teplotu vzduchu 24 °C a stav bez kondenzace je závislost opět popsána lineárním chováním (vztah 5.11). Stav kondenzace byl také zjištěn pouze u jedné hodnoty relativní vlhkosti.

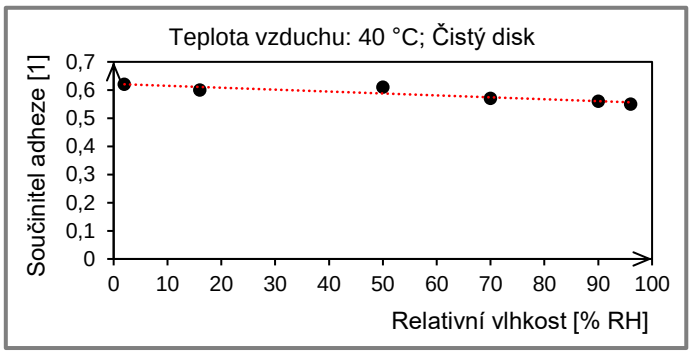
$$\mu_{24} = -0{,}0015 \cdot RH + 0{,}4286 \qquad (5.11)$$

kde:

μ_{24}	1	je součinitel adheze (teplota vzduchu 24 °C)
RH	%	– relativní vlhkost vzduchu

5.3.4 Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 40 °C

Pro teplotu vzduchu 40 °C byl sestaven vliv vlhkosti na základě naměřených dat, které jsou možné vidět v příloze 4. V případě čistého disku nedošlo ke kondenzaci v celém rozsahu testované relativní vlhkosti vzduchu. Lze říct, že byl pozorován mírný pokles adheze se zvyšující se vlhkostí vzduchu. Při relativní vlhkosti 2 % byla zjištěna adheze 0,62, zatímco při vlhkosti 96 % byla hodnota adheze 0,55 (obr. 5-15). Experimentem byl zjištěn jev, že čím vyšší je teplota okolního vzduchu, tím nižší je vliv vzdušné vlhkosti na pokles adheze v případě čistého disku.



Obr. 5-15 Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 40 °C (čistý disk)

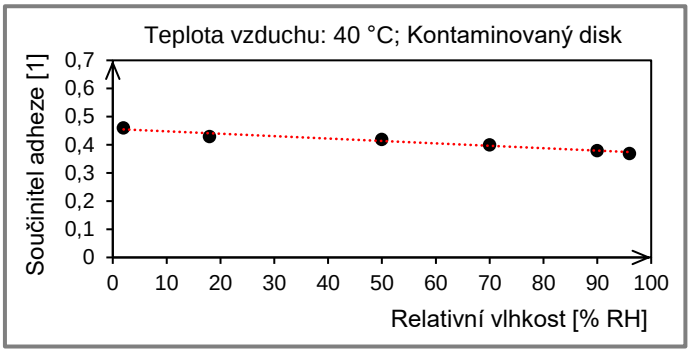
Pokles adheze při teplotě vzduchu 40 °C pro případ čistého disku a stav bez kondenzace vykazuje opět lineární trend, který popisuje vztah 5.12. Stav kondenzace při této teplotě vzduchu nebyl zjištěn.

$$\mu_{40} = -0{,}0007 \cdot RH + 0{,}6218 \qquad (5.12)$$

kde:

μ_{40}	1	je součinitel adheze (teplota vzduchu 40 °C)
RH	%	– relativní vlhkost vzduchu

U kontaminovaného disku při teplotě vzduchu 40 °C také nedošlo ke kondenzaci v celém rozsahu testované relativní vlhkosti. Byl zpozorován mírný pokles adheze. Při vlhkosti 2 % byla zjištěna adheze 0,46 a při vlhkosti 96 % byla hodnota adheze 0,37 (obr. 5-16). Experimentem byl tedy zjištěn podobný jev jako v případě čistého disku. Čím vyšší je teplota okolního vzduchu, tím nižší je vliv vzdušné vlhkosti na adhezi i v případě kontaminovaného disku.



Obr. 5-16 Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 40 °C (kontaminovaný disk)

Naměřenou závislost při teplotě vzduchu 40 °C u kontaminovaného disku pro stav bez kondenzace lze opět popsat lineárním chováním (vztah 5.13). Stav kondenzace při této teplotě vzduchu nebyl zjištěn stejně jako v případě čistého disku.

$$\mu_{40} = -0{,}0009 \cdot RH + 0{,}4565 \qquad (5.13)$$

kde:

μ_{40}	1	je součinitel adheze (teplota vzduchu 40 °C)
RH	%	– relativní vlhkost vzduchu

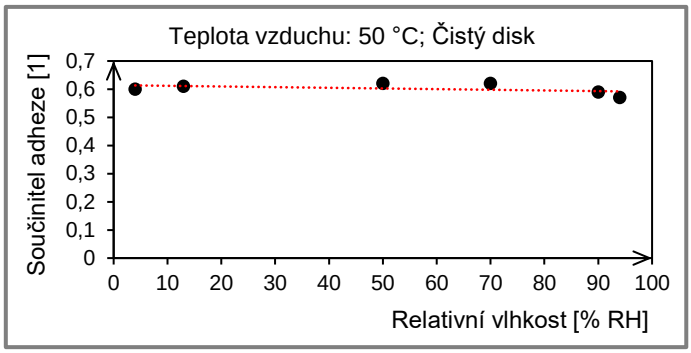
5.3.5 Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 50 °C

Pro teplotu vzduchu 50 °C byl sestaven vliv vlhkosti na základě naměřených dat, které jsou možné vidět v příloze 5. V případě čistého disku opět nedošlo ke kondenzaci v celém rozsahu testované relativní vlhkosti vzduchu. Podobně jako při teplotě vzduchu 40 °C byl i zde pozorován velmi mírný pokles adheze, což potvrzuje předchozí jev. Při vlhkosti 4 % byla zjištěna hodnota adheze 0,6 a při vlhkosti 94 % byla tato hodnota 0,57 (obr. 5-17). Vzdušná vlhkost měla tedy při teplotě 50 °C u čistého disku velmi mírný vliv na adhezi, což potvrzuje lineární trend, který popisuje následující vztah:

$$\mu_{50} = -0{,}0002 \cdot RH + 0{,}6142 \qquad (5.14)$$

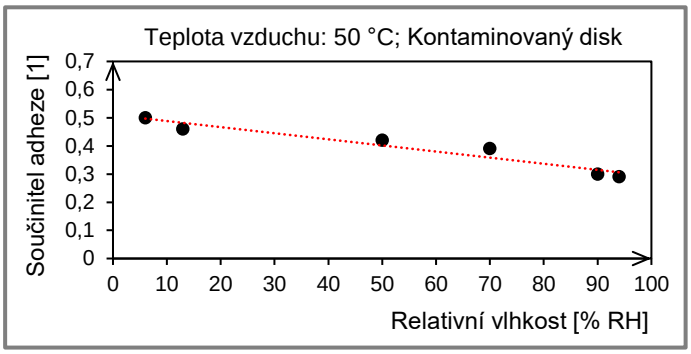
kde:

μ_{50}	1	je součinitel adheze (teplota vzduchu 50 °C)
RH	%	– relativní vlhkost vzduchu



Obr. 5-18 Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 50 °C (čistý disk)

Stav kondenzace nebyl zjištěn ani v případě kontaminovaného disku. Pokles adheze v tomto případě byl s rostoucí relativní vlhkostí mnohem vyšší než při teplotě vzduchu 40 °C, což nevykazuje stejný jev jako v případě čistého disku. Při vlhkosti 6 % byla zjištěna hodnota adheze 0,5, zatímco při vlhkosti 94 % byla tato naměřená hodnota adheze 0,29 (obr. 5-18).



Obr. 5-17 Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 50 °C (kontaminovaný disk)

Pokles adheze při teplotě vzduchu 50 °C u kontaminovaného disku opět vykazuje lineární chování, které popisuje následující vztah:

$$\mu_{50} = -0{,}0022 \cdot RH + 0{,}51 \qquad (5.15)$$

kde:

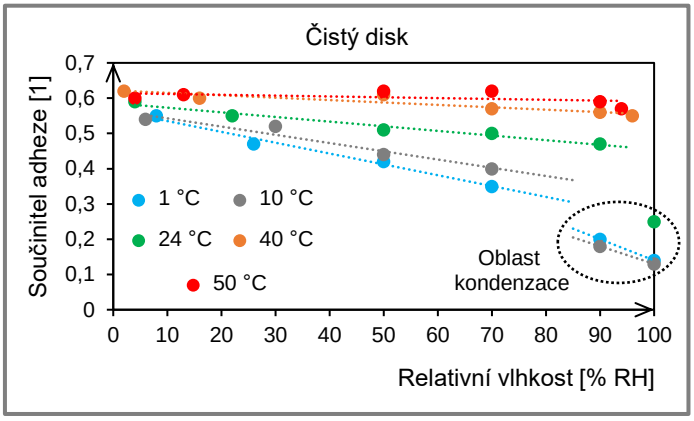
μ_{50}	1	je součinitel adheze (teplota vzduchu 50 °C)
RH	%	– relativní vlhkost vzduchu

5.3.6 Závislost součinitele adheze na relativní vlhkosti vzduchu

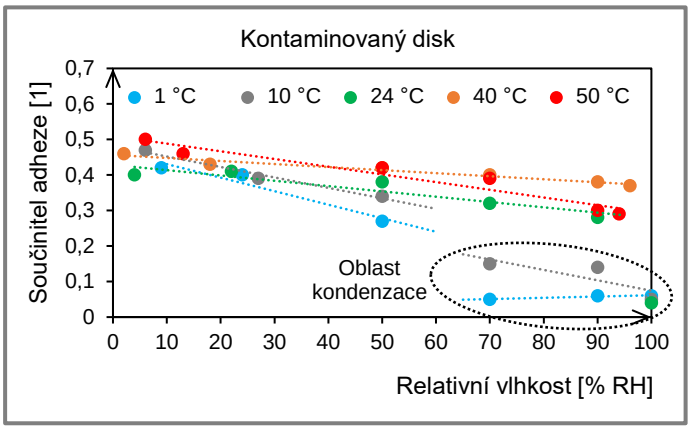
Jednotlivé zjištěné závislosti součinitele adheze na relativní vlhkosti vzduchu byly zobrazeny v jednom grafu, aby bylo možné lépe popsat jejich vliv. Závislost byla vytvořena pro čistý (obr. 5-19) i kontaminovaný (obr. 5-20) disk.

