



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

TESTOVÁNÍ VÝKONNOSTI MAZIV PRO KOLEJOVOU DOPRAVU

TESTING OF RAIL LUBRICANTS PERFORMANCE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Renata Tomčová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radovan Galas, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Studentka: **Bc. Renata Tomčová**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Radovan Galas, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

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

Testování výkonnosti maziv pro kolejovou dopravu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V kolejové dopravě jsou pro modifikaci tření mezi běhounem kola a temenem kolejnice používána tzv. maziva pro temeno kolejnice. Hlavním cílem aplikace těchto speciálních maziv je redukce hlučnosti a opotřebení. Zároveň je však nezbytné, aby byla po aplikaci zachována dostatečná míra adheze, která je nezbytná pro trakci a brzdění vozidla. V současné době však neexistuje norma zabývající se testováním výkonnosti těchto produktů a to i přes skutečnost, že aktuální odborné publikace poukazují na bezpečnostní rizika související s aplikacemi těchto látek.

Typ práce: výzkumná

Výstup práce: publikační výsledek (J, D)

Projekt: MŠMT

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je na základě laboratorního výzkumu sestavit metodiku pro hodnocení výkonnosti maziv pro temeno kolejnice.

Dílčí cíle diplomové práce:

- provést kritickou rešerši vědeckých publikací zaměřených na hodnocení výkonnosti maziv,
- identifikovat důležité parametry experimentů zaměřených na testování maziv,
- s ohledem na předchozí bod provést experimenty, které objasní důležitost jednotlivých parametrů,
- sestavit metodiku pro hodnocení výkonnosti maziv v laboratorním prostředí,
- připravit podklady pro publikaci.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

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

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

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske-studium-ukonzeni/>

Seznam doporučené literatury:

Wheel-rail interface handbook. 1st pub. Editor R. Lewis, U. Olofsson. Cambridge: Woodhead, 2009, xxii, 842 s. Woodhead publishing in mechanical engineering. ISBN 978-1-84569-412-8.

HARMON, M. a R. LEWIS. Review of top of rail friction modifier tribology. Tribology – Materials, Surfaces and Interfaces, 2016, 10, 150-162.

STOCK, R., L. STANLAKE, C. HARDWICK, M. YU, D. EADIE a R. LEWIS. Material concepts for top of rail friction management – Classification, characterisation and application. Wear, 2016, 366–367, 225-232.

GALAS, R., M. OMASTA, I. KRUPKA a M. HARTL. Laboratory investigation of ability of oil-based friction modifiers to control adhesion at wheel-rail interface. Tribology Letters. 2009, 33(2), 97-109.

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

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Maziva pro temeno kolejnice představují v železniční dopravě efektivní způsob řízení adheze, redukce opotřebení kontaktních těles a snížení hlučnosti. I přes hojné využívání těchto maziv však v současné době neexistuje norma definující způsob testování a hodnocení jejich výkonnosti. Cílem této práce je vyvinout metodologii testování maziv pro temeno kolejnice v laboratorním prostředí s využitím tribometru v konfiguraci kulička-disk. V práci jsou nejdříve analyzovány důležité provozní parametry experimentů, které jsou následně experimentálně studovány. Jedná se zejména o krátkodobý a dlouhodobý záběh, způsob aplikace, drsnost a geometrické parametry kontaktních těles. Výsledkem práce je metodika testování, která zaručuje dobrou opakovatelnost a věrohodnost výsledků. V poslední části práce byla metodika ověřena pomocí komerčních maziv pro temeno kolejnice.

KLÍČOVÁ SLOVA

TOR produkty, adheze, tribologie kontaktu kolo-kolejnice, metodologie experimentů, záběh

ABSTRACT

Top-of-rail lubricants are an effective way to control adhesion, reduce contact wear and noise in rail transport. However, despite the widespread use of these lubricants, there is currently no standard defining how to test and evaluate their performance. This work aims to develop a methodology for testing top-of-rail lubricants in a laboratory environment using a tribometer in a ball-on-disk configuration. At first, important operational parameters of experiments are analyzed and experimentally tested. These are mainly wear-in and run-in, method of application, roughness and geometric parameters of contact bodies. The result of this work is a testing methodology that guarantees good repeatability and reliability of results. In the last part of this work, the methodology is verified using commercial top-of-rail lubricants.

KEYWORDS

TOR products, adhesion, wheel-rail tribology, methodology of experiments, wear-in

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TOMČOVÁ, Renata. *Testování výkonnosti maziv pro kolejovou dopravu*. Brno, 2021, 85 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce Ing. Radovan Galas, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych touto cestou poděkovala vedoucímu práce panu Ing. Radovanu Galasovi, Ph.D. za jeho odborné vedení, cenné rady, nápady a trpělivost po celou dobu vypracovávání této diplomové práce. Dále chci poděkovat panu Ing. Martinu Valenovi za poskytnuté rady a konzultace. V neposlední řadě chci také poděkovat své rodině za obrovskou podporu po celou dobu studia.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracovala samostatně, pod odborným vedením Ing. Radovana Galase, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpala, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Kontakt kola a kolejnice	14
2.1.1	Tření a adheze v kolejové dopravě	14
2.1.2	Skluz a bod saturace	15
2.1.3	Řízení tření a TOR produkty	16
2.1.4	Režimy mazání	17
2.2	Testování TOR produktů	18
2.2.1	Testování TOR produktů pomocí dvoudiskového zařízení	18
2.2.2	Testování TOR produktů pomocí tribometru kulička-disk	25
2.2.3	Testování TOR produktů pomocí zařízení s reálným kontaktem	28
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	33
3.1	Analýza problému	33
3.2	Analýza a zhodnocení řešerše	33
3.3	Podstata a cíl diplomové práce	36
4	MATERIÁL A METODY	37
4.1	Vývoj metodiky	38
4.2	Použitá zařízení	40
4.2.1	Mini-traction-machine	40
4.2.2	Optický profilometr	41
4.3	Použitá TOR maziva	42
5	VÝSLEDKY	43
5.1	Dlouhodobý a krátkodobý záběh	43
5.2	Vliv skluzu	44
5.3	Vliv aplikace	46
5.3.1	Porovnání statické a dynamické aplikace	46
5.3.2	Zpřesnění opakovatelnosti dynamické aplikace maziva do kontaktu	48
5.3.3	Vliv dávkování maziva do kontaktu	48
5.4	Vliv aplikovaného množství	50
5.5	Vývoj geometrie a drsnosti kontaktních těles v čase	53
5.5.1	Vývoj drsnosti kontaktních těles v čase	53

5.5.2	Vývoj geometrie kontaktních těles v čase	56
5.6	Experimenty bez využití navržené metodiky	58
5.7	Navržení metodiky a její verifikace	61
5.7.1	Výsledky experimentů dle navržené metodiky na TOR mazivu A	64
5.7.2	Výsledky experimentů dle navržené metodiky na TOR mazivu B	64
5.7.3	Výsledky experimentů dle navržené metodiky na MT	65
6	DISKUZE	67
6.1	Dlouhodobý a krátkodobý záběh	67
6.2	Vliv skluzu	67
6.3	Vliv aplikace	68
6.4	Vliv aplikovaného množství	69
6.5	Vývoj geometrie a drsnosti kontaktních těles v čase	69
6.6	Experimenty bez využití navržené metodiky	70
6.7	Navržení metodiky a její verifikace	71
7	ZÁVĚR	73
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	74
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	76
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	77
11	SEZNAM TABULEK	80
12	SEZNAM PŘÍLOH	81

1 ÚVOD

Již desítky let se v kolejové dopravě pro modifikaci tření používají dvě konvenční metody, kterými jsou pískování a mazání okolku či pojížděné hrany kolejnic. Pískování je metoda sloužící k okamžitému nárůstu součinitele adheze. Příliš nízká hodnota součinitele adheze způsobuje nebezpečný nárůst brzdné dráhy či problémy s akcelerací vozidel. Naopak vysoká hodnota adheze způsobuje nadměrné opotřebení kol a kolejnic. Mazání okolku naopak slouží ke snížení opotřebení kontaktních těles. Relativně novou metodu pro modifikaci tření představují tzv. top-of-rail (TOR) produkty, které jsou využívány pro optimalizaci tření mezi běhounem kola a temenem kolejnice.

TOR produkty se využívají zejména k redukci hluku, opotřebení a kontaktní únavy. Jejich výkonnost a spolehlivost je závislá na řadě aspektů. Těmi jsou například způsob aplikace a aplikované množství. Nesprávné množství aplikovaného produktu může mít negativní dopad na brzdění vozidel nebo na rozvoj kontaktní únavy. Jsou dva způsoby jejich aplikace, a to pomocí externího aplikátoru, tedy aplikátoru nacházejícího se na kolejích, což lze vidět na Obr. 1-1, nebo je zabudován přímo ve vozidle.

Vlastnosti používaných TOR produktů, jako je např. součinitel adheze či schopnost roznesení, mohou být stanoveny pomocí experimentů v laboratorním či reálném prostředí. Experimenty prováděné v laboratorním prostředí jsou poměrně vzdálené reálným podmínkám, ovšem jsou méně časově i finančně náročné. U experimentů prováděných v terénu je to přesně naopak. V případě laboratorních experimentů je pak velkým nedostatkem absence obecné normy stanovující podmínky pro testování těchto produktů.

Vzhledem k výše uvedeným faktům je velmi důležité stanovit metodiku testování TOR produktů v laboratorním prostředí tak, aby provozní parametry vedly k dobré opakovatelnosti jednotlivých experimentů, a aby tato metodika umožňovala hodnotit TOR produkty různých složení a na základě zjištěných výsledků predikovat chování těchto produktů v reálném provozu.

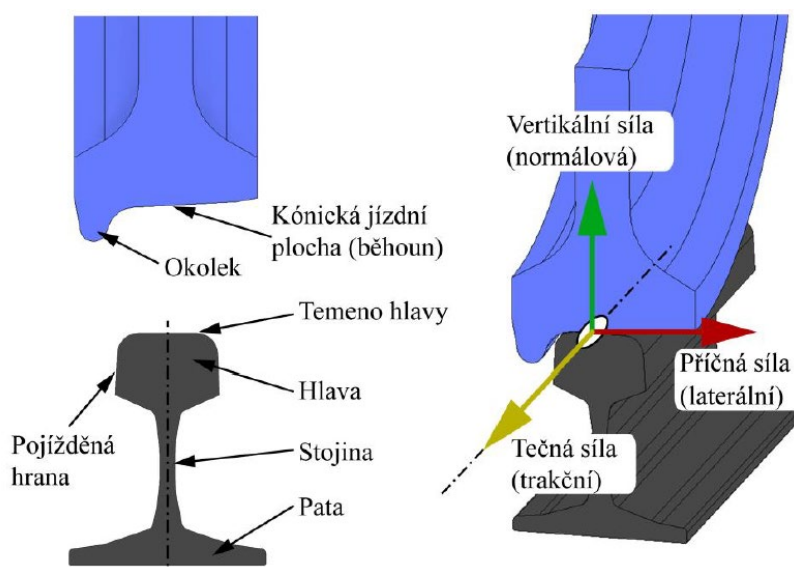


Obr. 1-1 TOR aplikátor [1]

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Kontakt kola a kolejnice

Kontakt kolo-kolejnice je velmi komplexní druh kontaktu. Díky své charakteristice má blízko například k ložiskům nebo ozubeným kolům, tam jsou ovšem dány kontaktní podmínky, které se během své životnosti podstatně nemění. V kontaktu kolo-kolejnice se jedná o otevřený tribologický systém, což znamená, že je ovlivňován okolním prostředím [2]. Tím se myslí okolní teplota, vlhkost vzduchu a různé nečistoty. Vliv na tento kontakt mají i provozní podmínky, jako třeba hmotnost nápravy, vlastnosti odpružení, profil kola atd. Velikost tohoto kontaktu je přibližně 1 cm^2 a kontakt má eliptický tvar [3]. Základní názvosloví kola a kolejnice je uvedeno na Obr. 2-1.

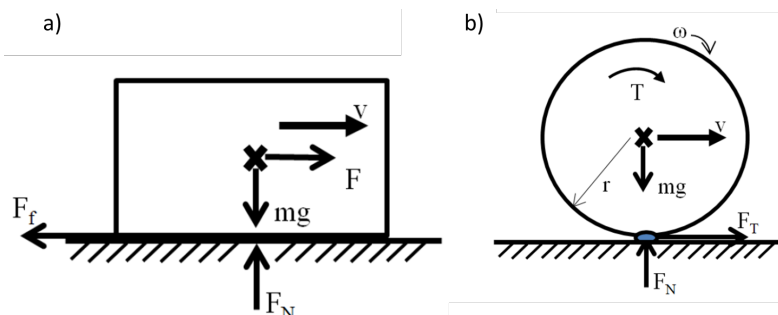


Obr. 2-1 Základní názvosloví a rozložení sil v kontaktu kolo (modrá) a kolejnice (černá) [4]

2.1.1 Tření a adheze v kolejové dopravě

Interakce dvou těles je vždy doprovázena třením, které může být vnímáno jak negativně (vznik tepla a opotřebení), tak také pozitivně (brzdění). Tření je definováno jako poměr normálové a třecí síly. Třecí síla je definována jako síla, která klade odpor proti pohybu dvou těles, která spolu interagují. Adheze je termín, který se v oblasti kolejové dopravy používá pro účel popisu tření ve smykově-valivém kontaktu a je definována jako podíl tečné (trakční) a normálové síly. Rozdíl mezi adhezí a třecí silou je popsán na Obr. 2-2. Na Obr. 2-2 a) je vyobrazena situace, kdy se jedno těleso čistě smýká po druhém. V jejich kontaktu působí

proti směru pohybu třecí síla F_f . Na Obr. 2-2 b) je znázorněn smykově-valivý kontakt. V místě kontaktu vzniká trakční síla F_T , která toto kolo pohání [5].



Obr. 2-2 Schéma a) čistého skluzu, b) valení - upraveno [5]

2.1.2 Skluz a bod saturace

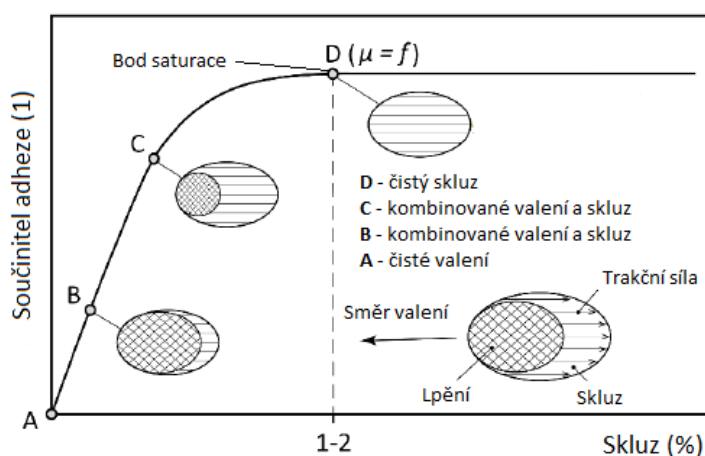
V kontaktu kolo-kolejnice dochází k tzv. skluzu. To znamená, že relativní rychlost obou kontaktních těles je jiná. Pro kvantifikaci těchto odlišných rychlostí je využíván parametr SRR (slide-to-roll ratio), který je definován rovnicí porovnávající rychlost kola a rychlost povrchů [5].

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

kde:

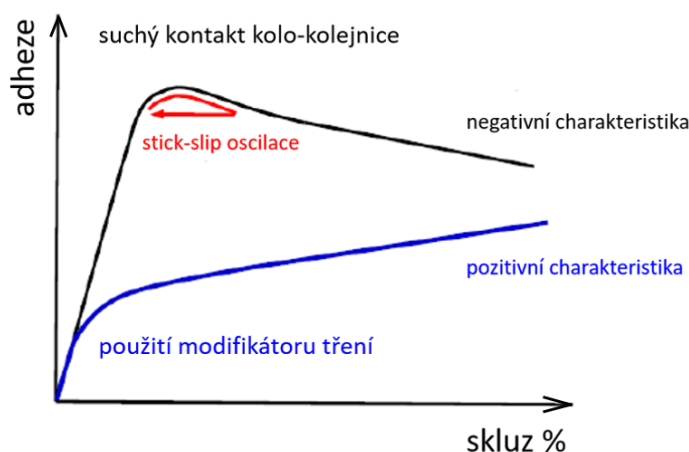
ξ - skluz, v ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) - rychlost kola, ω ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$) - úhlová rychlost a r (m) - poloměr kola.

Na Obr. 2-3 lze vidět trakční křivku, která ukazuje, že když se zvyšuje součinitel adheze, zvyšuje se i oblast skluzu a oblast lpění se zmenšuje až do doby, kdy oblast lpění zcela zaniká a nastává čistý skluz neboli prokluz. K tomu obvykle dochází při suchém kontaktu okolo 1–2 % skluzu. V případě čistého valení nedochází k přenášení trakční síly. S nárůstem skluzu roste i trakční síla v kontaktu. Místu, kde k čistému skluzu dojde, se říká bod saturace [5].



Obr. 2-3 Trakční křivka – upraveno [6]

Za bodem saturace se v ideálním případě hodnota adheze nemění, čemuž se říká neutrální třecí charakteristika. V případě, kdy se zvyšujícím se skluzem adheze i nadále roste, jedná se o pozitivní třecí charakteristiku, v opačném případě, tedy při klesající adhezi, se jedná o negativní třecí charakteristiku, ke které dochází v případě čistého neboli suchého kontaktu [5]. Tento negativní vývoj má za následek jev, který se nazývá stick-slip, což znamená, že pro jednu hodnotu adheze existují dvě hodnoty skazu, viz Obr. 2-4, mezi kterými kolo osciluje, což má za následek velké opotřebení a hluk. Tento jev se vyskytuje především při průjezdu traťového oblouku [3].