V případě čistého disku je jednoznačně vidět, že se zvyšující se relativní vlhkostí vzduchu dochází k poklesu adheze ve stavu, kdy nedocházelo ke kondenzaci. Tento jev platí u čistého disku pro všechny naměřené teploty vzduchu. Dále lze říct, že při vyšší teplotě vzduchu je vliv vzdušné vlhkosti podstatně menší, což potvrzují výše zmíněné lineární trendy. V oblasti, kdy došlo ke kondenzaci bylo naměřeno pouze pět hodnot, a to v případě nižších teplot a vyšších relativních vlhkostech vzduchu. Bylo

zjištěno, že i v případě stavu kondenzace, má hodnota relativní vzdušné vlhkosti stále významný vliv na adhezi, protože při 100 % RH byla zjištěná adheze v případě teploty (1 a 10) °C nižší než při 90 % RH (obr. 5-19). Dále bylo zjištěno, že při zachování stejné relativní vlhkosti vzduchu adheze roste se zvyšující se teplotou vzduchu, přičemž tento růst je ovlivněný hodnotou relativní vlhkosti. Při 5 % RH se adheze pohybovala v rozsahu (0,54 až 0,62), zatímco při 70 % RH byl tento rozsah (0,35 až 0,62) v oblasti bez kondenzace. Pro oblast kondenzace tento jev nelze potvrdit.



Obr. 5-19 Vliv součinitele adheze na relativní vlhkost (čistý disk)



Obr. 5-20 Vliv součinitele adheze na relativní vlhkost (kontaminovaný disk)

V případě kontaminovaného disku také dochází se zvyšující se relativní vlhkostí vzduchu k poklesu adheze. Výjimka byla zjištěna pouze u teploty vzduchu 1 °C v oblasti kondenzace (obr. 5-20). Nelze potvrdit, že se zvyšující se teplotou vzduchu je vliv vzdušné vlhkosti menší, protože při teplotě 50 °C byl zjištěn vyšší pokles adheze než při teplotě 40 °C. Závislost teploty vzduchu na adhezi při stejné relativní vlhkosti vzduchu není zcela jednoznačná jako v případě čistého disku. Nárůst adheze se zvyšující se teplotou vzduchu lze potvrdit pouze v případě 50 % RH.

5.3.7 Závislost součinitele adheze na absolutní vlhkosti vzduchu

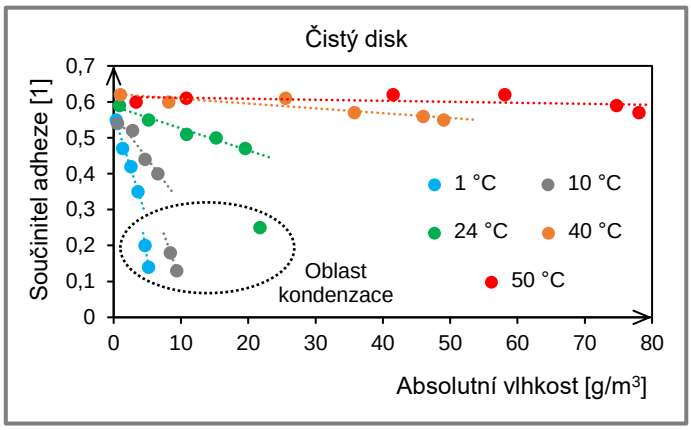
Teplota okolního vzduchu a jeho relativní vlhkost jsou dva parametry, které je možné popsat pomocí jednoho parametru, a to absolutní vlhkostí. Absolutní vlhkost udává hmotnost vodních par v 1 m^3 vzduchu a je popsána následujícím vztahem [29]:

$$AH = \frac{6{,}112 \cdot e^{\frac{17{,}67 \cdot t}{t+243{,}5}} \cdot 2{,}164 \cdot RH}{273{,}15 + t} \tag{5.16}$$

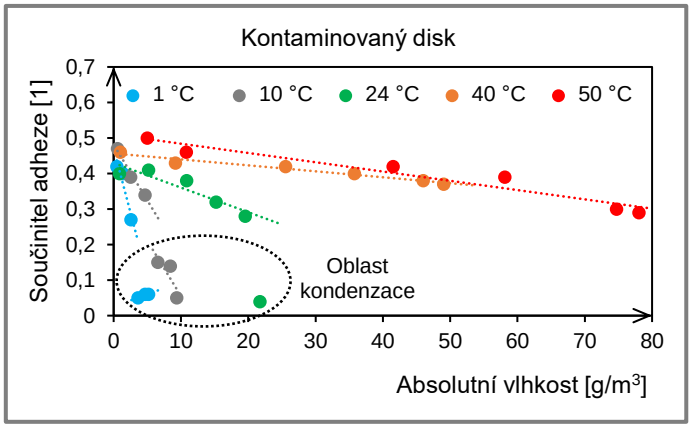
kde:

AH	g · m^{-3}	je absolutní vlhkost vzduchu
RH	%	– relativní vlhkost vzduchu
t	°C	– teplota vzduchu

Pro všechna měření byl vytvořen graf, který popisuje závislost součinitele adheze na absolutní vlhkosti vzduchu. Závislost byla vytvořena pro čistý (obr. 5-21) i pro kontaminovaný (obr. 5-22) disk. Pro oba případy lze říct, že pokud je teplota okolního vzduchu nízká, pak se zvyšující se hmotností vodní páry dochází k výraznému poklesu adheze, a to zejména v oblasti, kdy nedocházelo ke kondenzaci. Podobný jev se vyskytuje i v případě vyšších teplot, ale pouze u kontaminovaného disku (obr. 5-22). V případě čistého disku byla hodnota adheze při vyšších teplotách (40 a 50 °C) téměř konstantní s mírnou fluktuací (obr. 5-21). Pro oblast kondenzace lze říct, že nastala pouze při teplotách (1, 10 a 24) °C a to pro oba typy disků. Hodnota adheze při kondenzaci byla výrazně nižší než v případě bez kondenzace. Fotografie stavu kondenzace pro oba typy disků je možné vidět v příloze 6.



Obr. 5-21 Vliv součinitele adheze na absolutní vlhkost (čistý disk)



Obr. 5-22 Vliv součinitele adheze na absolutní vlhkost (kontaminovaný disk)

Z grafů je vidět, že všechny závislosti vykazují lineární chování. V případě čistého disku lze říct, že závislosti vyznačují pokles adheze s rostoucí absolutní vlhkostí vzduchu, a to pro oblast bez kondenzace i oblast kondenzace. V případě kontaminovaného disku nevyznačuje pokles adheze pouze závislost při teplotě vzduchu 1 °C v oblasti, kde došlo ke kondenzaci. Je to kvůli tomu, že při relativní vlhkosti vzduchu 70 % byla naměřena hodnota součinitele adheze nižší než při relativní vlhkosti (90 a 100) %. Lineární závislosti pro čistý disk popisují vztahy (5.17 až 5.23) a pro kontaminovaný disk vztahy (5.24 až 5.30).

Čistý disk

$$\mu_1 = -0{,}0593 \cdot AH + 0{,}5658 \quad (5.17)$$

$$\mu_{1k} = -0{,}1157 \cdot AH + 0{,}74 \quad (5.18)$$

$$\mu_{10} = -0{,}0249 \cdot AH + 0{,}5661 \quad (5.19)$$

$$\mu_{10k} = -0{,}0533 \cdot AH + 0{,}63 \quad (5.20)$$

$$\mu_{24} = -0{,}0061 \cdot AH + 0{,}5875 \quad (5.21)$$

$$\mu_{40} = -0{,}0013 \cdot AH + 0{,}6218 \quad (5.22)$$

$$\mu_{50} = -0{,}0003 \cdot AH + 0{,}6142 \quad (5.23)$$

Kontaminovaný disk

$$\mu_1 = -0{,}0723 \cdot AH + 0{,}4708 \quad (5.24)$$

$$\mu_{1k} = 0{,}0069 \cdot AH + 0{,}0257 \quad (5.25)$$

$$\mu_{10} = -0{,}0314 \cdot AH + 0{,}4814 \quad (5.26)$$

$$\mu_{10k} = -0{,}0312 \cdot AH + 0{,}3671 \quad (5.27)$$

$$\mu_{24} = -0{,}0069 \cdot AH + 0{,}4296 \quad (5.28)$$

$$\mu_{40} = -0{,}0017 \cdot AH + 0{,}4565 \quad (5.29)$$

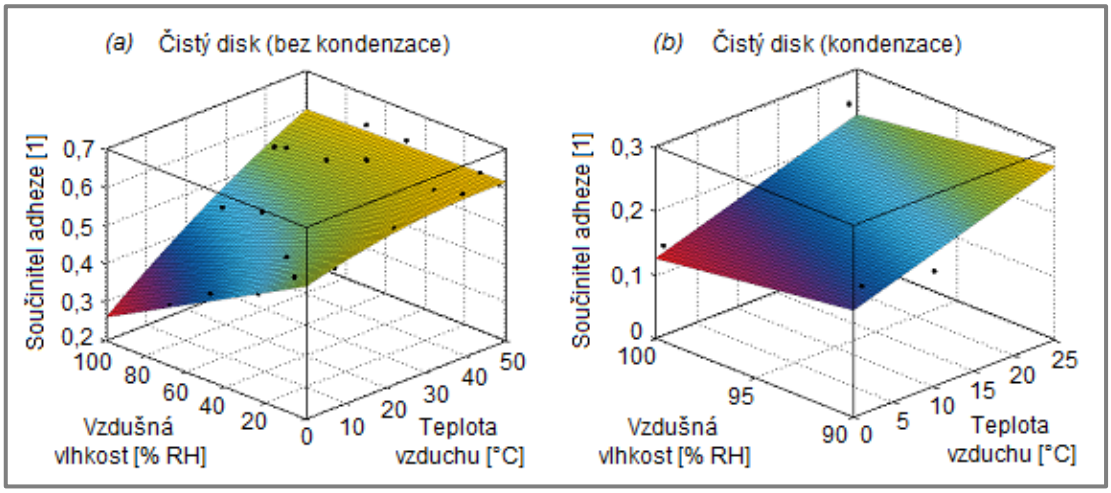
$$\mu_{50} = -0{,}0026 \cdot AH + 0{,}51 \quad (5.30)$$

kde:

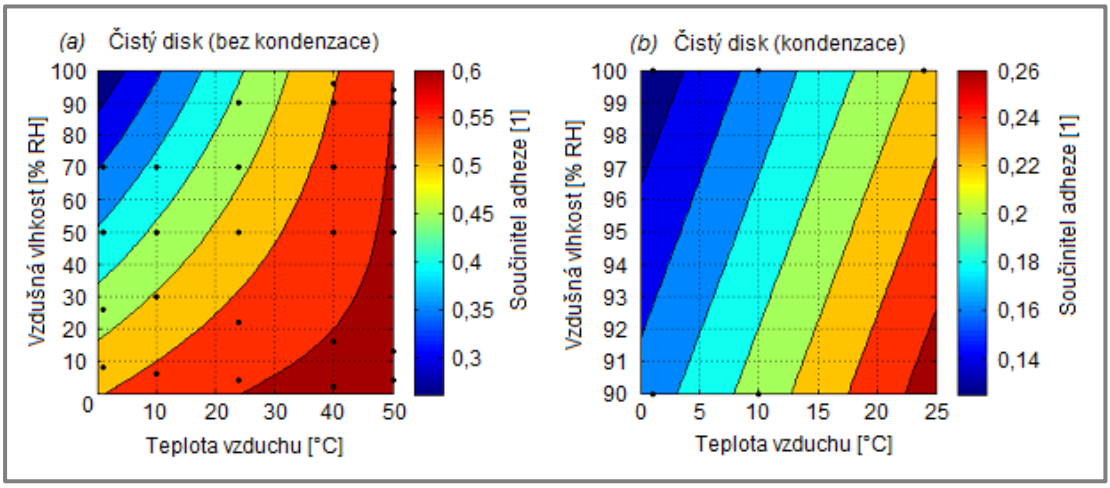
μ_1	1	je součinitel adheze (teplota vzduchu 1 °C)
μ_{1k}	1	je součinitel adheze (teplota vzduchu 1 °C; kondenzace)
μ_{10}	1	je součinitel adheze (teplota vzduchu 10 °C)
μ_{10k}	1	je součinitel adheze (teplota vzduchu 10 °C; konden.)
μ_{24}	1	je součinitel adheze (teplota vzduchu 24 °C)
μ_{40}	1	je součinitel adheze (teplota vzduchu 40 °C)
μ_{50}	1	je součinitel adheze (teplota vzduchu 50 °C)
AH	$g \cdot m^{-3}$	– absolutní vlhkost vzduchu

5.3.8 3D mapy (čistý disk)

Pro stanovení vlivu vzdušné vlhkosti a teploty okolního vzduchu byly vytvořeny 3D mapy. V tomto případě byla použita naměřená data u čistého disku ve stavu, kdy nedochálo (obr. 5-23*a*) a docházelo (obr. 5-23*b*) ke kondenzaci. Pro lepší interpretaci byl navíc vytvořen konturový graf pro oba stavy (obr. 5-24), kde je vidět, že predikční vztah pro stav bez kondenzace (vztah 5.31) je platný pro vzdušnou vlhkost v rozsahu (0 až 100) % RH a teplotu okolního vzduchu v rozsahu (0 až 50) °C. Predikční vztah pro stav kondenzace (vztah 5.32) je platný pro vzdušnou vlhkost v rozsahu (90 až 100) % RH a teplotu okolního vzduchu v rozsahu (0 až 25) °C.



Obr. 5-23 3D mapy (čistý disk)



Obr. 5-24 Konturové grafy (čistý disk)

Predikční vztahy pro případ čistého disku:

$$\mu = 0{,}5461 + 0{,}003029 \cdot t - 0{,}002844 \cdot RH - 3{,}346 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 5{,}401 \cdot 10^{-5} \cdot t \cdot RH \quad (5.31)$$

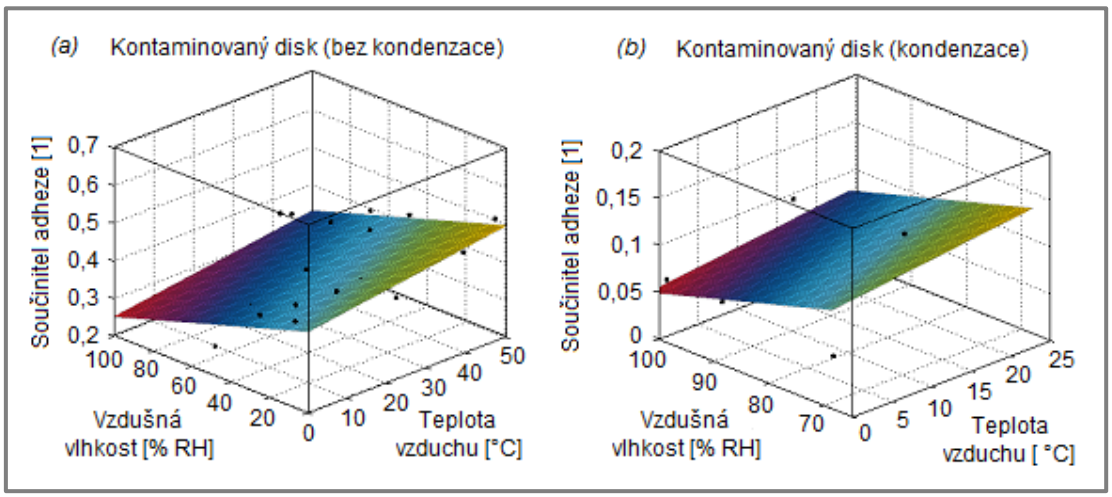
$$\mu_k = 0{,}5475 + 0{,}004151 \cdot t - 0{,}004226 \cdot RH \quad (5.32)$$

kde:

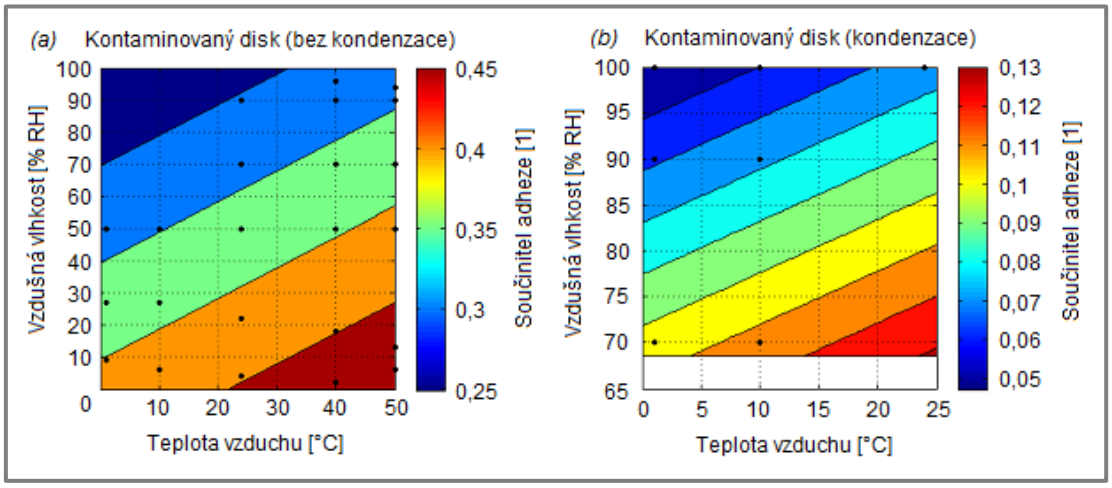
μ	1	je součinitel adheze (stav bez kondenzace)
μ_k	1	je součinitel adheze (stav kondenzace)
t	°C	– teplota vzduchu
RH	%	– relativní vlhkost vzduchu

5.3.9 3D mapy (kontaminovaný disk)

V případě kontaminovaného disku byly také vytvořeny 3D mapy pro stanovení vlivu vzdušné vlhkosti a teploty okolního vzduchu. Byla použita data pro stav, kdy nedocházelo (obr. 5-25*a*) a docházelo (obr. 5-25*b*) ke kondenzaci. Konturový graf byl vytvořen i v tomto případě pro oba stavy (obr. 5-26). Predikční vztah u kontaminovaného disku ve stavu bez kondenzace (vztah 5.33) je platný pro vzdušnou vlhkost v rozsahu (0 až 100) % RH a teplotu okolního vzduchu v rozsahu (0 až 50) °C. Pro stav kondenzace je predikční vztah (vztah 5.34) platný v rozsahu vzdušné vlhkosti (70 až 100) % RH a teploty okolního vzduchu (0 až 25) °C.



Obr. 5-25 3D mapy (kontaminovaný disk)



Obr. 5-26 Konturové grafy (kontaminovaný disk)

Predikční vztahy pro případ kontaminovaného disku:

$$\mu = 0{,}4153 + 0{,}001587 \cdot t - 0{,}001662 \cdot RH \quad (5.33)$$

$$\mu_k = 0{,}2278 + 0{,}001031 \cdot t - 0{,}00178 \cdot RH \quad (5.34)$$

kde:

μ	1	je součinitel adheze (stav bez kondenzace)
μ_k	1	je součinitel adheze (stav kondenzace)
t	°C	– teplota vzduchu
RH	%	– relativní vlhkost vzduchu

6 DISKUZE

6.1 Uvažovaná zjednodušení a vliv na výsledky

Experimentální výzkum v laboratorních podmínkách probíhal na tribometru MTM. Kontaktními tělesy byla kulička a disk. Kontaktní plocha v této konfiguraci má kruhový tvar, což je podstatný rozdíl oproti reálné kontaktní ploše, která se vyznačuje eliptickým tvarem z důvodu zaoblení kontaktního povrchu kolejnice.

Jako materiál kontaktních těles byla zvolena ocel AISI 52100, která se vyznačuje vyšším obsahem chromu (1,3 až 1,6) % a zejména vyšším obsahem uhlíku (0,98 až 1,1) % [30] oproti běžným materiálům kola a kolejnice, kde se obsah uhlíku pohybuje v rozsahu (0,55 až 0,77) [6]. Vyšší obsah chromu a uhlíku má podstatný vliv na tvrdost materiálu. Ve skutečnosti materiál kola obsahuje méně uhlíku než materiál kolejnice, což ve výsledku znamená, že kolo má menší tvrdost než kolejnice. Tímto způsobem dochází na reálné trati spíše k opotřebení kola, což je z ekonomického i praktického hlediska lepší. V tomto případě laboratorního výzkumu byl volen stejný materiál pro obě kontaktní tělesa a nebyl tedy žádný rozdíl mezi tvrdostí disku a kuličky. V důsledku vyššího obsahu chromu a uhlíku byla tvrdost kontaktních těles mnohem vyšší, než tvrdost materiálu skutečného kola a kolejnice.