Obr. 2-4 Pozitivní a negativní třecí charakteristika – upraveno [7]

2.1.3 Řízení tření a TOR produkty

V kolejové dopravě se využívají různé druhy látek pro řízení tření nebo pro redukci jejich opotřebení. Tyto látky se obecně rozdělují na maziva, modifikátory tření (MT) a „zesilovače“ tření. Tyto zesilovače se využívají výhradně ke zvýšení tření při prokluzu kola nebo při rozjíždění a brzdění, ke kterým je využíván písek, ten ovšem může mít nepříznivý vliv na opotřebení. Maziva naopak snižují součinitel tření, a to až na úroveň pod 0,1, ovšem tato hodnota je závislá na tloušťce filmu nacházející se mezi kolem a kolejnicí [3]. Všechny výše zmíněné produkty se dají rozdělit do tří základních kategorií, a to LCF (low coefficient of friction), kam se řadí maziva pro mazání okolku a zajišťují velmi nízkou hodnotu adheze, a to až pod 0,1. Druhou kategorií jsou HPF (high positive friction) maziva, která dosahují hodnot adheze v rozmezí 0,15–0,4, přičemž maziva dosahující hodnoty adheze 0,15–0,25 se využívají pro tramvajovou dopravu a maziva s adhezí 0,25–0,4 pak pro těžkou nákladní dopravu. Třetí kategorií jsou látky VHPF (very high positive friction), které zvyšují adhezi při rozjezdu a brzdění [8].

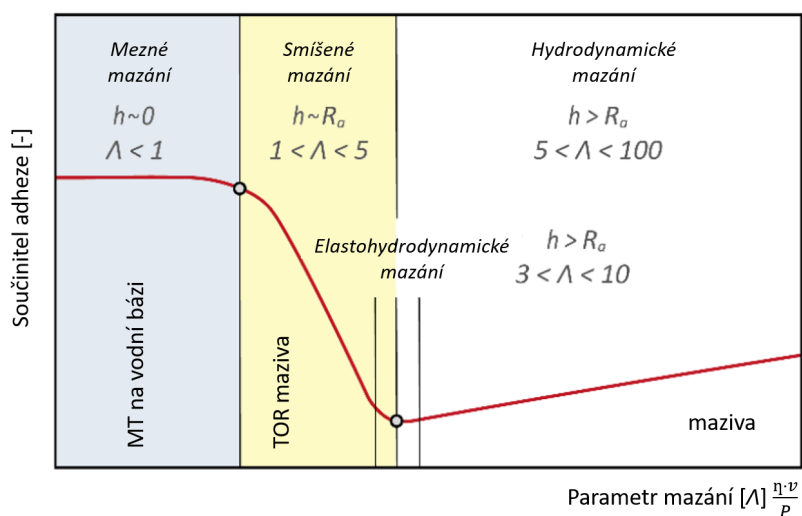
TOR produkty se aplikují na temeno kolejnice nebo přímo do kontaktu, a to pomocí stacionárních jednotek na trati nebo pomocí zařízení na kolejovém vozidle. Tyto produkty jsou vyráběny na bázi oleje, maziva nebo hybridní (směs oleje a vody). Cílem těchto TOR produktů je snížit součinitel tření z vysokých hodnot za suchých podmínek

(0,5–0,8) na střední hodnotu (0,3–0,4). Tyto TOR produkty se dělí na MT, které jsou na vodní bázi. U těchto MT dochází po aplikaci k odpaření vody a v třecí vrstvě pak zůstávají pouze tuhé částice, které se ovšem nejsou schopny vůbec, a nebo pouze v omezeném množství, přenášet mezi jednotlivými povrchy kola a kolejnice. Druhým typem jsou pak TOR maziva, která jsou na olejové bázi. U těchto maziv nedochází k žádnému vypařování základové báze, tudíž jsou schopna se roznášet do větší dálky, než je tomu u MT, a to díky schopnosti přenášet se z kolejnice na kolo a zpět. Smyslem TOR produktů je také změna negativní třecí charakteristiky v charakteristiku pozitivní [7], jak je vyobrazeno na Obr. 2-4.

2.1.4 Režimy mazání

Na Obr. 2-5 je vyobrazena Stribeckova křivka popisující závislost adheze na parametru mazání Λ , který je definován jako poměr mezi tloušťkou mazacího filmu a kombinovanou drsností povrchů. Režimy mazání se rozdělují do čtyř kategorií:

- **mezné mazání** – tloušťka filmu není dostatečná k oddělení kontaktních těles, což znamená, že nerovnosti povrchů jsou větší než samotná tloušťka maziva, tento režim nastává při použití MT
- **smíšené mazání** – kontaktní povrchy jsou částečně oddělené mazivem a částečně se dotýkají, což znamená, že kontaktní tlak je přenášen jak povrchovými nerovnostmi, tak hydrodynamickým tlakem maziva, který je důsledkem vyšší rychlosti, tento režim nastává při použití TOR maziva
- **elastohydrodynamické a dynamické mazání** – pokud je rychlost dostatečně vysoká, pak roste i hydrodynamický tlak maziva, a tím se jeho tloušťka stává dostatečně silnou, aby byla schopna zcela oddělit kontaktní plochy, to znamená, že tloušťka filmu je větší než kombinovaná drsnost povrchů [6].



Obr. 2-5 Stribeckova křivka zobrazující režimy mazání [6]

2.2 Testování TOR produktů

Velká část publikací zaměřená na testování TOR produktů se zabývá testováním jejich výkonnosti, a to především vývojem adheze, schopností roznesení těchto maziv a vliv jejich aplikace na opotřebení kontaktních těles. Autoři publikací k těmto účelům využívají různá testovací zařízení, kdy mezi nejhlavnější patří dvoudiskové zařízení, které funguje na principu odvalování se dvou kol po sobě v protichůdném směru s rozdílnými rychlostmi, aby co nejlépe nasimulovaly pohyb kola po kolejnici. Dalším zařízením je tribometr v konfiguraci kulička-disk, kde se kulička odvaluje po disku, ke kterému je přitlačována, a tvoří se tak mezi nimi bodový styk. Obě tělesa jsou nezávisle poháněna, aby bylo možné mezi nimi vytvořit skluz. Třetím zařízením je pak zařízení s reálným kontaktem, což je zařízení disponující reálným kusem kolejnice a reálným kolem, které se po této kolejnici odvaluje. Toto zařízení je ze všech zmíněných nejbližší reálnému provozu. Dalšími testovacími zařízeními jsou např. kolík-disk nebo blok-válec, ovšem tyto tribometry vyvozují v kontaktu čistý skluz, proto nebyly pro tuto práci uvažovány, jelikož práce je zaměřena na valivě-skluzový kontakt, který odpovídá reálným podmínkám. Experimenty s TOR mazivy prováděné v terénu nebyly vzhledem k charakteru práce uvažovány.

2.2.1 Testování TOR produktů pomocí dvoudiskového zařízení

Zjištěním vlivu drsnosti kontaktních těles na jejich záběh, opotřebení a vývoj součinitele adheze pomocí dvoudiskového zařízení se ve své studii [9] zabýval Lundmark. Použil kontaktní tělesa o dvou různých drsnostech – drsné a hladké. Zkušební vzorky byly obrobena z reálných kol a kolejníc pro získání přesnějších výsledků. Vzorky reprezentující kolo byly vyrobeny z nerezové a bainitické oceli, vzorky pro kolejnici pak z UIC 1100 a borové oceli. Jednotlivé drsnosti vzorků lze vidět v Tab. 2-1, provozní parametry experimentů pak v Tab. 2-2. Před každým testem byly zkušební vzorky vyčištěny v ultrazvukové čističce a zváženy.

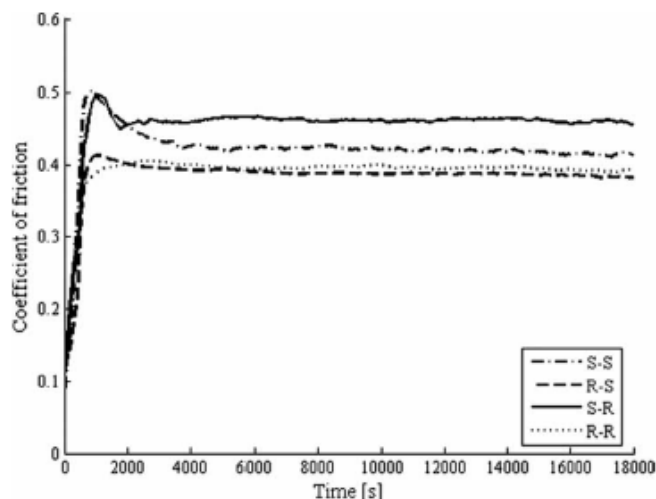
Tab. 2-1 Souhrn drsností testovacích vzorků [9]

drsnost	kolo z oceli		kolejnice z oceli	
	nerezová	bainitická	UIC 1100	borová
drsná	Sa = 14 μm	Sa = 14 μm	Sa = 2 μm	Sa = 2 μm
hladká	Sa = 2 μm	Sa = 2 μm	Sa = 0,5 μm	Sa = 0,5 μm

Tab. 2-2 Provozní parametry experimentů [9]

druh testu	zařízení	kontaktní tlak	rychlost	skluz	délka testu
adheze	dvoudiskové	810-880 MPa	200 ot./min	1 %	5 h/60 000 otáček

Z výsledků vyplývá, že největší vliv na opotřebení měl materiál kola a na tření drsnost kola. Zjistili, že větší opotřebení vykazuje hnací kolo. Vzhledem k tomu, že většina materiálových kombinací vykazovala v čase 2000 s velkou špičku u hodnoty tření, jak je vyobrazeno na Obr. 2-6, byla stanovena záběhová fáze trvající 3000 s pro ustálení nerovností vzorků. Z vyhodnocených výsledků plyne, že u oceli UIC 1100 je vliv drsnosti povrchu na opotřebení významný. U nerezové oceli vykazoval menší opotřebení drsnější vzorek oproti hladšímu. Experimenty v kombinaci hrubšího materiálu kola a hladšího materiálu kolejnice vykazují nejnižší hodnotu tření.



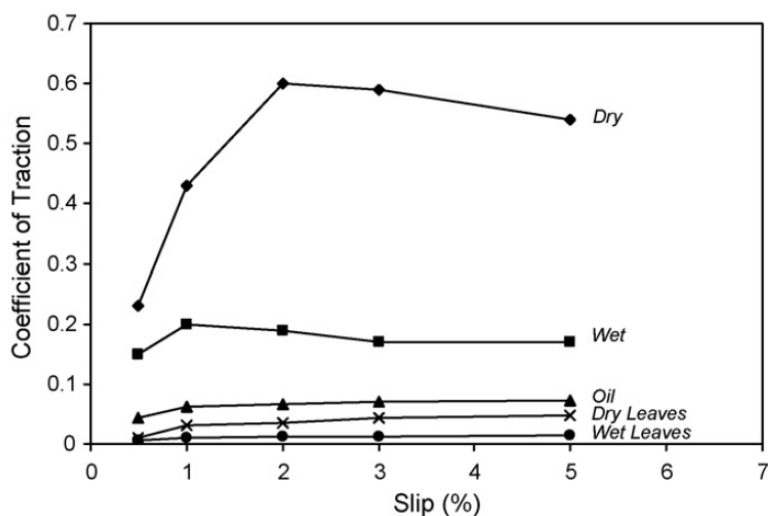
Obr. 2-6 Závislost součinitele tření na čase pro dvojice drsností: S – hladký, R – drsný [9]

Vývojem adheze v kontaktu, který byl kontaminovaný vodou, olejem, pískem, suchými a mokřými listy, se zabýval Gallardo-Hernández ve své studii [10]. Pro experimenty využil dva disky o průměru 47 mm s počáteční drsností 1 μm . Kontaminace kontaktu proběhla několika způsoby, a to motorovým olejem 15W40, v dalším experimentu byla aplikována voda, následovala kontaminace mokřými a suchými nadrcenými listy a v poslední řadě pak nadrceným pískem spolu s listím. Před započítáním experimentů proběhla fáze záběhu nových kontaktních těles, přičemž fáze záběhu pro ustálení hodnoty adheze proběhla i při experimentech, kde jako kontaminanty byly použity písek a listí, avšak experimenty s vodou a olejem byly započaty až po jejich aplikaci, tudíž bez dalšího záběhu. Všechny provozní parametry experimentů jsou vypsány v Tab. 2-3.

Tab. 2-3 Provozní parametry experimentů [10]

druh testu	zařízení	kontaktní tlak	rychlost	skluz	aplikace kontaminantů	počet cyklů
adheze	dvoudiskové	1500 MPa	1 m/s	0,5, 1, 2, 3, 5 %	2 kapky/s vody a oleje, 7 g/s písku	700 a 2000

Z výsledků experimentů, kde kontaminantem byl olej, vyplynulo, že s rostoucím skluzem roste i hodnota adheze, přičemž při skluzu 0,5 % byla její hodnota 0,03–0,04, při skluzu 5 % pak 0,07–0,075. Při porovnání všech kontaminantů bylo prokázáno, jak lze vidět na Obr. 2-7, že nejmenších hodnot adheze, konkrétně 0–0,02 bylo dosaženo v kontaktu kontaminovaném mokřými listy, naopak při kontaminaci vodou byla adheze ovlivněna nejméně, konkrétně se pohybovala mezi hodnotami 0,15–0,2. Z Obr. 2-7 je také patrná závislost hodnoty adheze na skluzu. Po provedení experimentů byly zanalyzovány povrchy kontaktních těles a bylo zjištěno, že při kontaminaci olejem došlo ke zjemnění drsnosti oproti počátečnímu stavu, naopak největší drsnosti bylo dosaženo při kontaminaci pískem.



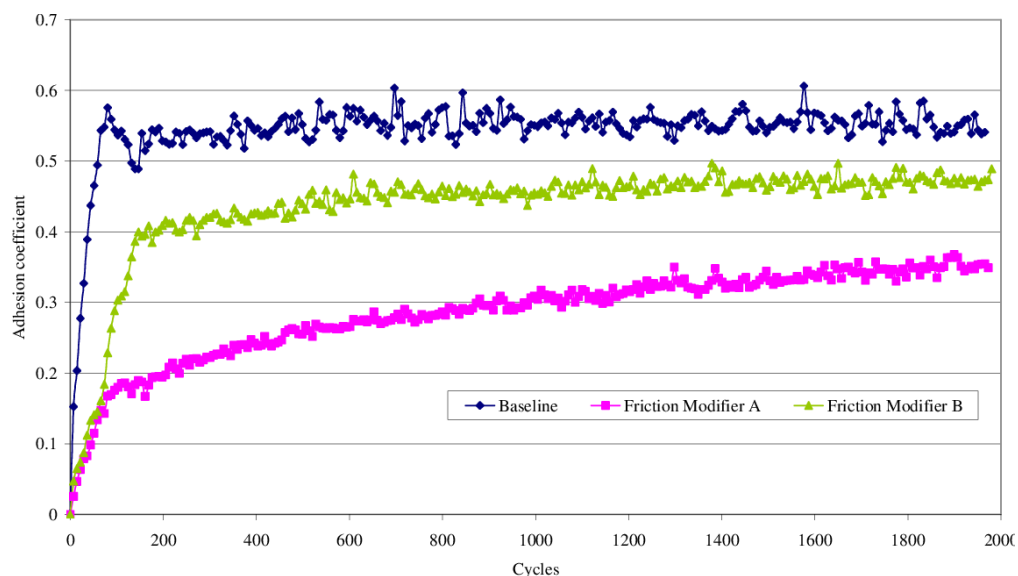
Obr. 2-7 Závislost hodnoty adheze na skluzu a kontaminaci kontaktu [10]

Porovnáním vlivu nasimulovaného sucha a deště v laboratorním prostředí na chování MT a vývoje adheze v kontaktu se zabýval Arias-Cuevas ve své studii [11]. Kontaktní těleso reprezentující kolo bylo z oceli B5T, těleso reprezentující kolejnici pak z oceli R260Mn, přičemž obě tělesa měla drsnost 1 μm . Oba disky byly před začátkem každého experimentu očištěny etanolem spolu s ultrazvukovými vibracemi. Následovala fáze záběhu, která proběhla za suchých podmínek při skluzu 0,5 % po dobu 4000 cyklů. Při obou experimentech byl MT nanesen na disk reprezentující kolejnici po fázi záběhu, u testu za mokřích podmínek byl navíc tento disk za běhu polit vodou. Experiment za mokřích podmínek byl o polovinu kratší než experiment za suchých podmínek, a to z důvodu odplavování MT z kontaktu. Bližší popis provozních parametrů je vyobrazen v Tab. 2-4.

Tab. 2-4 Provozní parametry experimentu [11]

druh testu	zařízení	kontaktní tlak	rychlost	skluz	aplikace TOR maziva	počet cyklů
adheze	dvoudiskové	1,2 GPa	1 m/s	0,5, 1, 2, 3 %	0,4-0,5 FMA a 0,7-0,8 g FMB po záběhu	1000, 2000

Při experimentu za suchých podmínek došlo vlivem aplikace FMA ke snížení hodnoty adheze z hodnot 0,3–0,6 na hodnoty 0,15–0,35, kdežto po aplikaci FMB byla adheze snížena na 0,25–0,55. Díky tomuto snížení se snižuje i míra opotřebení a kontaktní únavy, ale zároveň není narušena trakce ani brzdový výkon.