Mezi další zjednodušení patří hodnota zátěžné síly. Pro všechny experimenty byla stanovena hodnota síly taková, aby odpovídala kontaktnímu tlaku 0,75 GPa. Tato hodnota byla zvolena na základě prvotních testů, kde bylo zjištěno, že z bezpečnostních důvodů byl několikrát test předčasně ukončen při vyšším kontaktním tlaku (1 GPa). Kontaktní tlak 0,75 GPa měl také představovat kontakt tramvaje s kolejnicí, kde kontaktní tlak nabývá hodnot (0,8 až 0,9) GPa. Vlivem opotřebení kontaktních těles se během jednotlivých experimentů kontaktní plocha zvětšovala a kontaktní tlak se tedy mírně zmenšoval.

Na výsledky má podstatný vliv laboratorní prostředí. Hodnoty adheze získané na laboratorních zařízení jsou téměř vždy vyšší než získané hodnoty na reálné trati. Hodnota adheze za sucha v laboratorních podmínkách byla zjištěna v rozsahu (0,6 až 0,7) a to na zařízení MTM, kde kontaktní tlak byl 0,75 GPa, skluz 5 % a rychlost valení 0,3 m/s. Podobné výsledky získal i ve své práci [7] Zhu, který zjišťoval adhezní charakteristiku za sucha rovněž na zařízení MTM. Při skluzu 5 %, kontaktního tlaku 0,7 GPa a rychlosti valení 1,5 m/s se pohyboval v rozsahu adheze (0,6 až 0,8). Nižší hodnota adheze byla zjištěna na zařízení JD-1, která se pohybovala kolem 0,45 [6]. V porovnání s adhezí za sucha na reálné trati, kde byla zjištěna běžná hodnota adheze 0,42 [31], je hodnota zjištěná pomocí MTM téměř dvojnásobná.

Při plně zaplaveném kontaktu vodou v laboratorních podmínkách byla zjištěna hodnota adheze na MTM v rozsahu (0,2 až 0,65), přičemž záleží na skluzu a rychlosti valení. Velmi malé hodnoty skluzu (< 2 %) vykazovaly mnohem nižší adhezi, než je uvedeno ve zmiňovaném rozsahu. Při skluzu 5 % byl rozsah adheze (0,3 až 0,65), přičemž se zvyšující se rychlostí valení byla adheze nižší. Při nízké rychlosti valení byla tedy při plně zaplaveném kontaktu vodou zjištěna podobná hodnota adheze jako v případě suchého kontaktu. Součinitel adheze za mokrých podmínek na reálné trati byl zjištěn kolem 0,39 [31]. Tato hodnota byla zjištěna i na MTM v případě vyšších rychlostech valení. Nízké hodnoty adheze byly dále zjištěny na laboratorním zařízení „roller rig“, ale pouze při velmi vysokých rychlostech valení (120 až 280 km/h) [5].

6.2 Shrnutí nejdůležitějších poznatků

„Suchý“ kontakt

- Do kontaktu nejsou cíleně přidávány žádné látky.
- Zjištěná adheze se pohybovala v rozsahu (0,6 až 0,7).

Kontaminace vodou

Plně zaplavený kontakt

- Se zvyšující se rychlostí valení dochází k poklesu hodnoty adheze.
- Při vyšších rychlostech valení nastává bod saturace již při nižším skluzu.
- Adhezní křivky ve své neefektivní části vykazují negativní trend.
- Hodnota adheze se pohybovala v rozsahu (0,2 až 0,65).
- Součinitel adheze roste s teplotou vody lineárně.

Aplikace malého množství

- Menší množství (1 µl) vede k vyššímu poklesu hodnoty adheze.
- Doba poklesu adheze se zvyšuje se zvyšujícím se aplikovaném množství.
- Pokles adheze při různé rychlosti valení je téměř totožný při stejném aplikovaném množství.
- Doba poklesu adheze se zvyšující se rychlostí valení je výrazně nižší.

Kontaminace listovým extraktem

Aplikace malého množství

- Listový extrakt poskytuje velmi velký pokles adheze až na kritickou hodnotu (< 0,1).
- Aplikace různého množství kontaminantu nemá výrazný vliv na pokles adheze. Pouze při aplikaci 1 µl listového extraktu byl zjištěn nepatrně nižší pokles než v ostatních případech.
- Doba poklesu adheze se výrazně zvyšuje se zvyšujícím se aplikovaném množství podobně jako v případě aplikace vody.

Klimatické podmínky

- Se zvyšující se relativní vlhkostí vzduchu byl zjištěn pokles adheze pro oba případy testovaných disků.

- S rostoucí teplotou okolního vzduchu má vzdušná vlhkost podstatně nižší vliv na adhezi téměř ve všech případech. Výjimka byla zjištěna pouze u kontaminovaného disku při teplotě vzduchu 50 °C.

- Při nižší teplotě vzduchu byl zjištěn stav kondenzace, který se ale vyskytoval pouze u vyšších hodnot relativních vlhkostí.

- Pokud nastal stav kondenzace, pak byla zjištěna výrazně nižší hodnota adheze. U kontaminovaného disku byla tato hodnota vysoce kritická (0,04).

- Absolutní vlhkost vzduchu je parametr, který zahrnuje relativní vlhkost a teplotu okolního vzduchu. Se zvyšující se absolutní vlhkostí vzduchu dochází při určité teplotě vzduchu ke snížení hodnoty adheze, a to v případě čistého i kontaminovaného disku.

6.3 Vědecká otázka a ověření hypotézy

Položená vědecká otázka je: *„Jaká je hodnota adheze v kontaktu kola a kolejnice, jestliže nedochází/dochází ke kondenzaci vlivem kombinace vzdušné vlhkosti a teploty okolního vzduchu?“*. Následně byla vytvořena pracovní hypotéza: *„Se zvyšující se vzdušnou vlhkostí dochází k poklesu hodnoty adheze v kontaktu kola a kolejnice, přičemž při dosažení rosného bodu (kondenzace) je tento pokles adheze mnohem vyšší.“*

Na základě provedeného výzkumu lze říct, že se zvyšující se relativní vzdušnou vlhkostí dochází opravdu k poklesu adheze. V případě nižších teplot okolního vzduchu je tento pokles adheze vyšší, ale k poklesu dochází i při vyšších teplotách v obou případech testovaných disků. Při výskytu kondenzace bylo zjištěno, že hodnota adheze je výrazně nižší. V případě kontaminovaného disku byla zjištěna až velmi kritická hodnota adheze (0,04). Lze tedy říct, že vyslovená **hypotéza byla potvrzena**.

6.4 Predikce výskytu rosného bodu

Výskyt rosného bodu lze predikovat na základě Magnusovy rovnice (vztah 6.1), která zahrnuje teplotu okolního vzduchu a vzdušnou vlhkost. Tato rovnice platí v teplotním rozsahu (-35 až 60) °C. Pokud naměřená teplota povrchu objektu (v tomto případě povrchu disku) je nižší než teplota rosného bodu, pak podle predikce nastává stav kondenzace. [32]

$$T_{DP} = \frac{243{,}12 \cdot \left\{\ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{17{,}62 \cdot t}{243{,}12 + t}\right\}}{17{,}62 - \left\{\ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{17{,}62 \cdot t}{243{,}12 + t}\right\}} \qquad (6.1)$$

kde:

T_{DP}	°C	je teplota rosného bodu
RH	%	– relativní vlhkost vzduchu
t	°C	– teplota vzduchu

Srovnání predikce a skutečnosti výskytu rosného bodu popisuje tab. 12. V pracovním prostoru byla měřena pomocí termočlánku teplota vzduchu během výdrže (10 min) v daných podmínkách před experimentem. Hodnota uvedená v tabulce představuje průměrnou hodnotu. Druhý sloupec tabulky představuje hodnotu vzdušné vlhkosti, která se ale vlivem regulace během experimentu mírně měnila. Ve třetím sloupci tabulky je vypočítaná teplota rosného bodu podle Magnusovy rovnice a ve čtvrtém sloupci je teplota povrchu disku, která byla naměřena pomocí termočlánku těsně před spuštěním jednotlivých testů. Pro přehlednost tabulky byly vybrány pouze stavy, kdy skutečně ke kondenzaci došlo, což bylo ověřeno vizuálně. Pro tyto stavy byla určena predikce.

Jak je vidět z tab. 12, tak predikce a skutečnost výskytu kondenzace se shodovala pouze ve dvou případech, a to u čistého disku při teplotě vzduchu 11,8 °C a vzdušné vlhkosti 90 % RH. Druhý případ nastal u kontaminovaného disku při teplotě vzduchu 24,2 °C a vzdušné vlhkosti 100 % RH. Ve všech ostatních případech (čistého i kontaminovaného disku) byla teplota povrchu disku vždy vyšší než vypočítaná teplota rosného bodu a ke kondenzaci tedy dojít nemělo.

Tab. 12 Predikce výskytu rosného bodu

Skutečná teplota vzduchu [°C]	Vzdušná vlhkost [%]	Teplota rosného bodu (predikce) [°C]	Teplota povrchu disku před testem [°C]	Výskyt kondenzace (skutečnost)	Výskyt kondenzace (predikce)
Čistý disk					
1,6	90	0,14	3,6	ANO	NE
1,6	100	1,6	2,2	ANO	NE
11,8	90	10,21	9,6	**ANO**	**ANO**
9,1	100	9,1	10,4	ANO	NE
24,4	100	24,4	25,3	ANO	NE
Kontaminovaný disk					
1,1	70	-3,77	3,8	ANO	NE
2,8	90	1,32	2,1	ANO	NE
0,6	100	0,6	2,5	ANO	NE
9,7	70	4,49	9,8	ANO	NE
8,8	90	7,25	10,2	ANO	NE
9	100	9	9,5	ANO	NE
24,2	100	24,2	24	**ANO**	**ANO**

Neshodnost predikce a skutečnosti výskytu kondenzace může mít za následek několik vlivů. Jedná se především o vzdušnou vlhkost, která se vlivem regulace měnila. Dalším vlivem je přesnost měřených hodnot teploty vzduchu v pracovním prostoru. Tato teplota byla měřena pouze poblíž kontaktu za pomocí jednoho termočlánku. V pracovním prostoru tedy mohla být teplota vzduchu rozdílná. Kombinací teploty a vysoké vlhkosti vzduchu pak došlo pravděpodobně ke kondenzaci.

6.5 Diskuze a srovnání s již publikovanými výsledky

Naměřená hodnota adheze na MTM v konfiguraci „ball on disc“ za suchých podmínek se pohybovala v rozsahu (0,6 až 0,7) při experimentálních podmínkách, které uvádí tab. 5. Počáteční fáze záběhu byla překonána poměrně rychle a adheze se ustálila na hodnotě 0,62. Ke konci testu adheze stoupla až na hodnotu 0,67 (obr. 5-1), což mohlo být způsobeno výskytem částic opotřebení v kontaktu. Naměřená hodnota adheze je v souladu s prací [7], kde byla zjišťována adhezní charakteristika. Adheze při bodu saturace se pohybovala také v rozsahu (0,6 až 0,7). Stejné hodnoty adheze byly také zjištěny v případě „pin on disc“ experimentů [3] a dokonce i na reálné železniční trati, přičemž byly použity ruční tribometry [33]. Nižší adheze (0,4) byla zjištěna na zařízení SUROS [34]. V experimentech, kde byly použity zařízení s reálným měřítkem, byly také zjištěny nižší hodnoty adheze při bodu saturace [35]. Bylo také zjištěno snížení adheze po dosažení bodu saturace, což bylo pravděpodobně způsobeno díky teplotnímu efektu [36].

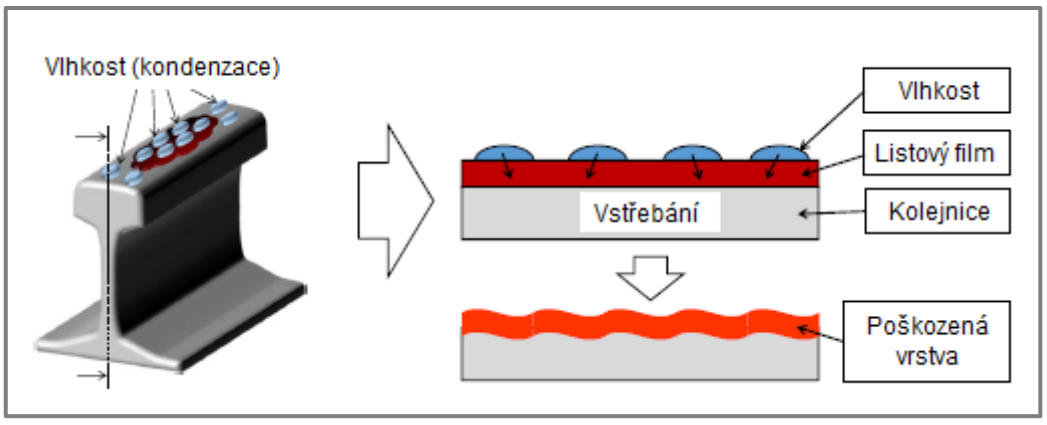
V případě plně zaplaveného kontaktu vodou (stav, kdy se obě kontaktní tělesa brodí v kapalině) byla zjištěna adheze v rozsahu (0,2 až 0,65). Hodnota adheze silně závisí na rychlosti valení a skluzu (obr. 5-2). Při velmi malém skluzu byla hodnota adheze mnohem menší, než popisuje zmiňovaný rozsah. Při nízké rychlosti valení (0,5 m/s) byla adheze při bodu saturace totožná jako v případě suchého kontaktu. Získané adhezní charakteristiky vykazují ve všech případech testovaných rychlostí po dosažení bodu saturace negativní trend, což zjistil i Zhang [5]. V jeho případě byly ale experimenty provedeny na „full scale“ zařízení při zatížení 44 kN a to pro vysoké rychlosti valení (120 až 280 km/h). Maximální hodnota adheze se za těchto podmínek pohybovala v rozsahu (0,06 až 0,13). Podobnou adhezi za mokrých podmínek (0,05 až 0,2) také pozoroval Nagase [37]. Na adhezi má podstatný vliv teplota vody. Experimentem bylo zjištěno, že s rostoucí teplotou vody dochází k nárůstu adheze (obr. 5-5). Při vyšší teplotě bude mít voda nižší viskozitu. Důsledkem toho bude mazací film mezi kontaktními povrchy tenčí a dojde tak snáze ke kontaktu povrchových mikronerovností, díky kterým bude adheze v kontaktu vyšší [13]. Podobný jev pozoroval Chen [14], který navíc pomocí numerické simulace potvrdil tento jev i pro velmi vysoké rychlosti valení (až 400 km/h) [13].

Při dávkování malého množství vody do kontaktu bylo zjištěno, že s rostoucím množstvím dochází k nižšímu poklesu adheze, ale naopak se podstatně zvyšuje doba poklesu (obr. 5-6). Při aplikaci 1 µl byla zjištěna hodnota adheze 0,38, přičemž pokles na této hodnotě trval 7 s. Naopak při aplikaci 4 µl byla zjištěna hodnota součinitele adheze 0,51 s dobou poklesu 25 s. Při dávkování malého množství vody do kontaktu byl také zkoumán vliv rychlosti, přičemž bylo zjištěno, že rychlost valení nemá vliv na míru poklesu adheze. S rostoucí rychlostí valení je ale značně ovlivněna doba poklesu adheze (obr. 5-7). Při rychlosti valení 0,5 m/s byl zjištěn pokles adheze po dobu 22 s, zatímco při rychlosti 3 m/s byla doba poklesu adheze 3 s. Z bezpečnostního hlediska je mnohem horší aplikace menšího množství vody při nižších rychlostech valení, protože pokles adheze i doba poklesu je mnohem vyšší. Při aplikaci většího množství vody může nastat vyčištění kontaktu s menším poklesem adheze. Při vyšší rychlosti valení a aplikaci většího množství vody by ale mohlo dojít vlivem odstředivé síly k odstřiku aplikovaného množství mimo kontakt a ve skutečnosti by pak mohl nastat stav, kdy by bylo do kontaktu aplikováno menší množství vody při vyšší rychlosti valení, přičemž by došlo k velkému poklesu adheze na krátkou dobu.

Při kontaminaci listovým extraktem bylo zjištěno, že aplikace vyššího množství kontaminantu výrazně ovlivňuje dobu poklesu adheze, přičemž pokles adheze je téměř vždy stejný a dosahuje kritické hodnoty (obr. 5-8). Po aplikaci kontaminantu se adheze nikdy nevrátila na svoji původní hodnotu. Dosažená hodnota adheze při aplikaci listového extraktu téměř odpovídá aplikaci oleje do kontaktu, kde byla zjištěna adheze 0,07 [17]. Kritický pokles adheze při aplikaci listového extraktu byl zjištěn i na tribometru „twin disc“ [38]. Při velice nízkých hodnotách adheze (0,025 až 0,1) se pohyboval také Nagase [37], který ale do kontaktu aplikoval přímo listí.

Práce byla zejména zaměřena na vliv vzdušné vlhkosti a teploty okolního vzduchu. Testovány byly dva typy disků, přičemž jeden z nich byl vystaven kontaminaci listovým extraktem. Lze říct, že se zvyšující se vzdušnou vlhkostí dochází k poklesu adheze, a to pro oba typy disků (obr. 5-19 a 5-20), což zjistil i Lyu [39], Baek [9] a Olofsson [3]. V případě kontaminovaného disku byly celkově hodnoty adheze nižší (obr. 5-20), protože mezi kontaktními povrchy byla vytvořena třetí vrstva tvořená částicemi opotřebení a listovým extraktem. Při vyšší teplotě vzduchu byl také zaznamenán nižší pokles adheze s rostoucí relativní vlhkostí vzduchu. V případě výskytu rosného bodu byla hodnota adheze mnohem nižší. U čistého disku se hodnota adheze v případě kondenzace pohybovala v rozsahu (0,13 až 0,25), u kontaminovaného disku byl rozsah adheze (0,04 až 0,15). Při dávkování malého množství vody do kontaktu byla zjištěna mnohem vyšší adheze než při výskytu kondenzace. Naopak při kontaminaci listovým extraktem byl zjištěn pokles adheze, který odpovídá výskytu kondenzace pro případ kontaminovaného disku. Totéž zjistila i Cannová [40], která prováděla experimenty s listovým extraktem na MTM a pohybovala se v rozsahu hodnot (0,03 až 0,1).

Velký pokles adheze v případě kontaminovaného disku při výskytu kondenzace je pravděpodobně způsobený mechanismem, který popisuje obr. 6-1. Při výskytu kondenzace dojde ke kontaktu kondenzátu s listovým filmem, který je vytvořen na povrchu kolejnice. Listový film následně absorbuje vlhkost (kondenzát) přičemž dojde ke změně mechanických vlastností. Vznikne tak poškozená vrstva, která se vyznačuje zejména nižší pevností ve smyku, což způsobuje velmi nízkou hodnotu adheze [23].



Obr. 6-1 Důsledek kondenzace na výrazný pokles adheze – upraveno [23]

Naměřené závislosti byly také vyhodnoceny v podobě absolutní vlhkosti, kde je vidět, že s rostoucí absolutní vlhkostí adheze klesá (obr. 5-21 a 5-22). Podobný jev zjistil i Lyu [39]. Pro stav bez kondenzace u čistého disku byly i hodnoty adheze při teplotě vzduchu 10 °C shodné.

7 ZÁVĚR

Předložená diplomová práce se zabývá vlivem klimatických podmínek (vzdušná vlhkost a teplota vzduchu) na adhezi kontaktu kola a kolejnice. Jedná se o experimentální výzkum na tribometru MTM, přičemž byly rozlišeny dva typy disků, z nichž jeden byl vystaven kontaminaci listovým extraktem, což umožnilo přiblížit se lépe reálným podmínkám zejména v podzimních obdobích, kdy adheze na železniční trati bývá nižší v důsledku výskytu listí.

V práci je uvedeno nejprve *„Shrnutí současného stavu poznání“*, kde jsou především vysvětleny základní pojmy spojené s kolejovou dopravou. Dále je v této kapitole popsán suchý kontakt a kontaminace kontaktu běžnými kontaminanty, které se na železniční trati mohou vyskytovat. V další kapitole je uvedeno shrnutí poznatků z rešeršní práce a také je zde formulován cíl práce s příslušnou vědeckou otázkou a pracovní hypotézou. Kapitola *„Materiál a metody“* popisuje experimentální aparaturu a materiál, který byl pro výzkum použit. V této kapitole je navíc popsán podrobný plán experimentů s postupem přípravy testovaných vzorků. V další kapitole jsou uvedeny dosažené výsledky z experimentálního výzkumu. Mezi hlavní výsledky celé práce patří predikční vztahy (vztah 5.31 až 5.34) pro případ čistého i kontaminovaného disku. Vztahy byly vytvořeny pro stav, kdy došlo i nedošlo ke kondenzaci a popisují vliv vzdušné vlhkosti a teploty okolního vzduchu na adhezi kontaktu kola a kolejnice. V kapitole *„Diskuze“* jsou shrnuty nejdůležitější poznatky z výzkumu. Dále je zde upozorněno na uvažovaná zjednodušení a výsledky jsou diskutovány s již publikovanými pracemi.