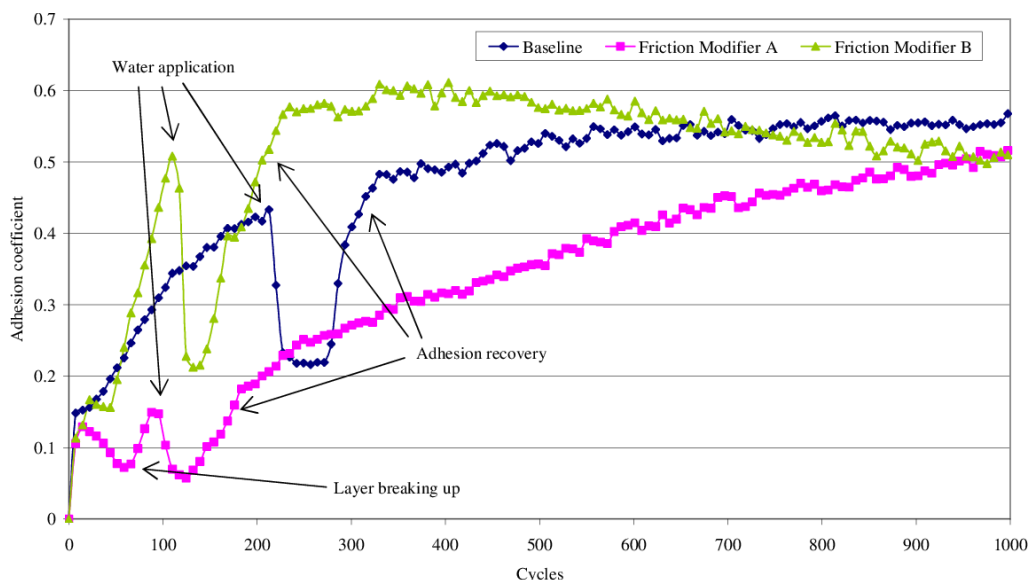
Obr. 2-8 Experiment při hodnotě skluzu 1 % [11]

Na Obr. 2-8 lze vidět, že účinnost obou MT je udržena po celou dobu experimentu, kdežto při vyšší hodnotě skluzu se kontakt dostal do hodnot adheze za suchých podmínek již v průběhu experimentu. Drsnosti povrchů obou kontaktních těles po experimentech za suchých podmínek jsou vypsány v Tab. 2-5.

Tab. 2-5 Drsnosti kontaktních těles při experimentu za suchých podmínek [11]

disk	na počátku	suché tření	aplikace FMA	aplikace FMB
kolo	1 μm	7 \pm 3 μm	2,75 \pm 0,65 μm	4 \pm 1 μm
kolejnice	1 μm	2,7 \pm 1 μm	0,9 \pm 0,3 μm	1,1 \pm 0,3 μm

Při experimentech za mokrých podmínek byla voda do kontaktu aplikována pipetou v podobě jedné kapky o hmotnosti 0,04 g po uběhnutí 20–50 cyklů kvůli ustálení hodnoty skluzu. Po aplikaci vody hodnota adheze okamžitě klesla, přičemž u neošetřeného kontaktu a u kontaktu ošetřeného FMB na hodnotu 0,2 a u kontaktu ošetřeného FMA na hodnotu 0,07. Při skluzu 0,5 % a 1 % byla u FMA vytvořena vrstva, díky které se součinitel adheze držel po zbytek testu na hodnotě 0,18–0,19, naopak při skluzu 2 % došlo k vyhladovění kontaktu, tedy k navrácení hodnoty adheze na hodnotu suchého tření. Tento jev je vyobrazen na Obr. 2-9. Z výsledků pro všechny druhy kontaktů vyplývá, že při zvyšující se hodnotě skluzu se zkracuje doba návratu adheze do hodnot suchého tření.



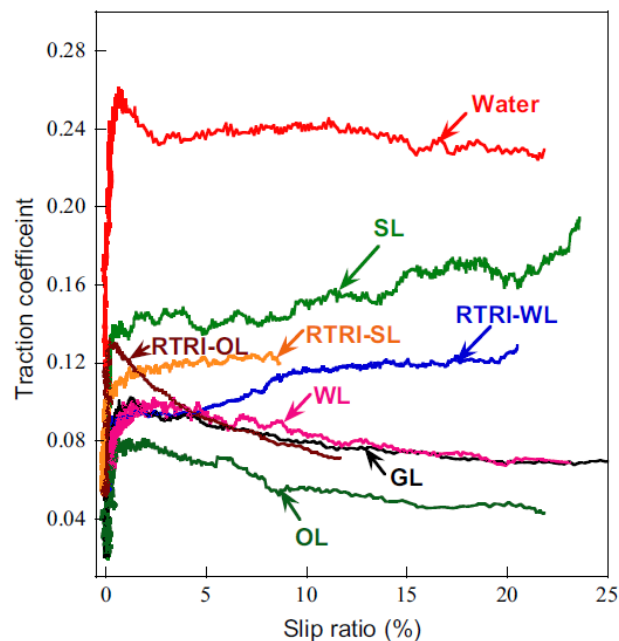
Obr. 2-9 Experiment při mokrych podmínkách a skluzu 2 % [11]

Porovnáním několika TOR produktů a jejich vlivu na vývoj součinitele adheze se ve své studii [12] zabýval Chen. Testoval celkem 8 TOR produktů, které byly klasifikovány jako olejové (OL), plastické (GL), pevné (SL) a rozpustné ve vodě (WL). Provozní parametry provedených experimentů jsou vyobrazeny v Tab. 2-6. Pro experiment byl využit disk o průměru 300 mm reprezentující kolo a disk o průměru 170 mm reprezentující kolejnici, který byl zbrúšen na svém okraji tak, aby simuloval vnitřní kolejnici při průjezdu obloukem, přičemž oba disky byly vyrobeny z materiálů odpovídajících těm reálným. Chen praktikoval dva způsoby aplikace TOR produktů, přičemž jedním z nich bylo ruční nanesení vrstvy na disk reprezentující kolo. Pro dostatečné roznesení maziva byly oba disky roztáčeny po dobu 1 min rychlostí 5 km/h a zatíženy silou 1 kN. Druhý způsob byla aplikace maziva přímo do kontaktu pomocí stříkačky. Maziva byla aplikována v různých množstvích, a to jednorázově nebo opakovaně.

Tab. 2-6 Provozní parametry experimentů [12]

druh testu	zařízení	kontaktní tlak	rychlost	skluz	aplikace MT
adheze	dvoudiskové	751 MPa	40 km/h	1-25 %	před začátkem a po dosažení rychlosti

Z Obr. 2-10 je patrné, že maziva SL a RTRI-SL vykazují pozitivní třecí charakteristiku s nárůstem skluzu, což je žádoucí, proto se tato maziva jeví jako vhodná pro jejich aplikaci na vnitřní kolejnici. Naopak lze vidět, že GL, OL a WL vykazují negativní třecí charakteristiku, která vede na stick-slip, proto tato maziva nejsou pro tyto účely vhodná. V případě maziva RTRI-WL je při nízkém skluzu pozorován stejný průběh jako pro GL, OL, WL, ovšem při vyšším skluzu začíná vykazovat pozitivní třecí charakteristiku, proto by se dalo zařadit do skupiny použitelných maziv pro temeno vnitřní kolejnice.



Obr. 2-10 Vývoj součinitele adheze v závislosti na skluzu a použitém TOR produktu [12]

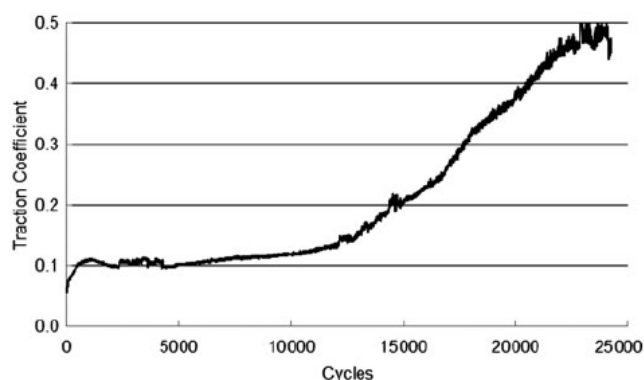
Buckley-Johnstone se ve své studii [13] zaměřil na testování výkonnosti MT a jeho výdrž v kontaktu, a zároveň na zjištění jeho vlivu na opotřebení kontaktních těles. K experimentu využil disky o průměru 47 mm. Proběhly dva typy experimentů, kde u prvního se zkoumalo opotřebení při suchém a MT kontaminovaném kontaktu a u druhého se zkoumala výdrž MT. Materiály kontaktních těles u obou zařízení odpovídaly materiálům reálné železniční dopravy. MT bylo v první sérii experimentů aplikováno pomocí spreje každých 250 cyklů po dobu 25 000 cyklů, u druhé série byl MT pomocí štětce rovnoměrně nanesen na kolejnici, respektive na hlavu disku představujícího kolejnici. Při experimentech proběhla fáze záběhu, která trvala po dobu 5000 cyklů, aby se adheze ustálila na hodnotě suchého tření, tedy 0,5. Všechny provozní parametry provedených experimentů jsou vypsány v Tab. 2-7.

Tab. 2-7 Provozní parametry experimentů [13]

druh testu	zařízení	kontaktní tlak	rychlost	skluz	aplikace TOR maziva	počet cyklů
opotřebení	dvoudiskové	900 MPa	1 m/s	0-5 %	každých 250 cyklů	25 000
výdrž	dvoudiskové	1 500 MPa	1 m/s	2 %	0,1 g	23 000

Při testech na opotřebení došlo vždy při aplikaci MT k rapidnímu poklesu hodnoty adheze, a to z důvodu, že bylo aplikováno v mokřém stavu, tudíž hodnotu ovlivňovala vodní základová báze, avšak po jejím vyschnutí adheze stoupala, ale nikdy nepřekročila hodnotu 0,3. U zkoumání míry opotřebení bylo zjištěno, že nejmenší opotřebení vykazují tělesa ošetřena MT, a zároveň, že se zvyšujícím se skluzem pro všechny látky roste i míra opotřebení kontaktních těles.

U experimentů zaměřených na studium výdrže maziva se po jeho aplikování držela adheze po dobu 12 000 cyklů na hodnotě 0,1, následně teprve začala růst, a to až na hodnotu suchého tření, jak je vyobrazeno na Obr. 2-11.



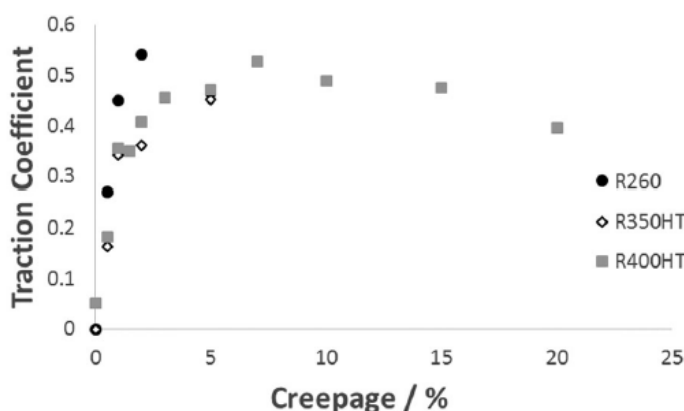
Obr. 2-11 Vývoj součinitele adheze při 2% skluzu a zatížení 1 500 MPa [13]

Porovnáním rozdílů vývoje adheze v závislosti na různých tvrdostech použitých kontaktních těles se ve své studii [14] zabýval Harmon. Ten pro své experimenty použil kontaktní tělesa o průměru 47 mm a různých materiálech, které jsou vypsány v Tab. 2-8, přičemž před každým experimentem byla tato kontaktní tělesa očištěna pomocí ultrazvukové čističky. Všechny testy byly provedeny za suchých podmínek.

Tab. 2-8 Provozní parametry experimentů [14]

druh testu	zařízení	kontaktní tlak	rychlost	aplikace MT	ocel
adheze	dvoudiskové	1,5 GPa	0,1 m/s	-	R260, R350HT, R400HT

Harmon provedenými experimenty prokázal, že čím tvrdší použil materiál kol, tím nižších hodnot adheze bylo dosaženo. Zároveň u nejtvrdšího z materiálů prokázal, že se zvyšujícím se skluzem součinitel tření klesá.



Obr. 2-12 Závislost hodnoty adheze na skluzu a tvrdosti materiálu [14]

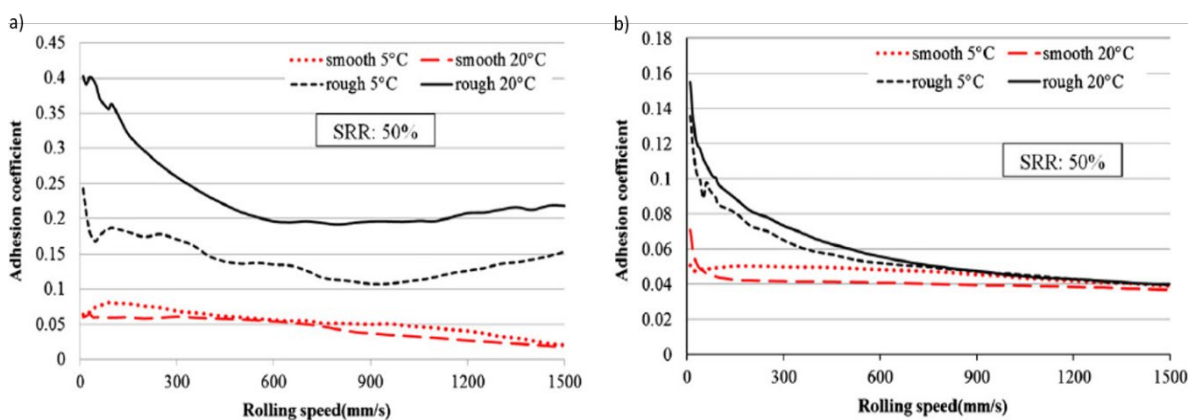
2.2.2 Testování TOR produktů pomocí tribometru kulička-disk

Průběhem adheze v zaplaveném neboli předávkovaném kontaktu se ve své studii [15] zabýval Zhu. Kontakt byl zaplavován vodou nebo olejem. Při experimentech byl sledován vliv drsností povrchů těles na výslednou hodnotu adheze. Kulička je z materiálu o tvrdosti 800 HV a drsnosti povrchu $R_a=0,02 \mu\text{m}$ a disky o tvrdostech 300–320 HV a drsnostech $R_a=0,01$ nebo $0,15 \mu\text{m}$. Na každý experiment byla použita nová kontaktní tělesa, která byla před započítáním experimentů obě očištěna ultrazvukovou čističkou v toluenu a následně osušena, poté následovala fáze záběhu, která trvala 3 min při rychlosti 1,5 m/s a tlakem 700 nebo 900 MPa. Při samotném experimentu u sledování adheze začal test na skluzu 0 % a po každém kroku se zvyšoval o 0,5 % do hodnoty 10 % a následně přibýval po 5 % až do skluzu 100 %, přičemž celý experiment trval 20 min. Provozní parametry všech experimentů jsou vypsány v Tab. 2-9.

Tab. 2-9 Provozní parametry experimentů [15]

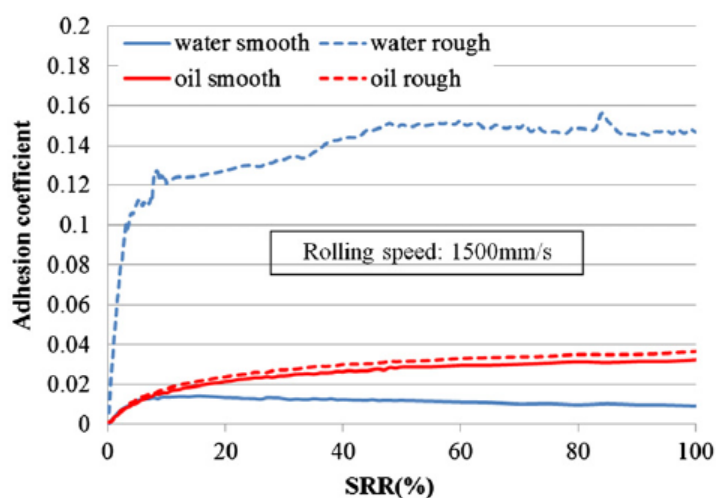
druh testu	zařízení	kontaktní tlak	rychlost	skluz	aplikace kontaminantu	teplota v komoře
adheze	kulička-disk	750 MPa	1,5 m/s	0-100 %	žádný, voda a olej	20 °C
Stribeck	kulička-disk	700 a 900 MPa	0,01-1,5 m/s	50 %	voda a olej	5 a 20 °C

Při sledování vlivu teploty na výsledky experimentů bylo zjištěno, jak je vyobrazeno na Obr. 2-13 a), že při použití vody jako kontaminantu byla výsledná adheze u hladších povrchů téměř totožná, tedy, že změna teploty neměla na hodnotu adheze prakticky žádný vliv, kdežto u drsnějších povrchů byla hodnota adheze při teplotě 5 °C v rozmezí hodnot 0,1–0,15 a při teplotě 20 °C pak 0,2. Na Obr. 2-13 b) pak lze vidět rozdíly v závislosti na teplotě při použití oleje, kde pro obě drsnosti povrchů je průběh Stribeckovy křivky velmi podobný pro obě teploty.



Obr. 2-13 Vliv teploty na hodnotu adheze při tlaku 900 MPa; a) při použití vody, b) při použití oleje [15]

Při experimentech za sucha u hodnot skluzu do 10 % rostla hodnota adheze téměř lineárně, u hladších těles do hodnoty 0,85, u drsnějších pak do 0,8 a následně začínala klesat a končila na hodnotě 0,6–0,7. U experimentů, kde byl kontakt zaplaven vodou a olejem bylo zjištěno, jak lze vidět na Obr. 2-14, že u drsnějších těles při použití vody roste hodnota adheze lineárně až do skluzu 5 % a s dalším zvyšováním skluzu do 50 % roste adheze postupně až na stabilní hodnotu 0,15. Pro hladší povrchy rostla při použití vody adheze na hodnotu 0,015 do skluzu 5 % a nad tímto skluzem postupně klesala až na hodnotu 0,01. Při použití oleje pak v obou případech drsností hodnota adheze mírně stoupala po celou dobu experimentu, přičemž konečná hodnota adheze se pohybovala v rozmezí 0,03–0,04 pro drsné povrchy, pro hladší to pak bylo o něco méně.