Výstupem práce je publikace v impaktovaném nebo recenzovaném časopise, která je v současném stavu připravena k odeslání vydavatelem. Cíle práce byly tedy splněny v celém svém rozsahu.

Problematika klimatických podmínek v kontaktu kola a kolejnice je velmi rozsáhlá, a proto je zde prostor pro další výzkum. Zejména by bylo vhodné zjistit chování adheze při nižších teplotách (< 0 °C), kde by mohlo dojít vlivem kondenzace na povrchu kontaktních těles k námraze.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] *Wheel-rail interface handbook*. 1st pub. Cambridge: Woodhead, 2009, xxii, 842 s. Woodhead publishing in mechanical engineering. ISBN 978-1-84569-412-8.

[2] LATA, Michael. *Konstrukce kolejových vozidel II. Vyd. 1.* Pardubice: Univerzita Pardubice, 2004, 206 s. ISBN 80-719-4696-6.

[3] 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, **218**(3), 235-242. DOI: 10.1243/0954409042389364. ISSN 0954-4097. Dostupné také z: http://sdj.sagepub.com/lookup/10.1243/0954409042389364

[4] Tuhá maziva pro bok okolku. Technologie pro kolejovou dopravu [online]. b.r. [cit. 2016-04-19]. Dostupné z: http://www.sklenar-tribotechnika.cz/cs/m-60-tuha-maziva-pro-bok-okolku-wfl/

[5] ZHANG, Weihua, Jianzheng CHEN, Xuejie WU a Xuesong JIN. Wheel/rail adhesion and analysis by using full scale roller rig. Wear. 2002, **253**(1-2), 82-88. DOI: 10.1016/S0043-1648(02)00086-8. ISSN 00431648. Dostupné také z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164802000868

[6] 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, 271(9-10), 2699-2705. DOI: 10.1016/j.wear.2011.01.070. ISSN 00431648.

[7] ZHU, Y., U. OLOFSSON a K. PERSSON. Investigation of factors influencing wheel–rail adhesion using a mini-traction machine. Wear. 2012, 292-293, **218-231**. DOI: 10.1016/j.wear.2012.05.006. ISSN 00431648.

[8] RATOI, M., V. NISTE a J. ZEKONYTE. WS2 nanoparticles – potential replacement for ZDDP and friction modifier additives. RSC Advances. 2014, **4**(41), 21238-. DOI: 10.1039/c4ra01795a. ISSN 2046-2069. Dostupné také z: http://xlink.rsc.org/?DOI=c4ra01795a

[9] BAEK, Koan-Sok, Keiji KYOGOKU a Tsunamitsu NAKAHARA. An experimental study of *transient* traction characteristics between rail and wheel under low slip and low speed conditions. Wear. 2008, 265(9-10), 1417-1424. DOI: 10.1016/j.wear.2008.02.044. ISSN 00431648. Dostupné také z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164808002007

[10] ISHIDA, M., T. BAN, M. TAKIKAWA a F. AOKI. Influential factors on rail/wheel friction coefficient. In: Proceedings of the 6th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems. Gothenbrug, Švédsko: CHARMEC, 2003, s. 23-27. ISBN 9163139286.

[11] KLAFFKE, D. On the repeatability of friction and wear results and on the influence of humidity in oscillating sliding tests of steel-steel pairings. Wear**.** 1995, 189(1-2), 117-121. DOI: 10.1016/0043-1648(95)06672-1. ISSN 00431648. Dostupné také z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0043164895066721

[12] Portable tribometer. LBFoster Salient Systems [online]. b.r. [cit. *2016-04-24*]. Dostupné z: http://www.lbfoster-salientsystems.com/Portable_Tribometer.asp

[13] CHEN, H., T. BAN, M. ISHIDA a T. NAKAHARA. Adhesion between rail/wheel under water lubricated contact. Wear. 2002, 253(1-2), 75-81. DOI: 10.1016/S0043-1648(02)00085-6. ISSN 00431648. Dostupné také z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164802000856

[14] 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, 265(9-10), 1504-1511. DOI: 10.1016/j.wear.2008.02.034. ISSN 00431648.

[15] LALLANILLA, Marc. What is Dew Point? | Relative Humidity. In: *Livescience* [online]. 2014 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: http://www.livescience.com/43269-what-is-dew-point.html

[16] 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, 271(9-10), 2693-2698. DOI: 10.1016/j.wear.2010.12.019. ISSN 00431648. Dostupné také z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164811001177

[17] GALLARDO-HERNANDEZ, E.A. a R. LEWIS. Twin disc assessment of wheel/rail adhesion. Wear. 2008, 265(9-10), 1309-1316. DOI: 10.1016/j.wear.2008.03.020. ISSN 00431648. Dostupné také z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164808001622

[18] GALLARDO-HERNANDEZ, E.A., R. LEWIS a R.S. DWYER-JOYCE. Temperature in a twin-disc wheel/rail contact simulation. Tribology International. 2006, 39(12), 1653-1663. DOI: 10.1016/j.triboint.2006.01.028. ISSN 0301679x. Dostupné také z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X06000363

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

[20] 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, **75,** 16-23. DOI: 10.1016/j.triboint.2014.03.008. ISSN 0301679x. Dostupné také z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X14000954

[21] ARIAS-CUEVAS, O., Z. LI a R. LEWIS. Investigating the Lubricity and Electrical Insulation Caused by Sanding in Dry Wheel–Rail Contacts. Tribology Letters. 2010, 37(3), 623-635. DOI: 10.1007/s11249-009-9560-1. ISSN 1023-8883. Dostupné také z*: http*://link**.**springer.com/10.1007/s11249-009-9560-1

[22] NICCOLINI, E. a Y. BERTHIER. Wheel–rail adhesion: laboratory study *of* "natural" third body role on locomotives wheels and rails. Wear. 2005, 258(7-8), 1172-1178. DOI: 10.1016/j.wear.2004.03.028. ISSN 00431648. *Dostupné také* z: **http**://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164804002832

[23] ISHIZAKA, Kei, Stephen LEWIS a Roger LEWIS. The low adhesion problem *due* to leaf contamination in the wheel/rail contact: Bonding and low adhesion

mechanisms. Wear. 2017, 378-379, 183-197. DOI: 10.1016/j.wear.2017.02.044. ISSN *00431648*. Dostupné také **z**: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164817303800

[24] ZHU, Y., U. OLOFSSON a R. NILSSON. A field test study of leaf contamination on railhead surfaces. Proceedings of the Institution of *Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2013, **228**(1), 71-84. DOI: 10.1177/0954409712464860. ISSN 0954-4097. Dostupné také z: http://pif.sagepub.com/lookup/doi/10.1177/0954409712464860

[25] MTM (Mini Traction Machine). PCS Instruments [online]. b.r. *[*cit. 2016-11-08]. Dostupné z: http://pcs-instruments.com/product/mtm-mini-traction-machine/

[26] PCS: MTM - Mini Traction Machine. Prodej a serves laboratorních a procesních analyzátorů [online]. b.r. [cit. 2016-11-08]. Dostupné z: http://www.rofa-praha.cz/produkt/pcs-mtm---minitrakcni-pristroj-en

[27] Thermo Haake. SIGMA-ALDRICH [online]. b.r. [cit. 2016-11-08]. *Dostupné* z: http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/z321648?lang=en&region=CZ

[28] MTM Specimens. PCS Instruments [online]. b.r. [cit. 2016-11-08]. Dostupné z: http://pcs-instruments.com/product/mtm-specimens/

[29] How to convert relative humidity to absolute humidity. CarnotCycle [online]. b.r. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: https://carnotcycle.wordpress.com/2012/08/04/how-to-convert-relative-humidity-to-absolute-humidity/

[30] AISI 52100 Alloy Steel (UNS G52986). AZO Materials [online]. b.r. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6704#2

[31] AREIZA, Y.A., S.I. GARCÉS, J.F. SANTA, *G*. VARGAS a A. TORO. Field measurement of coefficient of friction in rails using a hand-pushed tribometer. *Tribology International*. 2015, **82,** 274-279. DOI: 10.1016/j.triboint.2014.08.009. ISSN 0301679x. Dostupné také z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X14003041

[32] Dew Point Calculator (Celsius). CalcuNation [online]. b.r. [cit. 2017-05-13]. Dostupné z: http://www.calcunation.com/calculator/dew-point.php

[33] LEWIS, R., S. R. LEWIS, Y. ZHU, S. *ABBASI* a U. OLOFSSON. The modification of a slip resistance meter for measurement of railhead adhesion. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2013, **227**(2), 196-200. DOI: 10.1177/0954409712455147. ISSN 0954-4097. Dostupné také z: http://pif.sagepub.com/lookup/doi/10.1177/0954409712455147

[34] HARDWICK, C., R. LEWIS a D.T. EADIE. Wheel and rail wear—Understanding the effects of water and grease. Wear. 2014, 314(1-2), 198-204. DOI: 10.1016/j.wear.2013.11.020. ISSN 00431648. Dostupné také z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164813005644

[35] POLACH, O. Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit. Wear. 2005, 258(7-8), 992-1000. DOI:

10.1016/j.wear.2004.03.**046**. ISSN 00431648. Dostupné také z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164804003072

[36] TOMBERGER, Christoph, Peter DIETMAIER, Walter SEXTRO a Klaus SIX. Friction in wheel–rail contact: A model comprising interfacial fluids, surface roughness and temperature. *Wear*. 2011, **271**(1-2), 2-12. DOI: 10.1016/j.wear.2010.10.025. ISSN 00431648. Dostupné také z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164810003595

[37] NAGASE, K. A study of adhesion between the rails and running wheels on main lines: results of investigations by slipping adhesion test bogie. ARCHIVE: *Proceedings* of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 1989-1996 (vols 203-210). 1989, 203(16), 33-43. DOI: 10.1243/PIME_PROC_1989_203_206_02. ISSN 0954-4097. Dostupné také z: http://pif.sagepub.com/lookup/doi/10.1243/PIME_PROC_1989_203_206_02

[38] OMASTA, Milan, Martin MACHATKA, David SMEJKAL, Martin HARTL a Ivan KŘUPKA. Influence of sanding parameters on adhesion recovery in contaminated wheel–rail contact. Wear. 2015, 322-323, 218-225. DOI: 10.1016/j.wear.2014.11.017. ISSN 00431648. Dostupné také z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164814003548

[39] ZHU, Y., Y. LYU a U. OLOFSSON. Mapping the friction between railway wheels and rails focusing on environmental conditions. Wear. 2015, 324-325, 122-128. DOI: **10**.1016/j.wear.2014.12.028. ISSN 00431648. Dostupné také z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0043164814004086

[40] 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, 24(**2**), 151-158. DOI: 10.1007/s11249-006-9152-2. ISSN 1023-8883. Dostupné také z: http://link.springer.com/10.1007/s11249-006-9152-2

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Seznam zkratek

Zkratka	Význam
HPF	High positive friction
LCF	Low coefficient of friction
MTM	Mini Traction Machine
VHPF	Very high positive friction

Seznam symbolů a veličin

Symbol	Jednotka	Význam
α	°	úhel náběhu
ω	$rad \cdot s^{-1}$	úhlová rychlost kola
μ	1	součinitel adheze
μ_x	1	součinitel adheze v ose x
μ_y	1	součinitel adheze v ose y
μ_k	1	součinitel adheze (kondenzace)
μ_1	1	součinitel adheze (teplota vzduchu 1 °C)
μ_{1k}	1	součinitel adheze (teplota vzduchu 1 °C; kondenzace)
μ_{10}	1	součinitel adheze (teplota vzduchu 10 °C)
μ_{10k}	1	součinitel adheze (teplota vzduchu 10 °C; kondenzace)
μ_{24}	1	součinitel adheze (teplota vzduchu 24 °C)
μ_{24k}	1	součinitel adheze (teplota vzduchu 24 °C; kondenzace)
μ_{40}	1	součinitel adheze pro teplotu vzduchu 40 °C
μ_{50}	1	součinitel adheze pro teplotu vzduchu 50 °C
υ	1	Poissonovo číslo
AH	$g \cdot m^{-3}$	absolutní vlhkost vzduchu
E	MPa	redukovaný modul pružnosti
F_{Tx}	N	třecí síla v ose x
F_{Ty}	N	třecí síla v ose y
p	1	maximální Hertzův tlak
Q	N	normálová síla působící na kontakt
r	m	poloměr kola
R	mm	redukovaný poloměr křivosti
RH	%	relativní vlhkost vzduchu
s	1	relativní skluz
s_x	1	relativní skluz v ose x
s_y	1	relativní skluz v ose y
t	°C	teplota vzduchu
t_v	°C	teplota vody
T_{DP}	°C	teplota rosného bodu
v	$m \cdot s^{-1}$	dopředná rychlost vozidla

w	$m \cdot s^{-1}$	skluzová rychlost
w_x	$m \cdot s^{-1}$	skluzová rychlost v ose x
w_y	$m \cdot s^{-1}$	skluzová rychlost v ose y

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1-1 Optimální hodnoty tření v kontaktu kola a kolejnice [1] 15
Obr. 2-1 Rychlosti a silové působení na pohybujícím se kole [2] 17
Obr. 2-2 Kontaktní plocha [3] 18
Obr. 2-3 Adhezní křivka – upraveno [1] 19
Obr. 2-4 Kontaktní podmínky kola a kolejnice 19
Obr. 2-5 Experimentální zařízení typu „roller rig“ [5] 20
Obr. 2-6 Adhezní křivky za suchých podmínek (roller rig) [5] 20
Obr. 2-7 Zařízení JD-1 – upraveno [6] 21
Obr. 2-8 Adhezní křivky za suchých podmínek (JD-1) [6] 21
Obr. 2-9 Zařízení MTM v konfiguraci „ball on disc“ – upraveno [8] 22
Obr. 2-10 Adhezní křivky za suchých podmínek (MTM) [7] 22
Obr. 2-11 Vliv teploty vzduchu na adhezi [9] 23
Obr. 2-12 Vliv vzdušné vlhkosti na adhezi [9] 24
Obr. 2-13 Vliv vzdušné vlhkosti při kontaminaci listím [3] 24
Obr. 2-14 Přenosný železniční tribometr [12] 25
Obr. 2-15 Adheze za mokrých podmínek (roller rig) [5] 26
Obr. 2-16 Vliv teploty vody na adhezi (numerická simulace) [13] 26
Obr. 2-17 Vliv teploty vody na adhezi (dvoudiskové zařízení) [14] 27
Obr. 2-18 Vliv drsnosti povrchu na adhezi [14] 27
Obr. 2-19 Vliv rychlosti na adhezi při kontaminaci kontaktu olejem [16] 28
Obr. 2-20 Vliv rychlosti na adhezi při kontaminaci kontaktu olejem s vodou [16] . 29
Obr. 2-21 Stribeckova křivka při kontaminaci olejem [7] 29
Obr. 2-22 Princip dvoudiskového zařízení – upraveno [17] 30
Obr. 2-23 Vliv kontaminantů na adhezi [17] 31
Obr. 2-24 Pokles adheze za mokrých podmínek při aplikaci listí [17] 31
Obr. 2-25 Vrstvy při kontaminaci mokrým listím – upraveno [17] 31
Obr. 2-26 Princip pískování [19] 32
Obr. 2-27 Zvýšení adheze pomocí písku, částic hliníku a abraziva [20] 32
Obr. 2-28 Míra opotřebení kola a kolejnice při aplikaci písku [1] 33
Obr. 2-29 Schematické znázornění vstupu zrn písku do kontaktu – upraveno [21] . 33
Obr. 2-30 Tribologická trojice v kontaktu kola a kolejnice [22] 34
Obr. 2-31 Lewisův navrhovaný model [23] 34
Obr. 4-1 Mini Traction Machine (MTM) [25] 38
Obr. 4-2 Pracovní schéma MTM [26] 39
Obr. 4-3 Temperační jednotka Haake K41 40
Obr. 4-4 Zařízení pro regulaci vzdušné vlhkosti 40
Obr. 4-5 Kontaktní tělesa MTM – upraveno [28] 41
Obr. 4-6 Čistý disk 42
Obr. 4-7 Aplikace listového extraktu (0,5 m/s; 5 %; 0,75 GPa) 42
Obr. 4-8 Kontaminovaný disk 42
Obr. 5-1 Suchý kontakt (0,3 m/s; 5 %; 0,75 GPa) 46
Obr. 5-2 Adhezní charakteristiky pro plně zaplavený kontakt vodou 47
Obr. 5-3 Adhezní charakteristiky pro rychlost valení 3 m/s 47
Obr. 5-4 Průběh adheze v čase s vlivem teploty vody (1 m/s; 5 %; 0,75 GPa 47
Obr. 5-5 Vliv teploty vody na adhezi (1 m/s; 5 %; 0,75 GPa) 48

Obr. 5-6 Vliv množství vody na adhezi (0,5 m/s; 5 %; 0,75 GPa).....48
Obr. 5-7 Vliv rychlosti na aplikaci 5 µl vody (5 %; 0,75 GPa).....49
Obr. 5-8 Vliv množství listového extraktu na adhezi (0,5 m/s; 5 %; 0,75 GPa).....50
Obr. 5-9 Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 1 °C (čistý disk).....50
Obr. 5-10 Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 1 °C (kontaminovaný disk) ...51
Obr. 5-11 Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 10 °C (čistý disk).....52
Obr. 5-12 Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 10 °C (kontaminovaný disk) .52
Obr. 5-13 Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 24 °C (čistý disk).....53
Obr. 5-14 Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 24 °C (kontaminovaný disk) .54
Obr. 5-15 Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 40 °C (čistý disk).....54
Obr. 5-16 Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 40 °C (kontaminovaný disk) .55
Obr. 5-17 Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 50 °C (kontaminovaný disk) .56
Obr. 5-18 Vliv vzdušné vlhkosti při teplotě vzduchu 50 °C (čistý disk).....56
Obr. 5-19 Vliv součinitele adheze na relativní vlhkost (čistý disk) 57
Obr. 5-20 Vliv součinitele adheze na relativní vlhkost (kontaminovaný disk).....57
Obr. 5-21 Vliv součinitele adheze na absolutní vlhkost (čistý disk) 58
Obr. 5-22 Vliv součinitele adheze na absolutní vlhkost (kontaminovaný disk).....58
Obr. 5-23 3D mapy (čistý disk).....60
Obr. 5-24 Konturové grafy (čistý disk) 60
Obr. 5-25 3D mapy (kontaminovaný disk).....61
Obr. 5-26 Konturové grafy (kontaminovaný disk).....61
Obr. 6-1 Důsledek kondenzace na výrazný pokles adheze – upraveno [23].....68

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Hodnoty součinitele adheze při různých povrchových podmínkách [1] 16
Tab. 2 Naměřená adheze za suchých podmínek na různých laboratorních zařízení. 23
Tab. 3 Technické parametry MTM 38
Tab. 4 Technické parametry temperační jednotky Haake K41 [27] 39
Tab. 5 Podmínky pro experiment za „suchých“ podmínek..... 44
Tab. 6 Podmínky pro plně zaplavený kontakt vodou (vliv rychlosti)..... 44
Tab. 7 Podmínky pro plně zaplavený kontakt vodou (vliv teploty)..... 44
Tab. 8 Podmínky pro dávkování malého množství vody (vliv množství) 44
Tab. 9 Podmínky pro dávkování malého množství vody (vliv rychlosti)..... 44
Tab. 10 Podmínky pro dávkování malého množství listového extraktu..... 44
Tab. 11 Podmínky pro stanovení vlivu klimatických podmínek 45
Tab. 12 Predikce výskytu rosného bodu 66

12 SEZNAM PŘÍLOH

Interní přílohy

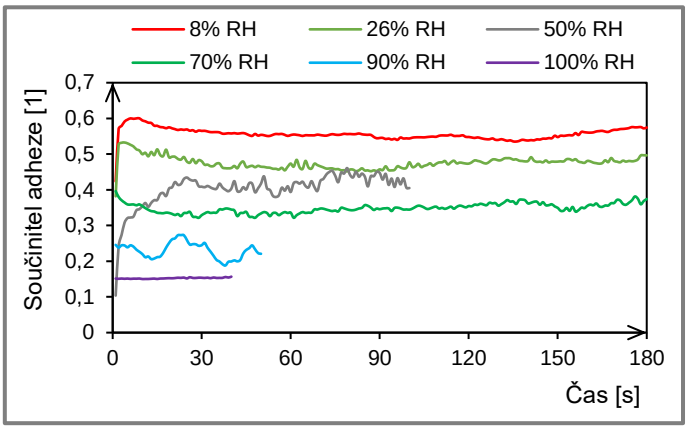
PŘÍLOHA 1 – Průběh adheze v čase pro teplotu vzduchu 1 °C
PŘÍLOHA 2 – Průběh adheze v čase pro teplotu vzduchu 10 °C
PŘÍLOHA 3 – Průběh adheze v čase pro teplotu vzduchu 24 °C
PŘÍLOHA 4 – Průběh adheze v čase pro teplotu vzduchu 40 °C
PŘÍLOHA 5 – Průběh adheze v čase pro teplotu vzduchu 50 °C
PŘÍLOHA 6 – Fotografie disků v případě kondenzace