Obr. 2-14 Závislost hodnoty adheze na skluzu pro různé kontaminanty a drsnosti povrchů [15]

Vlivem přítomnosti vodní báze na vývoj součinitele adheze v kontaktu se ve své studii [16] zabýval Galas. Pro experimenty byly využívány MT s různým stupněm komplexity a různým složením. Jako kontaktní tělesa byly využity disk a kulička z materiálu AISI 52 100. Na počátku byla drsnost disku 0,02 μm a kuličky 0,01 μm . Byly provedeny dva typy experimentů, a to testy zkoumající vývoj součinitele adheze a testy zkoumající opotřebení. Parametry těchto experimentů jsou uvedeny v Tab. 2-10. Před započítáním každého testu byla kontaktní tělesa očištěna pomocí ultrazvukové čističky acetonem, aby byly povrchy zbaveny nečistot z předchozích experimentů. Před aplikací MT proběhla fáze záběhu, kdy se součinitel adheze ustálil na hodnotě suchého tření. Zároveň se stabilizovala drsnost obou kontaktních těles na hodnotě R_a 0,25 μm u disku a R_a 0,1 μm u kuličky.

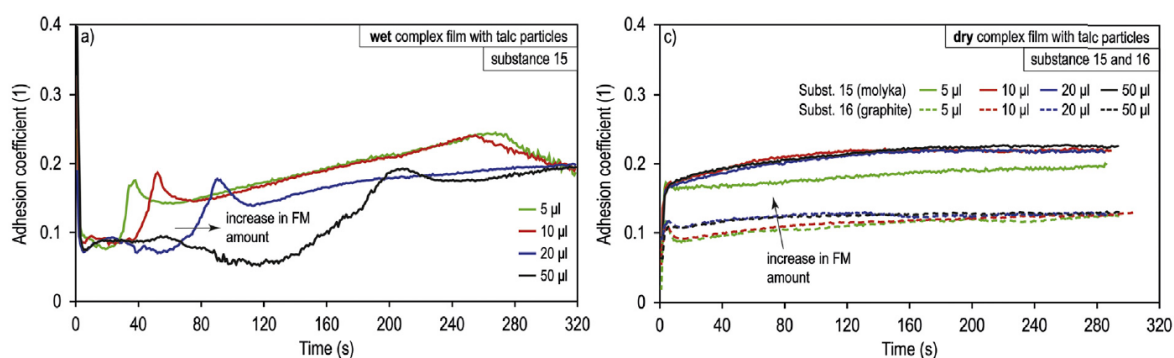
Byly prováděny dva typy experimentů, a to s přítomností základního média MT a poté po jeho odpaření. První při „mokrém“ třecím filmu, což znamená, že experiment započal ihned po aplikaci MT. Aplikace MT na disk probíhala pomocí mikropipety, přičemž aplikované dávky se pohybovaly v rozsahu od 5 μl až do 1 ml. Druhý typ experimentu byl proveden se „suchým“ třecím filmem, kdy MT byl nanesen po záběhu, ale test začal až po vypaření základního média, tedy po 5 min.

V případě testů opotřebení Galas použil nová kontaktní tělesa, avšak při těchto experimentech byl použit disk z oceli C45, který se složením blíží reálnému kolu a kolejnici. Experiment trval 60 min při stejných provozních parametrech, jako jsou uvedeny v Tab. 2-10. Záběhová fáze zde z důvodu poškození povrchu a opotřebení neproběhla. MT bylo aplikováno opakovaně, vždy když hodnota adheze dosáhla hodnoty 0,4. Výsledný povrch byl zkoumán pomocí 3D optického profilometru.

Tab. 2-10 Provozní parametry experimentů [16]

druh testu	zařízení	kontaktní tlak	rychlost	skluz	aplikace MT	délka testu
adheze	kulička-disk	750 MPa	0,3 m/s	5 % SRR	před začátkem	240 s, 320 s
opotřebení	kulička-disk	750 MPa	0,3 m/s	5 % SRR	adheze > 0,4	60 min

Z výsledků vyplývá, že výdrž maziva je závislá na aplikovaném množství. U mokrého filmu byla adheze velmi nestabilní a po dlouhou dobu se držela v kritických hodnotách, viz. Obr. 2-15 a). U suchého filmu se adheze brzy dostala nad hodnotu 0,2 a vykazovala stabilní chování, jak je vyobrazeno na Obr. 2-15 b). Z hlediska opotřebení bylo dokázáno, že jak mokrá, tak suchý film jej výrazně redukuje, a to až o 66–87 %.



Obr. 2-15 Graf závislosti adheze na čase pro mokrý film (vlevo) a suchý film (vpravo) [16]

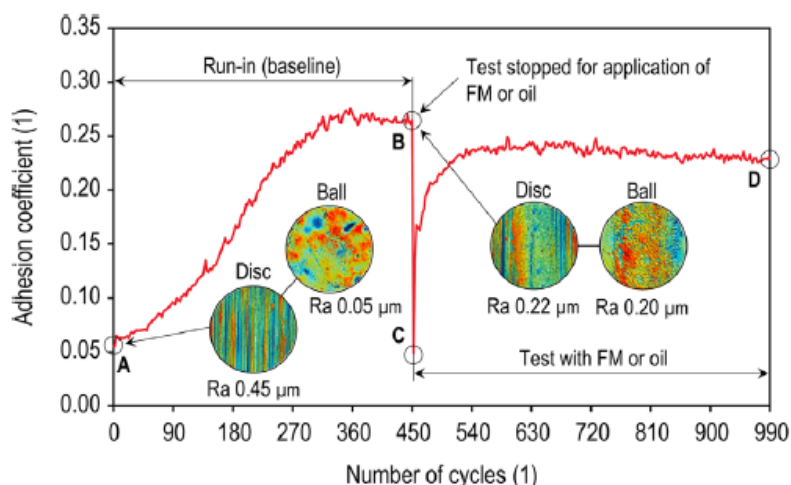
Vlivem vývoje adheze a opotřebení při použití dvou různých TOR maziv se ve své studii [17] zabýval Galas. Jejich cílem bylo objasnit vliv aplikovaného množství na průběh adhezní křivky. Byly provedeny 3 druhy experimentů, jejichž provozní parametry jsou zobrazeny v Tab. 2-11. Šlo o experimenty prováděné za účelem zkoumání průběhu adheze pro různé hodnoty skluzu, dále pro zjištění závislosti změny adheze na rychlosti, a nakonec pro zkoumání závislosti změny adheze na množství naneseného maziva. Pro testy byla využita dvě tělesa, kterými byl disk z oceli C45 o drsnosti $R_a=0,45 \mu\text{m}$ a kulička z oceli AISI 1010 o drsnosti $R_a=0,05 \mu\text{m}$. Jako TOR maziva byla použita dvě komerčně dostupná maziva, označena jako FMA a FMB. Mazivo FMA obsahuje výrazně více kovových částic než FMB. Vždy před každým testem byla obě kontaktní tělesa ultrazvukově vyčištěna pro odstranění oxidů na povrchu. Poté proběhla fáze záběhu těles pro ustálení součinitele adheze na hodnotě suchého tření. S narůstající hodnotou skluzu se tato doba zkracovala. Po záběhu

bylo mazivo pomocí mikropipety aplikováno přímo do kontaktu. Následně proběhlo několik cyklů o čistém valení pro vytvoření stejnoměrného filmu po celém disku. Následoval samotný experiment, jehož průběh je vyobrazen na Obr. 2-16. Po provedení experimentů byly povrchy obou kontaktních těles vyhodnoceny 3D optickým profilometrem. Byla tak zjištěna míra jejich opotřebení.

Tab. 2-11 Provozní parametry experimentů [17]

druh testu	zařízení	kontaktní tlak	rychlost	skluz	aplikace TOR maziva	počet cyklů
adheze	kulička-disk	750 MPa	0,3 m/s	1, 3, 5,10 %	1 μ l před začátkem	540
Stribeck	kulička-disk	750 MPa	1-2500 mm/s	10 %	zaplaveno před začátkem	-
výdrž	kulička-disk	750 MPa	0,3 m/s	10 %	1-4 μ l před začátkem	540

Z výsledků testů vyplývá, že TOR maziva jsou schopna regulovat adhezi bez dopadu na trakti a brzdění. Jako optimální množství byl stanoven 1,5 μ l pro FMB a 3 μ l pro FMA. Dále Galas zjistil, že při zvyšujícím se skluzu roste i hodnota adheze v kontaktu a dosahuje hodnot v rozmezí 0,3–0,6 v závislosti na skluzu. Výdrž maziv roste s jejich aplikovaným množstvím, ovšem při zaplavení kontaktu klesá adheze pod kritickou hodnotu. Použití TOR maziva vykazuje menší opotřebení kontaktních těles oproti suchému kontaktu.



Obr. 2-16 Průběh experimentu včetně záběhu [17]

2.2.3 Testování TOR produktů pomocí zařízení s reálným kontaktem

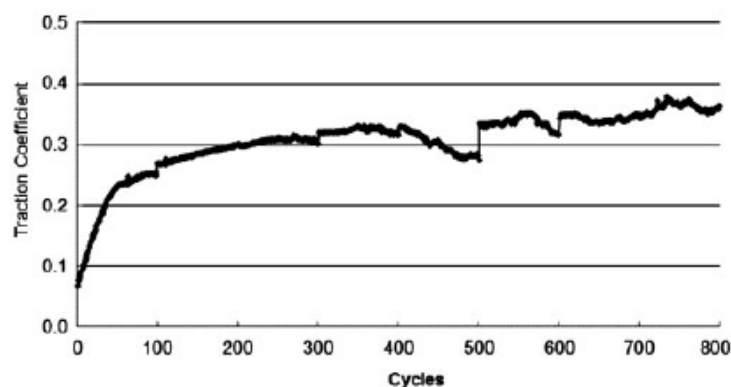
Buckley-Johnstone se ve své studii [13] zabýval výdrží MT v kontaktu, a zároveň i jeho vlivem na opotřebení těles. Při experimentech použil kolo o průměru 900 mm, přičemž materiály kontaktních těles odpovídaly materiálům reálné železniční dopravy, a zkoumal

opotřebení jak za sucha, tak při nanesení MT. Provozní parametry všech provedených experimentů jsou vypsány v Tab. 2-12. V první sérii experimentů bylo MT pomocí spreje aplikováno na temeno kolejnice každých 250 cyklů po dobu 10 000 cyklů, přičemž každý cyklus byl dlouhý 0,5 m. U obou těles byl změřen profil jejich povrchu před a po experimentu, na základě čehož bylo možné zjistit jejich opotřebení. Při suchém kontaktu adheze vykazovala hodnotu 0,5 – 0,6. Při experimentech zaměřených na výdrž maziva bylo MT nanášeno rovnoměrně pomocí štětce na kolejnici a kolo se po ní odvalovalo vždy ve stejném směru.

Tab. 2-12 Provozní parametry experimentů [13]

druh testu	zařízení	kontaktní tlak	rychlost	skluz	aplikace TOR maziva	počet cyklů
opotřebení	reálný kontakt	23 t	-	0,5 %	každých 250 cyklů	10 000
výdrž	reálný kontakt	1 500 MPa	40 mm/s	2 %	před začátkem	800

Z výsledků vyplývá, že při studii výdrže maziva se adheze během prvních 200 cyklů dostala na hodnotu 0,3 a do konce experimentu se pohybovala v rozmezí 0,3–0,35, jak je vyobrazeno na Obr. 2-17. Experiment nebyl dostatečně dlouhý, aby se adheze dostala na hodnotu suchého tření.



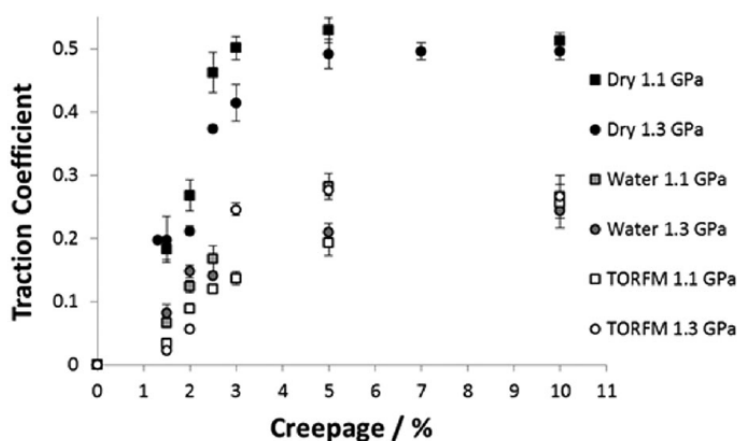
Obr. 2-17 Vývoj součinitele adheze při skluzu 2% a tlaku 1 500 MPa [13]

Vlivem rozdílů vývoje adheze po aplikaci MT, vody a za sucha se zabýval v jedné ze svých studií [14] Harmon. Při experimentech, jejichž provozní parametry jsou vypsány v Tab. 2-13, Harmon vždy před začátkem experimentů realizoval fázi „čištění“ kontaktních těles, a to tak, že pod tlakem 0,8 GPa přejelo kolo 50x po celé kolejnici, aby byla odstraněna zoxidovaná vrstva na povrchu kolejnice. Pro simulaci mokřích podmínek byla voda pomocí tří sprejů aplikována přímo do kontaktu, zatímco při použití MT proběhla aplikace pomocí stříkačky a následně bylo za tlaku 0,8 GPa realizováno roznesení, kdy kolo pětkrát přejelo po kolejnici.

Tab. 2-13 Provozní parametry experimentů [14]

druh testu	zařízení	kontaktní tlak	rychlost	aplikace MT; vody	ocel
adheze	reálný kontakt	1,1 a 1,3 GPa	0,1 m/s	3 ml; 2,1 g	R260, R400HT

Harmon prokázal, že při změně kontaktního tlaku se mění i hodnota adheze, konkrétně při experimentech za suchých a mokrých podmínek byla adheze vyšší při nižším tlaku, ovšem při skluzu 10 % byla v obou případech velmi podobná, naopak u experimentů s použitím MT naopak hodnota adheze se zvyšujícím se tlakem rostla, jak je vidět na Obr. 2-18. Při nízkých hodnotách skluzu kontakt vykazoval velmi nízké hodnoty adheze, což mohlo být zapříčiněno přítomností vodní báze v MT.



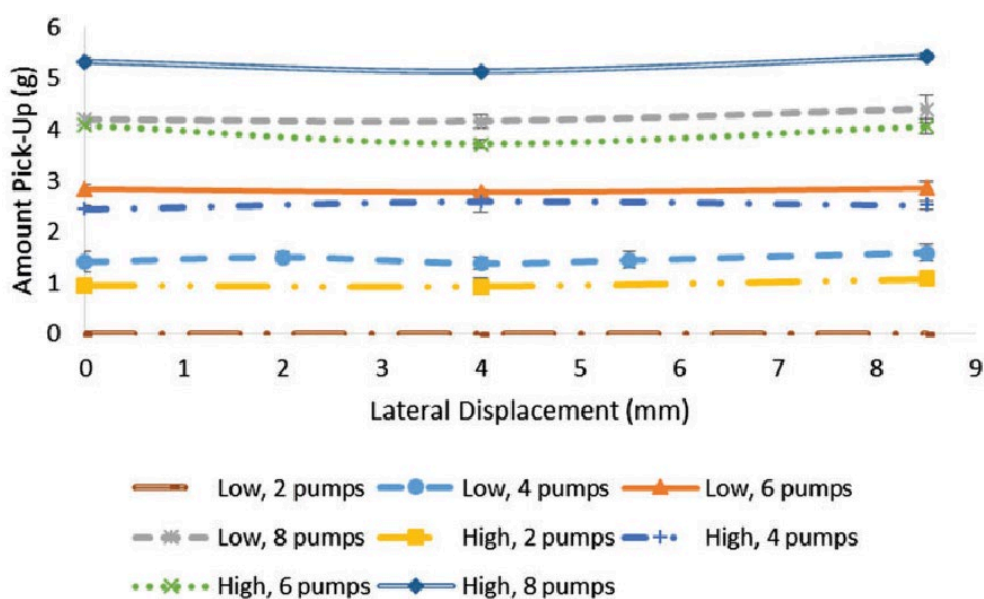
Obr. 2-18 Závislost hodnoty adheze na skluzu při různých podmínkách [14]

Zkoumáním vlivu skluzu, zatížení a rychlosti na výsledné roznesení 3 rozdílných MT se zabýval Harmon ve své studii [18]. K těmto experimentům využil zařízení s reálným kontaktem a zařízení fungující na stejném principu, ovšem v menším měřítku (s menším kolem) a zkoumal vliv změny měřítka na dosažené výsledky. Při použití zmenšeného kola přejezdějícího po kolejnici byl MT nanášen na temeno kolejnice pomocí pumpy napojené na aplikační lištu a tvořil tak malé „louže“, přičemž tato aplikační lišta byla ukotvena ve dvou různých výškách vzhledem ke kolejnici v průběhu experimentů (0 a 2,5 mm). Provozní parametry byly odladěny na jednom MT, až následně byly otestovány zbylé dva, přičemž množství maziva aplikovaného na kolejnici se lišilo v závislosti na jeho viskozitě. Množství maziva nalepeného na přejezdějící kolo bylo měřeno pomocí velmi přesného zařízení, a to při první sérii experimentů ve chvíli, kdy kolo jednou přešlo po louži MT, ve druhé sérii pak toto měření proběhlo po přejetí kola přes louži a následném čtyřnásobném odvalení onoho kola s již nalepeným množstvím maziva po kolejnici.