Externí přílohy

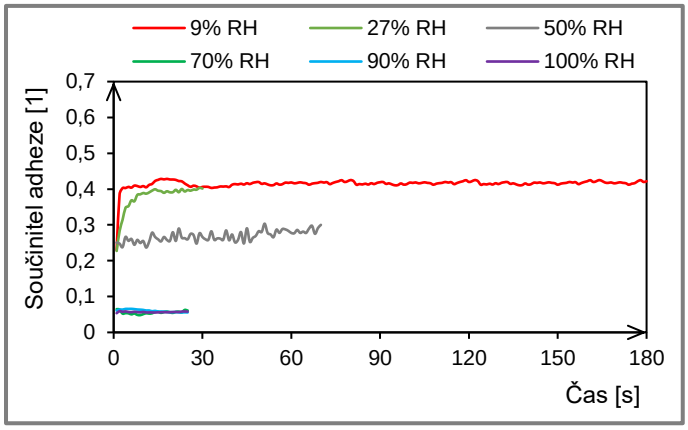
PŘÍLOHA 7 – *The effect of climate conditions on wheel-rail contact adhesion*

PŘÍLOHA 1

Průběh adheze v čase pro teplotu vzduchu 1 °C (čistý disk)

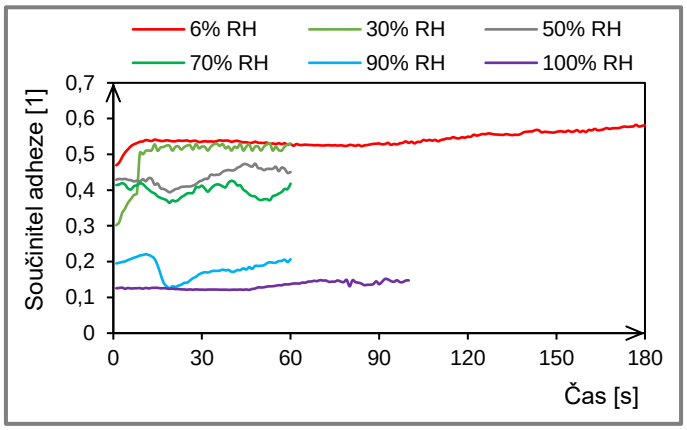


Průběh adheze v čase pro teplotu vzduchu 1 °C (kontaminovaný disk)

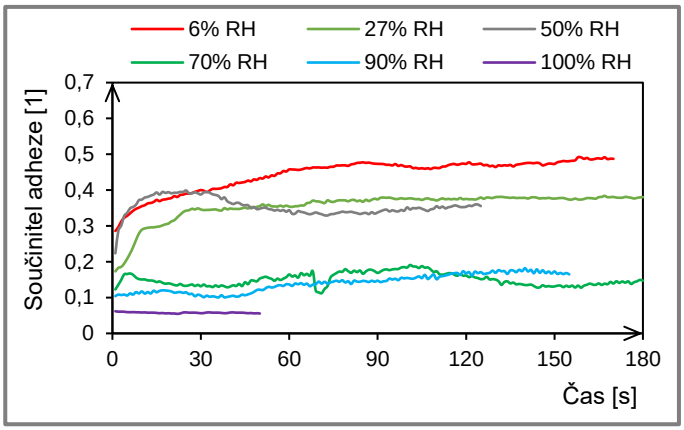


PŘÍLOHA 2

Průběh adheze v čase pro teplotu vzduchu 10 °C (čistý disk)

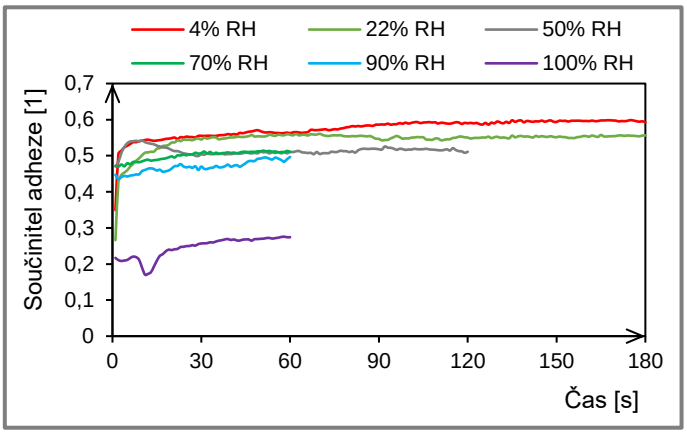


Průběh adheze v čase pro teplotu vzduchu 10 °C (kontaminovaný disk)

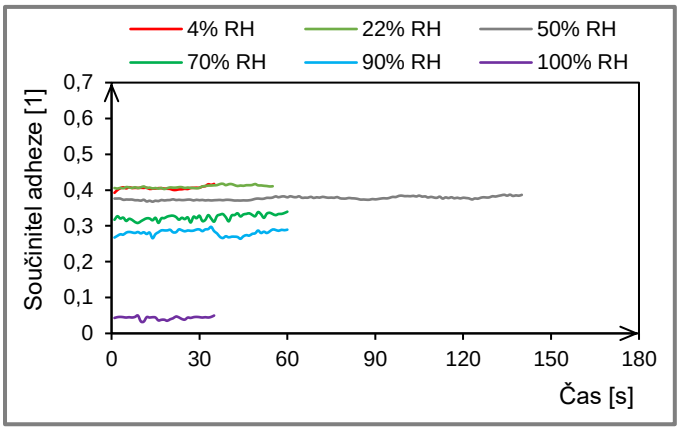


PŘÍLOHA 3

Průběh adheze v čase pro teplotu vzduchu 24 °C (čistý disk)

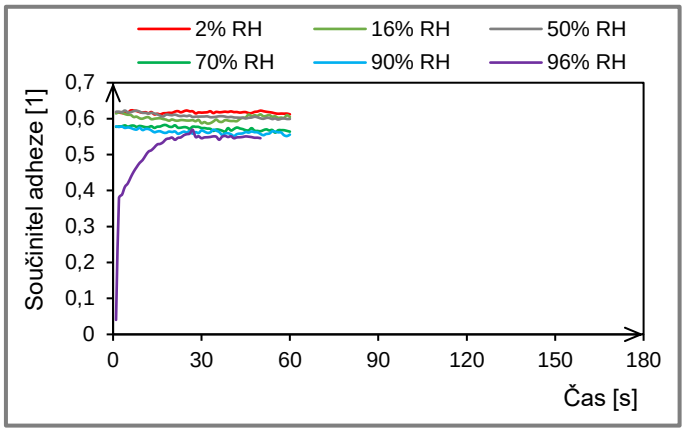


Průběh adheze v čase pro teplotu vzduchu 24 °C (kontaminovaný disk)

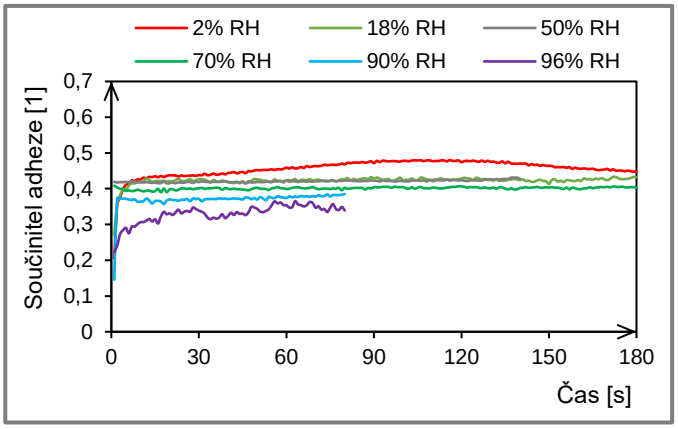


PŘÍLOHA 4

Průběh adheze v čase pro teplotu vzduchu 40 °C (čistý disk)

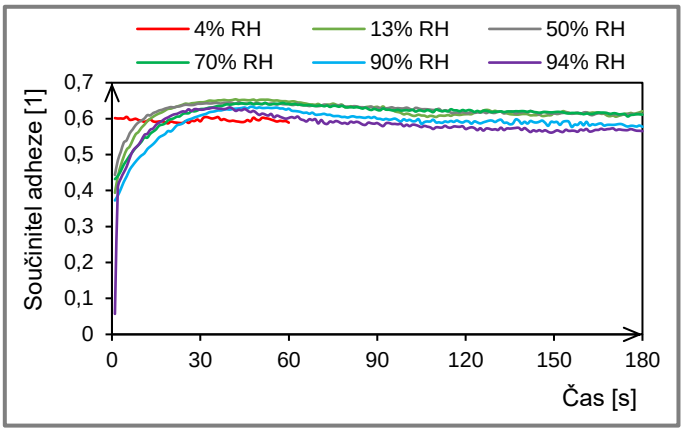


Průběh adheze v čase pro teplotu vzduchu 40 °C (kontaminovaný disk)

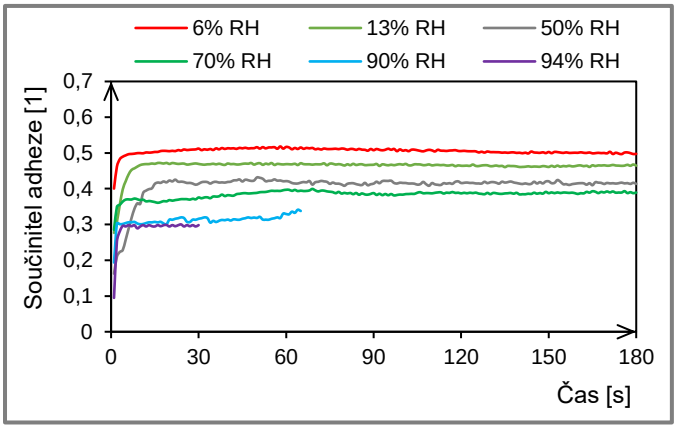


PŘÍLOHA 5

Průběh adheze v čase pro teplotu vzduchu 50 °C (čistý disk)



Průběh adheze v čase pro teplotu vzduchu 50 °C (kontaminovaný disk)



PŘÍLOHA 6

Fotografie disků v případě kondenzace (čistý disk)

Fotografie disků v případě kondenzace (kontaminovaný disk)