U experimentů na zařízení s reálným kontaktem byly použity stejné MT jako u zmenšeného kola. Nebylo ovšem možné použít stejné aplikační zařízení, proto musel být MT aplikován na temeno kolejnice přímo z pumpy. Tato změna aplikace způsobila rozdílné rozlití MT po kolejnici, což ovlivnilo výsledky experimentů. I přes tento rozdíl bylo možné

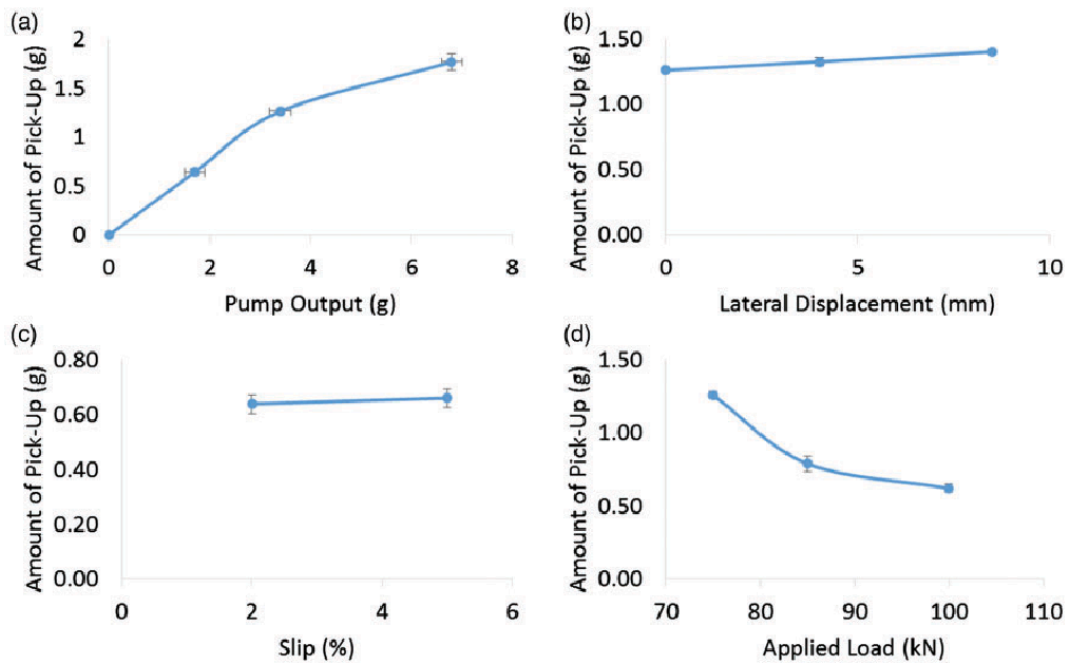
relativně porovnat vlastnosti použitých MT. Pomocí tohoto zařízení s reálným kontaktem a jednoho typu MT byl studován vliv skluzu, zatížení, laterální posuv kola a množství aplikovaného MT na výsledné množství přeneseného na kolo, a to pomocí papírových ubrousků a již zmíněného zařízení. Pro zbylé dva MT byla pro aplikaci na kolejnici použita stříkačka, aby bylo zajištěno vždy stejné aplikované množství, následně byly testovány stejným způsobem popsaným u zařízení se zmenšeným kolem.

Při experimentech se zmenšeným kolem bylo prokázáno, jak lze vidět na Obr. 2-19, že čím větší bylo aplikované množství MT, tím více se ho přeneslo na kolo. Dále bylo zjištěno, že při aplikaci MT z větší výšky bylo na kolo přeneseno také větší množství, což je u obou typů experimentů vysvětlováno tím, že byla vlivem aplikace vytvořena větší louže.



Obr. 2-19 Množství přeneseného MT na kolo v závislosti na aplikovaném množství a výšce aplikátoru [18]

U experimentů na zařízení s reálným kontaktem byly zjištěny rozdíly výsledného množství nalepeného MT na kolo vlivem různých parametrů, jak bylo zmíněno výše (skluz, zatížení, laterální posuv kola a aplikované množství) a jak je vyobrazeno na Obr. 2-20. Z grafu a) lze vidět, že s rostoucím množstvím aplikovaného MT roste i množství nalepené na kolo, avšak při množství 4 g se křivka láme. Na grafu b) lze vidět malý nárůst nalepení MT při zvětšování laterálního posuvu kola, z grafu c) pak lze vidět mírný nárůst nalepeného množství s rostoucím skluzem. Na posledním grafu d) je vyobrazena situace se změnou aplikované síly a lze konstatovat, že se zvyšující se silou klesá množství nalepeného MT na kolo, což je způsobeno tím, že při vyšší síle je větší množství MT vytlačeno ven z kontaktu.



Obr. 2-20 Vliv rozdílných provozních parametrů na výsledném přenosu MT na kolo [18]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

TOR produkty se v železniční dopravě využívají zejména k řízení adheze, snížení únavy a k redukci hlučnosti a opotřebením kontaktních těles, aby byly ušetřeny finanční prostředky související s údržbou. Problémem je ovšem aplikace správného množství těchto produktů, jelikož nesprávné dávkování může vést k „předávkování“ kontaktu, což se projevuje prodloužením brzdné dráhy. Při nedostatečném dávkování nebude naopak dosaženo požadovaných benefitů.

Nedostatkem v oblasti TOR produktů je jejich testování. Neexistuje totiž norma, která by říkala, jakým způsobem, pomocí jakého zařízení a s jakými provozními parametry je nejvhodnější tyto produkty testovat. Některé testy jsou prováděny přímo na reálných tratích, což je ale finančně náročné. Další testy jsou realizovány v prostředí laboratorním, což významně šetří finanční prostředky. Z výše zmíněných důvodů je účelem normalizovat experimenty pro laboratorní prostředí a stanovit přesné provozní parametry těchto testů, aby byly dobře opakovatelné v jakékoli laboratoři za dodržení stanovených podmínek. To bohužel představuje hned několik problémů, jelikož reálný kontakt kola a kolejnice je řádově větší oproti kontaktu těles využívaných v laboratorním prostředí. V případě laboratorního testování je oproti testům na reálné trati výhodou, že jsou pod kontrolou některé provozní parametry, které ovlivňují průběh experimentů. Nastavitelnost provozních parametrů před začátkem experimentů vede na dobrou přesnost a opakovatelnost testů. Výhodou této skutečnosti je také možnost srovnání dosažených výsledků napříč všemi pracovišti využívajícími totéž zařízení.

3.2 Analýza a zhodnocení rešerše

V následujících odstavcích budou představeny nejzásadnější kroky experimentů z výše uvedené rešerše a budou představeny parametry, které se na daných laboratorních zařízeních nastavují a sledují. Dále se v práci budou tyto parametry rozdělovat na parametry pozorované, nastavitelné a proměnné. Ze studií poté vyplývá časový sled jednotlivých kroků prováděných v průběhu celého experimentu. Ve studiích [15–17], kde autoři zmiňovali stav kontaktních těles, vždy začali experiment se dvěma novými kontaktními tělesy. Následovalo jejich čištění a záběh, dalším krokem byla volba jednotlivých provozních parametrů (tlak, skluz, rychlost) a poté byl již do kontaktu aplikován samotný TOR produkt.

Prvním krokem při většině experimentů prováděných v laboratorním prostředí bylo čištění vzorků pomocí ultrazvukové čističky, jak uvádí články [9, 15–17]. Galas ve své studii

[16] upřesňuje, že na čištění použil aceton, Zhu [15] pak toluen. Tyto látky fungují jako rozpouštědla, díky čemuž je dosaženo lepšího odstranění zbytkového maziva z drážky.

V další fázi se někteří autoři zabývali záběhem kontaktních těles. V některých studiích [15–17] autoři přímo realizovali fázi záběhu, která sloužila pro ustálení hodnoty adheze definované pro suché tření. Lundmark [9] ovšem fázi záběhu vynechal, avšak po vyhodnocení výsledků zaznamenal velké výchylky hodnoty adheze v prvních minutách experimentů. Výhodou v tomto případě bylo, že všechny testy byly prováděny za suchých podmínek, proto mohl být následně stanoven začátek experimentů jako záběh těles. Ovšem v případě, že by se fáze záběhu opomenula v experimentech obsahujících již nějaké TOR produkty, mohl by být dopad na dosažené výsledky markantní, jelikož hodnota adheze by v krátkém časovém úseku vykazovala nadměrné výkyvy. To proto, že by se na počátku experimentu výrazně měnila drsnost těles, popřípadě by docházelo k odstraňování zoxidovaného povrchu, čímž by se formovala kontaktní drážka. Z toho vyplývá, že záběh hraje zásadní roli při průběhu celého experimentu.

Hodnoty skluzu se ve všech studiích [9–11, 13, 15–17] pohybují v rozmezí 0–10 %, přičemž nejčastějšími hodnotami získanými ze studií [10, 13, 19] jsou 2 a 3 %. Při použití dvoudiskového zařízení to je pravděpodobně z důvodu udržení se v oblasti pod bodem saturace, což je v kontaktu kolo-kolejnice důležité, aby nedocházelo k tzv. efektu stick-slip, který přispívá k rychlejšímu opotřebení kontaktních těles. Při volbě kontaktního tlaku autoři studií [9, 12, 15–17] nastavují jeho hodnotu v rozmezí 650–900 MPa, u studií [10, 11, 13, 14] pak autoři volí kontaktní tlak v rozmezí 1000–1500 MPa. Tento rozdíl je pravděpodobně způsoben tím, že autoři volící nižší tlaky se zabývají lehkou kolejovou dopravou (tramvaje), naopak autoři volící tlaky vyšší se zabývají těžkou kolejovou dopravou (nákladní vlaky).

Při volbě rychlostí se autoři [10, 13–19] pohybují v rozmezí 0,1–1 m/s, přičemž nejčastěji volená hodnota vycházející ze studií [10, 13, 19] je 1 m/s. K takto nízkým hodnotám tíhnou pravděpodobně z důvodu, že u většiny laboratorních zařízení není možné dosáhnout rychlostí odpovídajících skutečnému provozu.

Ve studiích, kde autoři využívají TOR produkty, se vyskytuje několik způsobů jejich aplikace do kontaktu. Galas ve svých studiích [16, 17] aplikuje komerčně dostupné látky pomocí mikropipety. Chen [12] prakticoval dvě metody, kde v prvním případě ručně nanasle vrstvu TOR produktu na jeden z disků, přičemž oba disky byly v klidovém stavu, jedná se tedy o statickou aplikaci, a následně roztočil disky, aby došlo k jeho roznesení, ve druhém případě pak pomocí stříkačky aplikoval mazivo přímo do kontaktu dvou disků, které se po sobě již odvalovaly, jedná se tedy o dynamickou aplikaci. Harmon pak ve svých studiích [14, 18] používal stříkačku, štětec, nebo dokonce pumpu. Tyto rozdílné metody mohou mít dopad na vývoj součinitele adheze, jelikož v případě okamžitého aplikování bez fáze roznesení dochází k rapidnímu propadu hodnoty adheze a až po nějakém čase se ustálí na nějaké hodnotě. Dalším rozdílem pak může být přesnost jednotlivých aplikací, jelikož při použití mikropipety dochází k přesnějšímu aplikování maziva přímo do kontaktu, zatímco

při použití štětce je tloušťka nanesené vrstvy v celé své oblasti nerovnoměrná. Na základě těchto informací lze předpokládat, že aplikace pomocí mikropipety je přesnější.

Další vliv na průběh experimentu může mít při rozdílném aplikovaném množství také vzniklá tloušťka vrstvy, která může ovlivnit typ režimu mazání v kontaktu. Galas v článku [17] u tribometru kulička-disk aplikoval množství v rozmezí 1–4 μl před začátkem experimentu, na základě čehož zjistil, že kontakt je velmi citlivý na aplikované množství. Zhu pak ve své studii [15] kontaktní tělesa na tribometru kulička-disk zcela zaplavil, aby zjistil chování kontaktu ve stavu „předávkování“. Chen [12] u dvoudiskového zařízení aplikoval 0,2 g maziva, a to před začátkem experimentu a poté po dosažení požadované rychlosti, Arias-Cuevas pak jednorázově množství 0,8 g. Rozdílné množství maziv závisí na použitém zařízení, velikosti kontaktních těles a na tvaru kontaktní plochy, aby bylo vždy dosaženo požadovaného (mezného či smíšeného) režimu mazání. Při aplikování látky do kontaktu není možné mít plnou kontrolu nad tím, že do něj vstoupí celé aplikované množství, jelikož se může stát, že část z něj je z kontaktu vytlačena, a nebo v případě dynamické aplikace nemusí být způsob aplikování zcela přesný, což znamená, že část maziva se aplikuje mimo kontaktní plochu, a tudíž bude ovlivněna hodnota adheze po celou dobu trvání experimentu, což znamená, že pravděpodobně dojde k dřívějšímu návratu adheze na hodnotu pro suché tření.

Vlivem drsnosti kontaktních těles se ve svých člancích [9, 15] zabývali Lundmark a Zhu. Lundmark [9] zjistil, že drsnost kontaktních těles má významný vliv na jejich opotřebením. Zhu [15] poté zjistil, že drsnost ovlivňuje průběh adheze, přičemž za suchého tření je rozdíl mezi hodnotami adheze při použití těles s vyšší a nižší drsností povrchů markantní.

Dalším parametrem může být také vliv environmentálních podmínek při experimentech, kterými jsou například okolní teplota a vlhkost, kterými se zabýval pouze Zhu [15], který zkoumal vliv teploty v komoře. Okolní podmínky ovšem nebudou v této práci uvažovány, proto nebudou podrobněji rozepisovány. Existuje několik hlavních parametrů, které jsou v průběhu studií zkoumány.

Ve všech studovaných člancích je zkoumán vývoj součinitele adheze v čase, v některých případech [12, 17] je to navíc i výdrž aplikovaných látek, popřípadě míra opotřebením kontaktních těles [13, 16]. Na základě těchto informací budou tyto parametry sledovány také v průběhu této práce.

3.3 Podstata a cíl diplomové práce

Cílem práce je sestavit metodiku pro hodnocení výkonnosti maziv pro temeno kolejnice (TOR maziv) v laboratorním prostředí. Metodika bude zaměřena na vývoj součinitele adheze v čase s využitím tribometru v konfiguraci kulička-disk.

Dílčí cíle diplomové práce:

- identifikovat důležité parametry experimentů zaměřených na testování maziv,
- provést experimenty, které objasní důležitost jednotlivých parametrů,
- sestavit metodiku pro hodnocení výkonnosti maziv v laboratorním prostředí,
- připravit podklady pro publikaci.

Typ diplomové práce: experimentálně vývojová

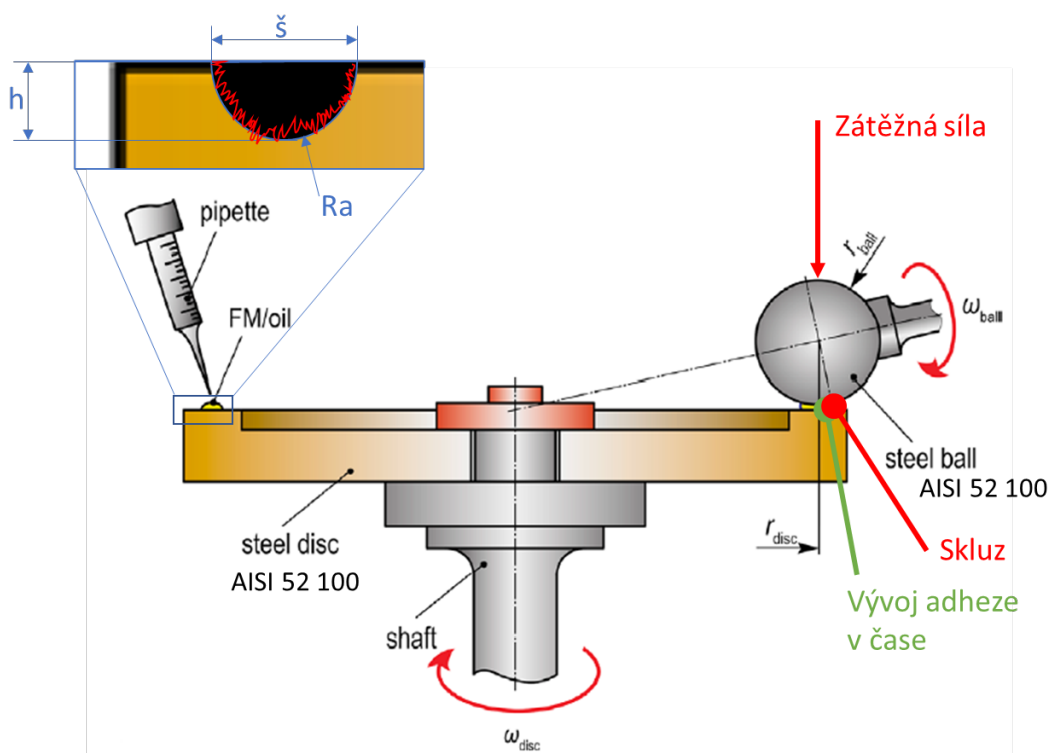
Požadavky kladené na navrženou metodiku:

- objasnit roli dlouhodobého a krátkodobého záběhu těles,
- pravidelná kontrola topografie a drsnosti těles,
- výběr vhodného způsobu aplikace maziv (způsob a množství),
- definice adhezních pásem (nízké, střední, vysoké),
- možnost provádět více experimentů na jedné kontaktní dvojici,
- zajištění dobré opakovatelnosti tvaru adhezních křivek.

4 MATERIÁL A METODY

Metodika testování TOR produktů se dle zadání vyvíjela na laboratorním zařízení Mini-traction-machine v konfiguraci kulička-disk. Materiálem těles byla ložisková ocel AISI 52 100 s tvrdostí 800–900 HV (kulička) a 720–780 HV (disk). Počáteční drsnost těles byla $R_a=0,012 \mu\text{m}$ (kulička) a $R_a=0,01 \mu\text{m}$ (disk).

Na základě analýzy rešerše jsou parametry experimentů rozděleny na pozorovatelné, proměnné a nastavitelné, viz. Obr. 4-1. Pozorovatelným parametrem (zelená) se rozumí vývoj součinitele adheze v čase. Jedním z dílčích cílů práce je definice adhezních pásem. Tato pásma byla rozdělena na základě zjištění z provedené rešerše a následně provedených experimentů, a to na pásmo nízké, střední a vysoké adheze, jak je vyobrazeno na Obr. 4-3. Tato pásma později sloužila jako kvalitativní hodnocení získaných křivek v průběhu experimentů. Do proměnných parametrů (modrá) se řadí geometrie a drsnost vzniklých drážek, což jsou parametry, které byly kontrolovány mezi jednotlivými experimenty. Mezi nastavitelné parametry (červená) se řadí parametry, které je před započítáním experimentu nutné definovat přímo na daném zařízení, a mezi které se řadí rychlost, skluz a zátěžná síla.



Obr. 4-1 Pozorovatelné, proměnné s nastavitelné parametry

V uvedených publikacích byly nejčastěji voleny kontaktní tlaky v rozmezí 0,7–1,2 GPa. Vzhledem k tomu, že TOR maziva se v České republice používají převážně pro tramvajovou dopravu, kde se jedná o lehčí vozidla, byl pro tuto práci zvolen kontaktní tlak 0,8 GPa. Na základě Hertzovy teorie byla pro tlak 0,8 GPa vypočítána odpovídající

zátěžná síla 18 N, která sloužila jako vstup do všech provedených parametrů. Při volbě rychlosti byla na základě nejpoužívanější hodnoty ve zmíněných studiích zvolena rychlost 1 m/s.

V případě uvažování aplikace viskóznějších maziv, které dosahují hodnot zdánlivé viskozity až 55 mm²/s a drsnosti kontaktních těles po záběhu Ra=0,25 μm, což je hodnota získaná ze studie [16], bylo zjištěno, že při těchto podmínkách se kontakt nachází v požadovaném mezním režimu mazání. Uvažované hodnoty skluzu pak byly 2 a 3 %, což jsou nejčastější hodnoty využívané ve zmiňovaných publikacích. Vliv rozdílu mezi těmito hodnotami byl zkoumán v průběhu této práce. Veškeré experimenty proběhly za pokojové teploty a vzdušné vlhkosti.

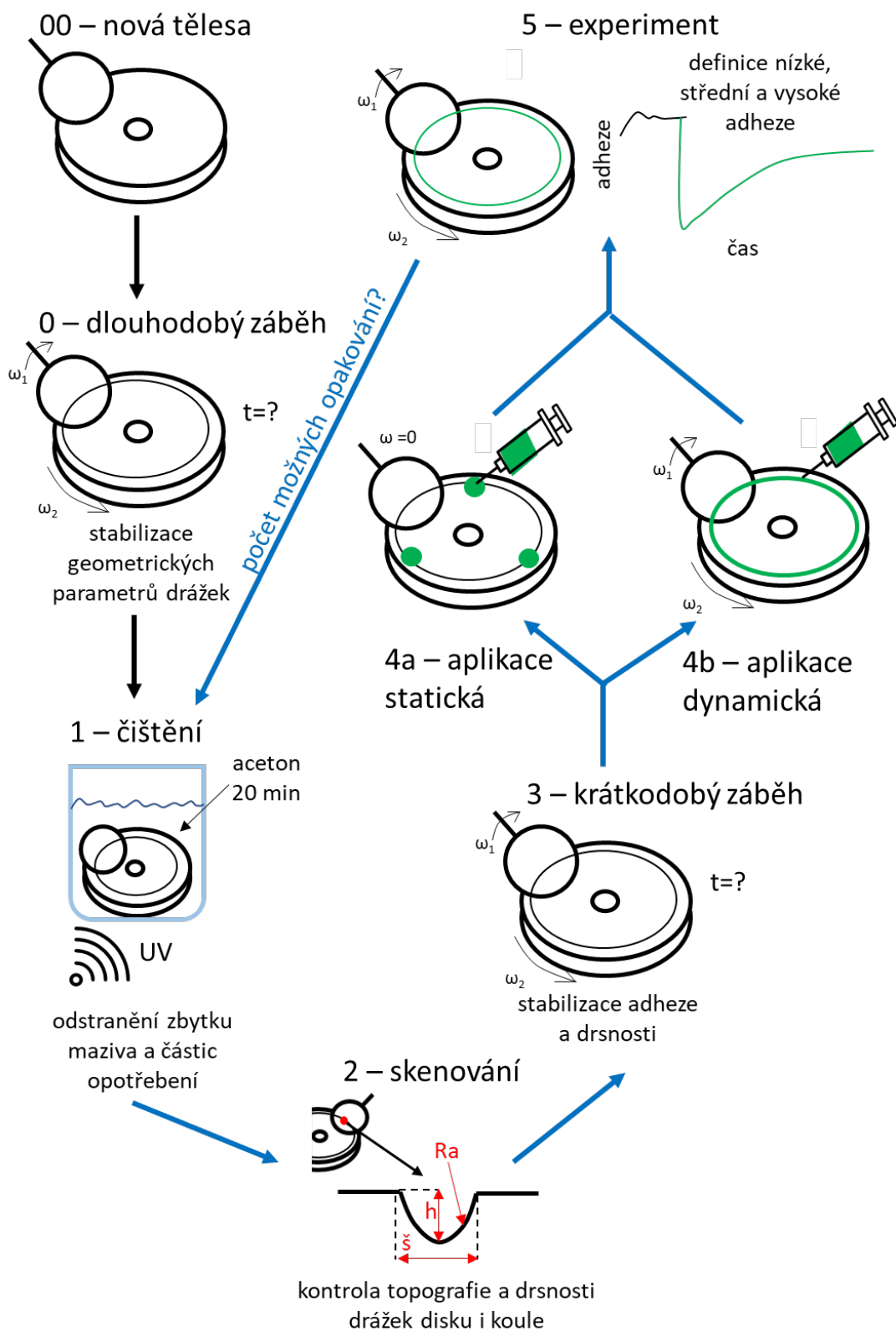
4.1 Vývoj metodiky

Na Obr. 4-2 je vyobrazen vývoj experimentů objasňující požadavky na metodiku, na jejichž základě byla navržena vhodná metodika testování. Tato metodika je dle Obr. 4-2 rozdělena do jednotlivých kroků:

- 00 – stav, kdy jsou kontaktní tělesa disk a koule zcela nová,
- 0 – dlouhodobý záběh těles, ve kterém bylo účelem zjistit dobu potřebnou pro zaběhnutí obou těles, ve které došlo ke stabilizaci geometrických parametrů drážek, tedy jejich šířky a hloubky a také drsnosti,
- 1 – kontaktní tělesa byla ponořena do acetonové lázně a pomocí ultrazvukových rázů byla po dobu 20 min při teplotě 40 °C čištěna, a to z důvodu odstranění částic opotřebení a případně i zbylého maziva,
- 2 – skenování topografie povrchů jak disku, tak koule, kde se zkoumal vývoj hloubky, šířky a drsnosti drážek,
- 3 – krátkodobý záběh, ve kterém bylo účelem zjistit dobu potřebnou pro stabilizaci jak adheze, tak drsnosti povrchů kontaktních těles,
- 4 – aplikace pomocí mikropipety, je rozdělen na dvě větve, které se liší způsobem aplikace maziva, a to staticky – 4a, což znamená, že rychlost těles $\omega=0$, nebo dynamicky – 4b, tedy $\omega\neq 0$. Dále byl zkoumán vliv aplikovaného množství maziva do kontaktu. V poslední řadě byl pak zkoumán rozdíl způsobu aplikace množství většího než 1 μl, tedy například rozdíl při aplikaci 4 μl jednorázově, a nebo 4x po 1 μl, resp. 2x po 2 μl,
- 5 – sledování vývoje adheze v čase, na základě něhož byla pro dané provozní parametry vydefinována tři pásma adheze, a to nízké, střední a vysoké.

Po tomto kroku se schéma vrací zpět do bodu 1 a experiment se opakuje. Součástí této práce je také objasnit a určit počet cyklů, kdy je možné experiment opakovat na jedné kontaktní dvojici, dokud nedojde k natolik velkému opotřebení, které by způsobilo ovlivnění průběhu

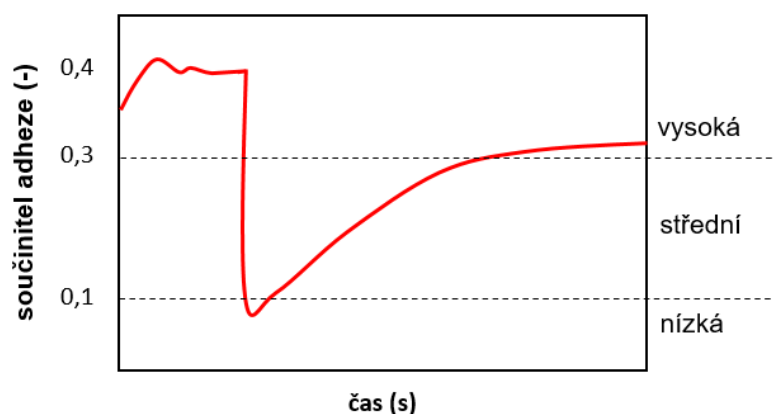
experimentu. Všechny konfigurace použitých provozních parametrů jsou vypsány v Tab. 4-1.



Obr. 4-2 Schéma popisující vývoj metodiky

Tab. 4-1 Výpis provozních parametrů jednotlivých experimentů

	Tlak (GPa)	Skluz (%)	Rychlost (m/s)	Aplikace (-)	Množství (μ l)	Kap.
Záběhy	0,8	2; 3	1	-	-	5.1
Vliv skluzu	0,8	2; 3	1	dynamická	1	5.2
Vliv aplikace	0,8	2	1	statická/dynamická	2	5.3.1
Vliv aplikace	0,8	2	1	různé dávkování	2; 4; 8	5.3.2
Vliv množství	0,8	2	1	dynamická	1; 2; 4; 8	5.4
Vývoj těles	0,8	2	1	dynamická	2; 4; 8	5.5
Bez metodiky	0,8	2	1	statická/dynamická	1; 3	5.6



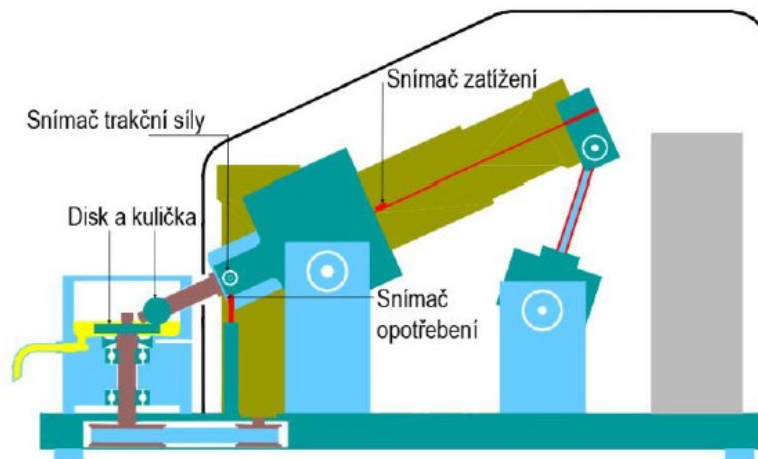
Obr. 4-3 Definice adhezních pásem

4.2 Použitá zařízení

4.2.1 Mini-traction-machine

Mini-traction-machine (MTM) je zařízení (viz. Obr. 4-4) od firmy PCS Instruments sloužící k měření třecích vlastností suchých nebo mazaných kontaktů při valivě-skluzovém pohybu. V této práci sloužil ke zkoumání vývoje adheze v čase v konfiguraci kulička-disk. Princip zařízení spočívá ve vytvoření bodového kontaktu mezi kuličkou a diskem, kde kulička je pomocí ramene přitlačována k disku. Obě tělesa jsou poháněna vlastním servomotorem, aby bylo možné nastavit rozdílnou rychlost a tím vyvolat skluz. Na zařízení je pomocí ramene s kuličkou měřena třecí síla, ze které se spolu se zatěžující silou automaticky dopočítá součinitel tření. Rozsahy parametrů testování jsou vypsány v Tab. 4-2.

Z tohoto zařízení byla získávána data vývoje adheze v čase, a to v textovém souboru, která byla následně zpracována a vyhodnocena pomocí programů Matlab a Microsoft Excel a ve kterých se hodnotila hodnota adheze suchého kontaktu, hodnota minimální adheze dosažené po aplikaci maziva a doba nárůstu adheze na předem stanovenou hodnotu.



Obr. 4-4 Schéma zařízení mini traction machine [20]

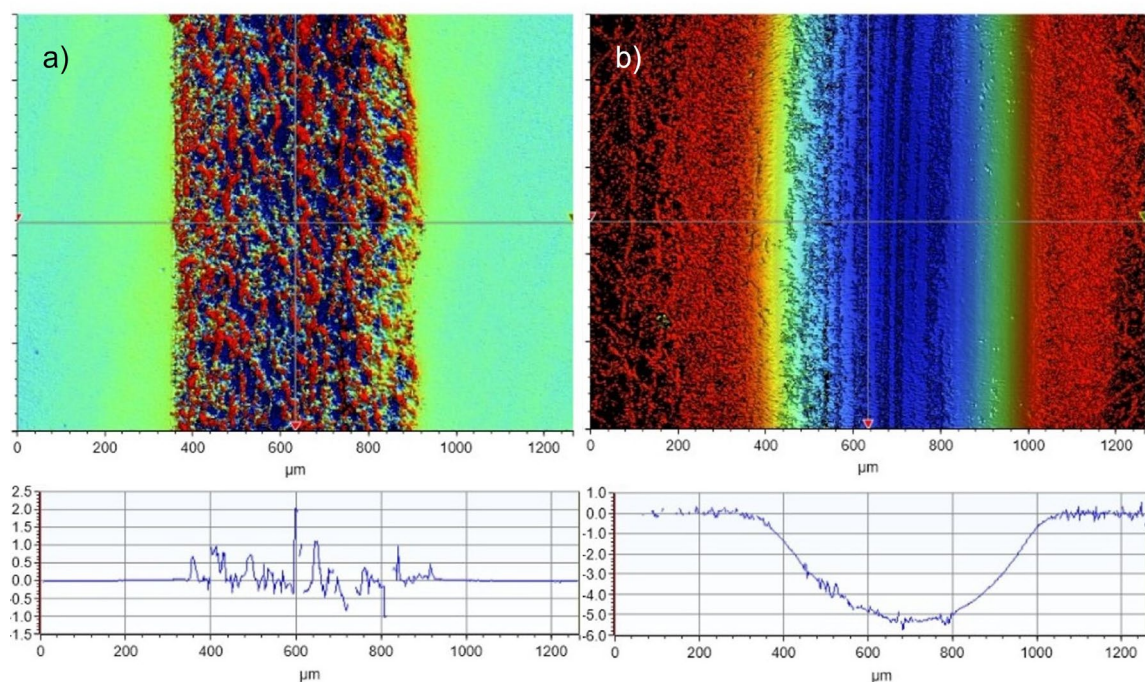
Tab. 4-2 Provozní parametry zařízení [21]

průměr kuličky (mm)	19,05
průměr disku (mm)	46
zatížení (N)	0 – 75
kontaktní tlak (GPa)	0 – 1,25
rychlost (m/s)	-4 – 4
skluz (%)	0 – 200

4.2.2 Optický profilometr

Optický profilometr Bruker Contour GT-X slouží k bezkontaktnímu měření topografie povrchů a k následnému vyhodnocování drsností pomocí několika metod. Vertical scanning interferometry (VSI) je metoda, která je vhodná pro drsné povrchy. Skenovací hlava se posouvá vůči zkoumanému tělesu v několika krocích a pomocí děliče svazku světla a referenčního zrcátka vzniká interference světla. Po skončení skenování se pomocí softwarů vyhodnotí všechny vzniklé snímky a s tím i topografie povrchu. Druhá metoda je Phase shifting interferometry (PSI), která je využívána pro skenování hladkých povrchů [22].

Data získaná z 3D optického profilometru byla zpracována pomocí programu Vision64, viz. Obr. 4-5. Celkem byla zkoumána 4 místa na disku a 2 na kuličce, ze kterých se získávala data o aktuálním stavu šířky, hloubky a drsnosti vzniklých drážek.



Obr. 4-5 Vyhodnocení drážky; a) disku, b) koule

4.3 Použitá TOR maziva

Výběr produktů pro testování vychází jak z provedené rešerše vědeckých článků, tak z marketingové studie, která se zabývá mazivy pro kolejovou dopravu v Evropě. Ve většině vědeckých článků se využíval MT na vodní bázi. Testované látky byly vybrány vedoucím práce, přičemž se jedná o jeden MT a dvě TOR maziva. Vlastnosti všech použitých TOR produktů jsou blíže popsány v Tab. 4-3.

Tab. 4-3 Parametry použitých TOR produktů

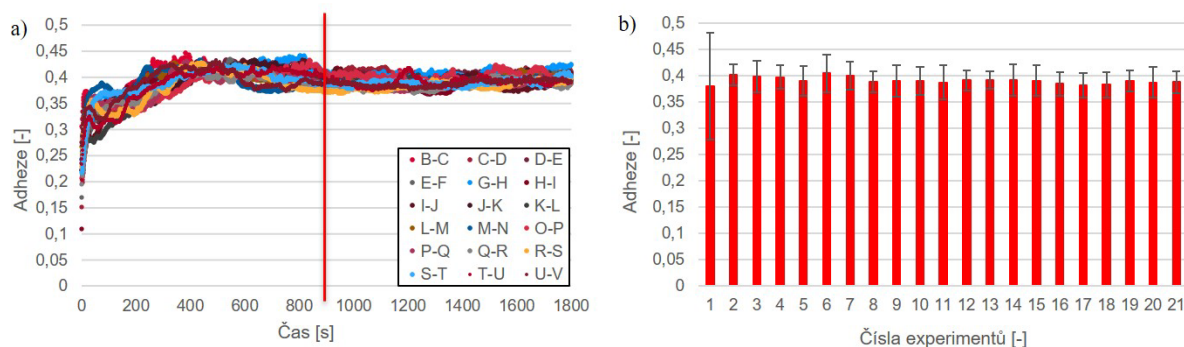
Produkt	NLGI	Základová báze	Viskozita zákl. oleje při 40 °C	Typ zahušťovadla	Využití produktu k redukci	Délka roznesení
MT	–	voda	–	–	tření	–
TOR mazivo A	0	ester	41–53 mm ² /s	organický	hluk, opotřebení, tření	100–200 m
TOR mazivo B	00	ester	46 mm ² /s	křemičitan	hluk, pitting	–

5 VÝSLEDKY

5.1 Dlouhodobý a krátkodobý záběh

Pro zjištění doby potřebné pro dlouhodobý i krátkodobý záběh kontaktních těles byly provedeny dvě série experimentů, které se lišily pouze hodnotou skluzu (2 %, resp. 3 %) a délkou jednoho experimentu (30 min, resp. 20 min), zároveň bylo cílem těchto experimentů zjistit hodnotu adheze za suchého tření pro obě hodnoty skluzu.

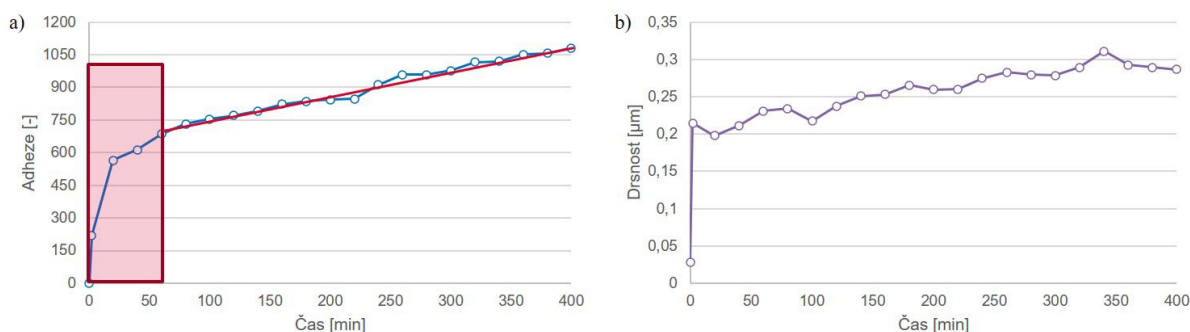
Při porovnání průběhů experimentů v sérii se skluzem 2 % je jasně patrná opakovatelnost vývoje adheze, jak lze vidět na Obr. 5-1 a). Z grafu je patrné, že na počátku každého experimentu se adheze vyvíjela velmi nestabilně, ovšem v čase ± 900 s docházelo k jejímu ustálení. Na základě těchto poznatků byl stanoven čas potřebný pro krátkodobý záběh kontaktních těles 900 s. Pro zjištění hodnoty adheze za suchého tření byla statisticky zpracována data vyobrazená na Obr. 5-1 b), přičemž na základě těchto dat byla zjištěna hodnota 0,39 se směrodatnou odchylkou $\pm 0,027$.



Obr. 5-1 Suchý kontakt pro skluz 2 %; a) průběh experimentů, b) hodnoty adheze

Pro stanovení doby potřebné pro dlouhodobý záběh byl vyhodnocen vývoj drážek kontaktních těles, konkrétně se zkoumal vývoj geometrických parametrů těchto drážek. Na Obr. 5-2 a) je vyobrazen vývoj kombinované šířky drážky, tedy průměrné hodnoty šířky drážky disku a koule. Z tohoto vývoje je patrné, že v čase 0–60 min (vyznačeno červeným obdélníkem) dochází k významným změnám šířky drážek, tudíž není vhodné v této oblasti testovat TOR produkty. V čase 60 min však dochází ke stabilizaci vývoje šířky drážek, který se od této doby chová lineárně. Z tohoto důvodu byl čas 60 min stanoven jako čas potřebný pro počáteční dlouhodobý záběh nových kontaktních těles. Na Obr. 5-2 b) je pak vyobrazen vývoj kombinované drsnosti kontaktních těles. Z grafu je patrné, že dochází ke zvyšování drsnosti povrchů vlivem jejich vzájemného kontaktu za suchých podmínek, tedy bez použití maziva. Vzhledem k tomu, že kulička je tvrdší než disk, docházelo u disku k výrazně vyššímu nárůstu drsnosti oproti kuličce. Vývoj hloubky drážek byl další zkoumaný parametr,

který se ovšem nejevil jako důležitý, jelikož maximální dosažená hloubka byla pouhých 9 μm .



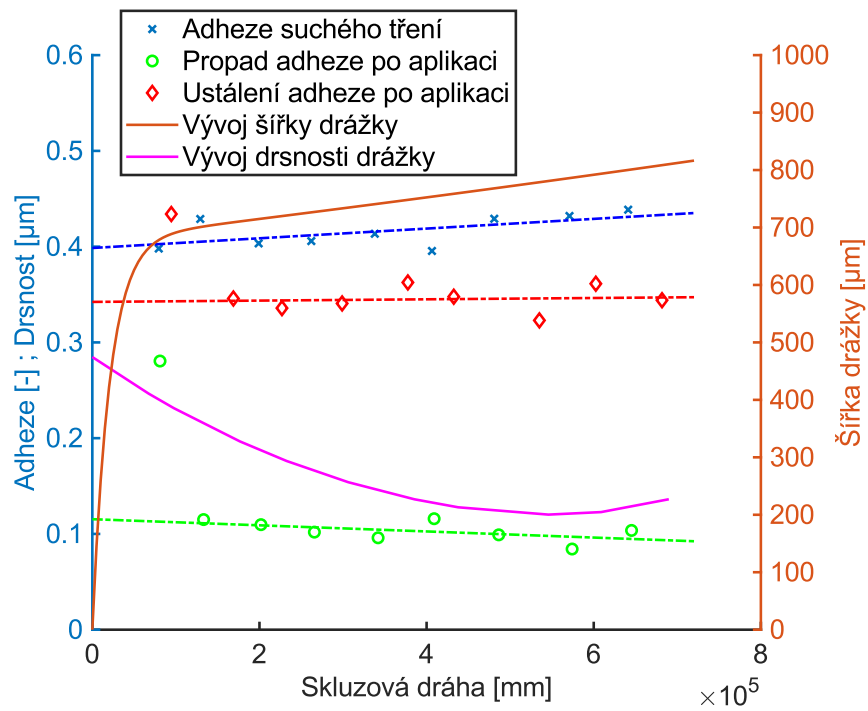
Obr. 5-2 Vývoj kontaktních těles; a) šířka, b) drsnost

Pro skluz 3 % byla všechna data vyhodnocena a zanalyzována stejným způsobem jako pro skluz 2 %. Z výsledků poté vyplynulo, že doba potřebná pro krátkodobý záběh je 800 s, doba potřebná pro dlouhodobý je 60 min a hodnota adheze suchého tření je 0,49 se směrodatnou odchylkou 0,041.

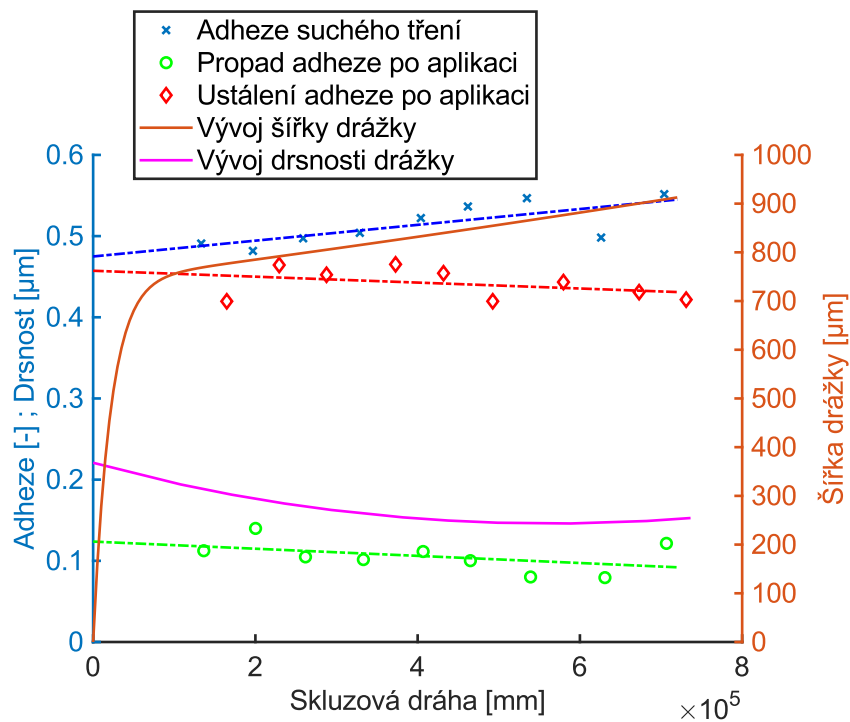
5.2 Vliv skluzu

Pro zjištění vlivu skluzu na průběh experimentů byly provedeny dvě série, jejichž provozní parametry se lišily v hodnotě skluzu, tedy 2 %, resp. 3 %. Celkem bylo pro každou sérii provedeno 9 experimentů, aby bylo co nejlépe možné zkoumat jejich opakovatelnost.

Průběh experimentu pro 2 % skluzu je vyobrazen na Obr. 5-3, pro 3 % skluzu pak na Obr. 5-4. Tyto grafy reprezentují vývoj jednotlivých fází experimentu v závislosti na skluzové vzdálenosti. Modré body označují hodnotu adheze suchého tření po provedeném krátkodobém záběhu, tedy těsně před aplikací maziva, která byla stanovena jako průměr 10 hodnot, zelené body poté označují nejnížší hodnotu adheze, které je dosaženo ihned po aplikaci maziva, přičemž i tato hodnota byla stanovena jako průměr 10 hodnot. Červené body poté označují hodnotu adheze, na které se experiment ustálil. Tato hodnota byla určena jako průměr celého úseku od ustálení adheze po konec celého experimentu. Oranžová křivka pak reprezentuje vývoj kombinované šířky drážky kontaktních těles a růžová křivka vyobrazuje vývoj kombinované drsnosti. Nulový bod potom v tomto případě označuje drsnost po dlouhodobém záběhu.



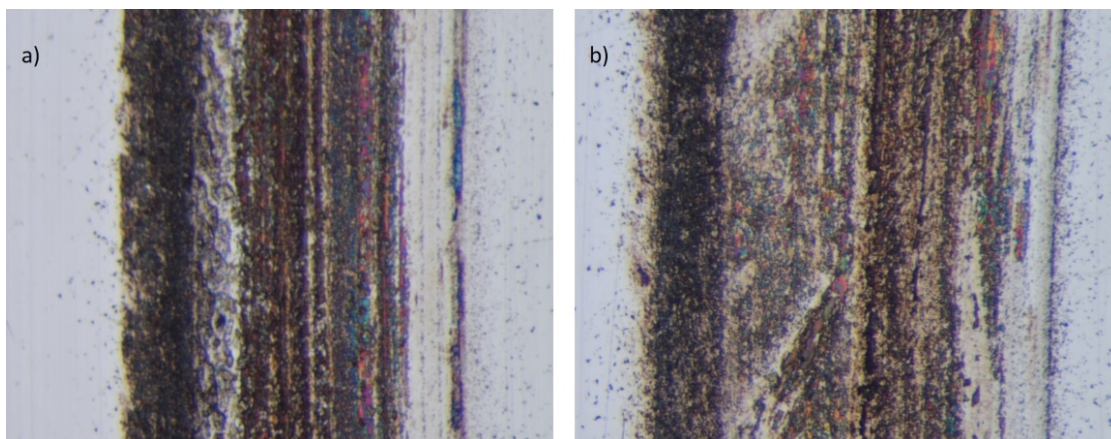
Obr. 5-3 Průběh experimentu pro skluz 2 %



Obr. 5-4 Průběh experimentu pro skluz 3 %

Při prvním experimentu na Obr. 5-3 došlo k extrémním výchyilkám hodnot po aplikaci maziva oproti ostatním experimentům, což bylo zapříčiněno nedostatečnou aplikací, respektive neaplikoval se celý 1 μl . Z grafů lze vyčíst, že s postupujícím experimentem klesá drsnost těles. Pro oba skluzy dochází k poklesu hodnoty adheze ihned po aplikaci maziva

(zelené hodnoty) s rozšiřující se drážkou. V případě ustálení adheze po aplikaci maziva (červené hodnoty) lze vidět, že pro skluz 3 % vykazuje křivka proložená jednotlivými body klesající trend, oproti tomu při 2 % skluzu je křivka prakticky konstantní. Rychlost nárůstu adheze z minimální hodnoty na hodnotu 0,3 při experimentech se stejnou velikostí kombinované šířky drážky je při skluzu 2 % rovna 365 s, při 3 % skluzu pak 170 s. Z porovnání obou grafů je patrné, že při skluzu 2 % dochází k pomalejšímu rozvoji šířky drážky. Na Obr. 5-5 pak lze pozorovat jejich rozdíl po dokončení pátého experimentu. Pro všechny uvedené důvody byl pro všechny další experimenty vždy nastaven skluz 2 %.



Obr. 5-5 Drážka disků po 5. experimentu; a) skluz 2 %, b) skluz 3 %

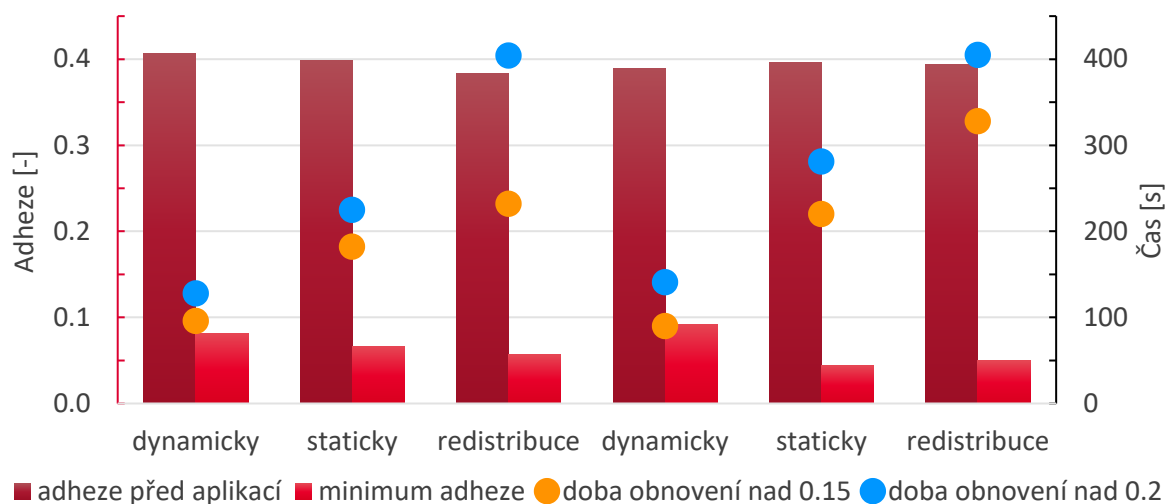
5.3 Vliv aplikace

5.3.1 Porovnání statické a dynamické aplikace

Pro výběr vhodného způsobu aplikace maziva do kontaktu byly realizovány dvě série experimentů již zmíněné v kap. 5.4 a vyobrazené na Obr. 5-12 a Obr. 5-13. V obou sériích bylo mazivo do kontaktu aplikováno třemi způsoby, a to dynamicky, tedy aplikace maziva proběhla za chodu obou těles, staticky, což znamená, že mazivo bylo aplikováno ve chvíli, kdy obě tělesa stála a staticky s roznesením, což znamená, že po statické aplikaci bylo zařízení spuštěno na 20 s, ve kterých se tělesa po sobě odvalovala s nulovým skluzem a teprve poté byl spuštěn samotný experiment.

Na Obr. 5-6 lze vidět srovnání tří způsobů aplikace pro experimenty s 2 μ l maziva, kde mezi sledovanými parametry byla maximální hodnota adheze suchého kontaktu, minimální hodnota ihned po aplikaci a doba obnovy nad předem zvolenou adhezi. Nulová hodnota na časové ose představuje moment aplikace maziva do kontaktu. Při dynamické aplikaci dochází k nejrychlejšímu nárůstu adheze z minimální hodnoty po aplikaci na předem stanovené hodnoty, a to konkrétně pro první dynamickou aplikaci z hodnoty 0,085 na 0,15 za 96 s a na 0,2 za 128 s. Při porovnání statické aplikace se statickou aplikací

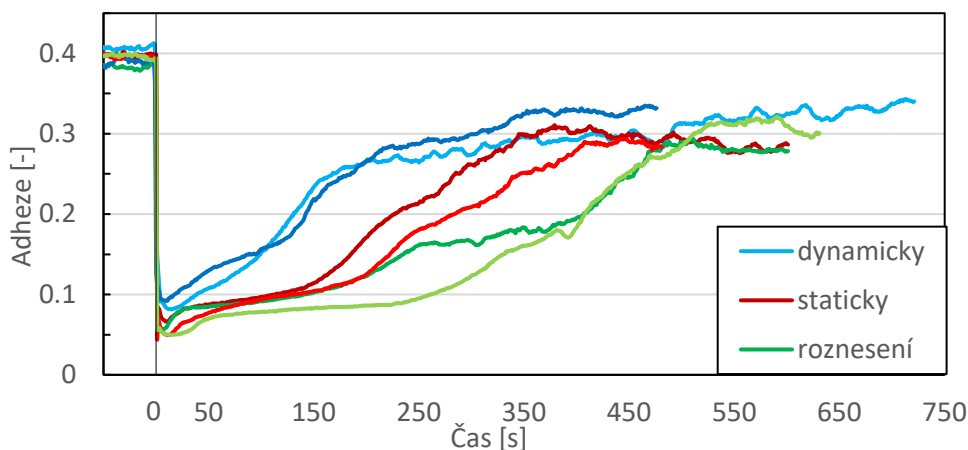
včetně roznesení je patrné, že při realizaci roznesení dochází k rapidnímu prodloužení doby obnovy adheze, přesněji při statické aplikaci se adheze obnoví na hodnotu 0,2 za 225 s a při realizaci roznesení až za 404 s, což značí fakt, že při samotné statické aplikaci byla velká část maziva vlivem skluzu vytlačena z kontaktu ven, a nezasahovala tak do průběhu experimentu. Obě hodnoty jsou podstatně vyšší než pro aplikaci dynamickou, při které je dosaženo lepšího vtáhnutí celého množství maziva přímo do kontaktu.



Obr. 5-6 Vliv způsobu aplikace pro 2 µl maziva

Na Obr. 5-7 jsou vyobrazeny průběhy experimentů všech tří typů aplikace maziva do kontaktu, ze kterých jsou patrné rozdíly mezi jednotlivými aplikacemi. Trendově jsou všechny průběhy velmi podobné, jediná razantní odlišnost se týká doby nárůstu adheze do bodu ustálení, jak již bylo popsáno výše.

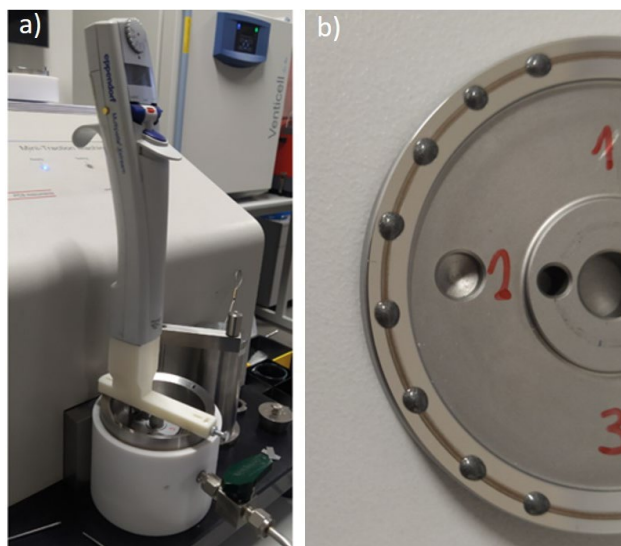
Při experimentech provedených s aplikací 1 µl maziva byly výsledky všech testů trendově stejné jako pro 2 µl co do rozdílů mezi jednotlivými způsoby aplikace. Na základě všech zjištění z provedených měření tohoto typu byl vyvozen závěr, který říká, že nejvhodnějším způsobem aplikace je aplikace dynamická.



Obr. 5-7 Srovnání průběhů experimentů pro různé způsoby aplikace

5.3.2 Zpřesnění opakovatelnosti dynamické aplikace maziva do kontaktu

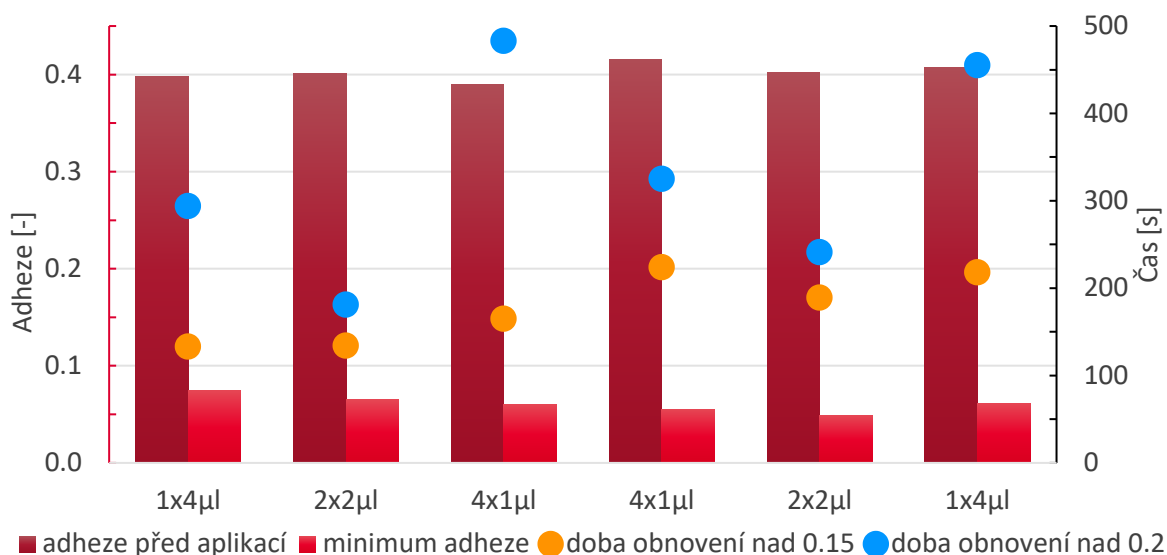
Na základě experimentů popsaných v kap. 5.3.1 byla nevhodnějším způsobem aplikace maziva do kontaktu zvolena aplikace dynamická. Vzhledem k tomu, že při ní bylo mazivo aplikováno do kontaktu ručně pomocí mikropipety, a to za běhu těles, mohlo docházet k ovlivnění přesnosti aplikace maziva do drážky, což byla chyba, kterou bylo potřeba omezit, a zajistit tak přesnost a opakovatelnost aplikace přímo do drážky. K těmto účelům byl navržen a vyroben přípravek, který byl vždy před samotnou aplikací upnut na okraj vany MTM, a do něhož se následně vsunula dávkovací pipeta, viz. Obr. 5-8 a), čímž bylo zajištěno, že pipeta byla vždy ve stejné pozici vůči poloze drážky na disku. Tím bylo zaručeno, že bylo mazivo vždy aplikováno na střed drážky, jak je vyobrazeno na Obr. 5-8 b). Na obrázku je pro názornost aplikováno několik kapek po obvodu disku, čehož bylo dosaženo ručním pootočením disku o náhodnou vzdálenost.



Obr. 5-8 Aplikace maziva pomocí přípravku; a) uchycení pipety do přípravku, b) přesnost aplikace do drážky

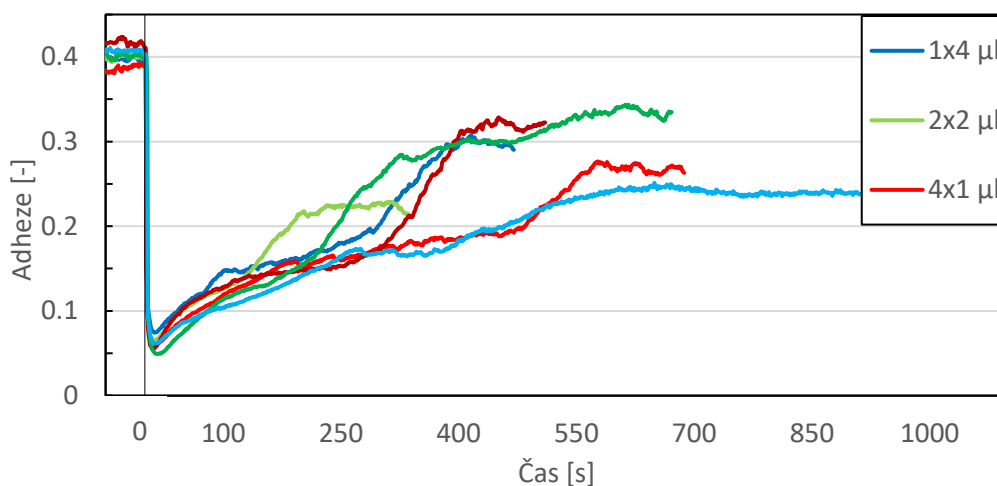
5.3.3 Vliv dávkování maziva do kontaktu

Cílem těchto experimentů bylo zjistit nejideálnější způsob dávkování maziva do kontaktu. Tyto experimenty byly provedeny celkem pro tři různá množství, tedy 2, 4 a 8 μl . Při aplikaci 2 μl bylo mazivo aplikováno dvěma způsoby, a to 1x2 μl a 2x1 μl , pro 4 μl pak 1x4 μl , 2x2 μl a 4x1 μl a nakonec pro 8 μl v kombinacích 2x4 μl a 4x2 μl a byl zkoumán vliv rozdílných způsobů dávkování na průběh a vývoj experimentů.



Obr. 5-9 Vliv dávkování do kontaktu pro 4 μl maziva

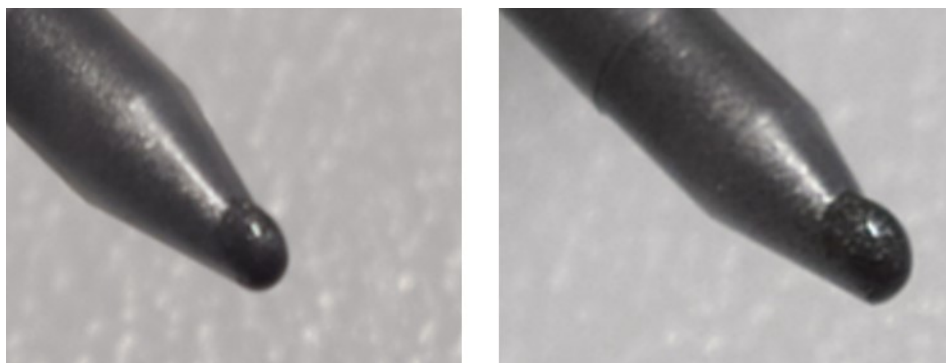
Z Obr. 5-9 jsou patrné rozdíly mezi jednotlivými způsoby dávkování 4 μl maziva do kontaktu, a to především v době obnovy hodnoty adheze nad předem určené hodnoty. Nejrychlejšího nárůstu od bodu aplikace po hodnotu adheze 0,2 dosahuje varianta aplikace 2x2 μl, za ni se řadí aplikace 1x4 μl a nejdelší doby obnovy pak dosahuje kombinace 4x1 μl. Při porovnání minimální adheze po aplikaci je patrné, že při postupném dávkování maziva do kontaktu bylo dosaženo nižší hodnoty než při plné dávce naráz, tedy při první aplikaci 1x4 μl klesla na 0,074 a při aplikaci 4x1 μl až na 0,06.



Obr. 5-10 Srovnání průběhů experimentů pro různá dávkování maziva do kontaktu

Na Obr. 5-10 jsou vyobrazeny průběhy experimentů pro všechny kombinace dávkování maziva popsané výše, ze kterých je patrné, že trend vývoje adheze v čase je pro všechny experimenty prakticky stejný. Na základě těchto vývojů tedy nelze jednoznačně určit, která kombinace je pro experimenty nejvhodnější. Jelikož ale při aplikování celých 4 μl v některých případech (nejsou zahrnuty do grafu) docházelo k neúplné aplikaci, což

znamená, že část maziva ulpívala na špičce dávkovací pipety, viz. Obr. 5-11, a do kontaktu se tak nedostalo celé požadované množství, což má za následek odlišný vývoj experimentu, bylo jako nejvhodnější dávkování zvoleno dávkování 2x2 μl , které nejen omezilo výskyt ulpěného maziva na pipetě, ale také má nejkratší průběh experimentu, což je vzhledem k charakteristice použitého zařízení vhodné, jelikož po příliš dlouho trvajícím experimentu se vytváří na povrchu drážky souvislá vrstva, která tento experiment ovlivňuje, a tedy další průběh již není zcela ovlivněn použitým mazivem.



Obr. 5-11 Ulpěné mazivo na pipetě

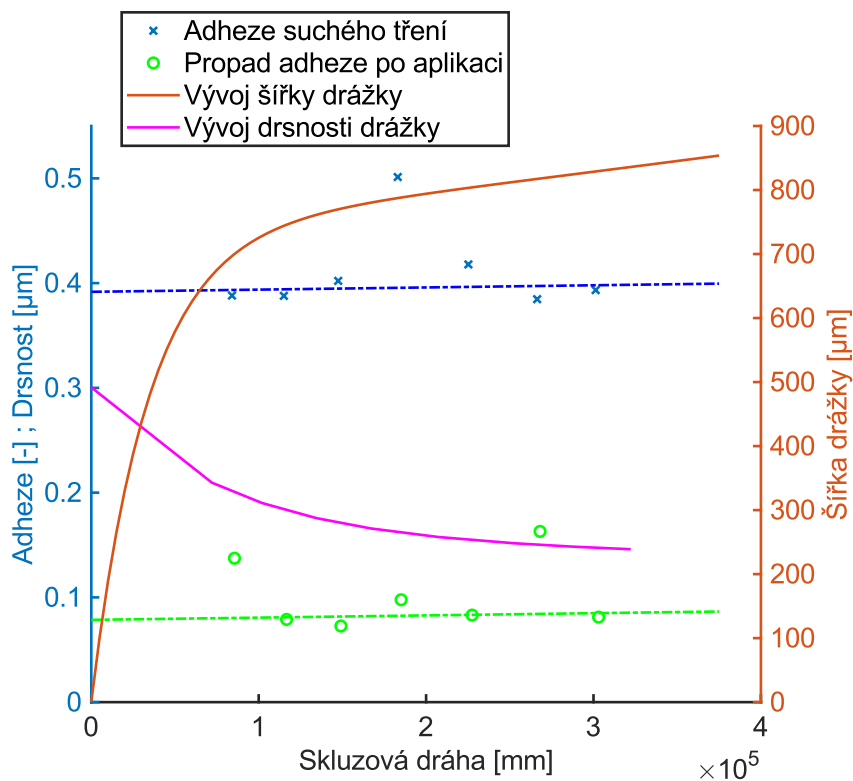
Při experimentech s aplikací 2 μl byly výsledné průběhy obou kombinací trendově stejné po celou dobu trvání experimentu, a tedy ani v tomto případě na základě provedených experimentů nelze jednoznačně říct, která kombinace je pro testování vhodnější, proto z důvodu zjednodušení aplikace byl pro další experimenty zvolen způsob 1x2 μl . Při aplikaci 8 μl došlo pro obě kombinace k přemazání kontaktu, a tudíž tyto výsledky nebyly validní pro žádnou kombinaci aplikace, a tedy nebylo rozhodnuto o vhodnějším způsobu dávkování.

5.4 Vliv aplikovaného množství

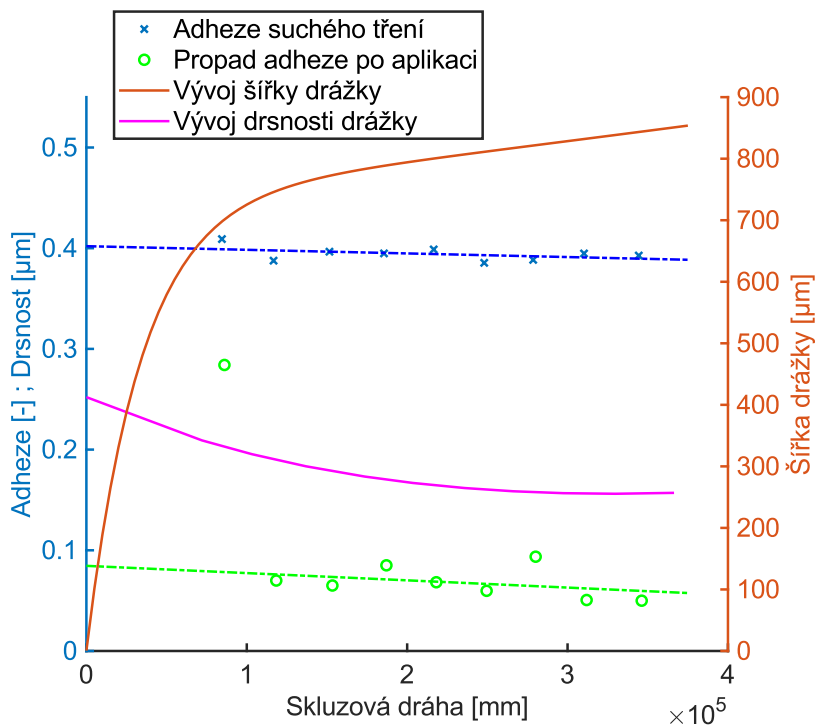
Experimenty, jejichž cílem bylo objasnit vliv aplikovaného množství do kontaktu, proběhly v několika sériích, přičemž první dvě se od sebe lišily pouze aplikovaným množstvím maziva, tedy v první sérii se aplikoval 1 μl a experiment se opakoval 7x, jak lze vidět na Obr. 5-12, ve druhé pak 2 μl s opakováním 9x, viz. Obr. 5-13.

Při porovnání obou sérií je vidět, že vývoj šířky drážky je v obou případech stejný, což značí, že tento vývoj není ovlivněn množstvím maziva nacházejícím se v kontaktu. Hodnoty nejnižší adheze po aplikaci maziva vykazují při aplikaci 2 μl stabilnější vývoj, který vykazuje mírně klesající průběh, zároveň pak minimální dosažená adheze ihned po aplikaci maziva je nižší než pro 1 μl . To je pravděpodobně zapříčiněno přítomností většího množství maziva s rostoucí šířkou drážky v kontaktu. Hodnoty, které se extrémně vychylují z trendu jsou způsobeny chybovou aplikací maziva, tedy neaplikováním celého požadovaného množství, což platí i pro experimenty s 1 μl . V globálním pohledu se v těchto dvou sériích

nenacházely žádné zásadní rozdíly v průběhu experimentů, dalo by se tedy říci, že obě množství jsou vhodná pro testování tohoto maziva.

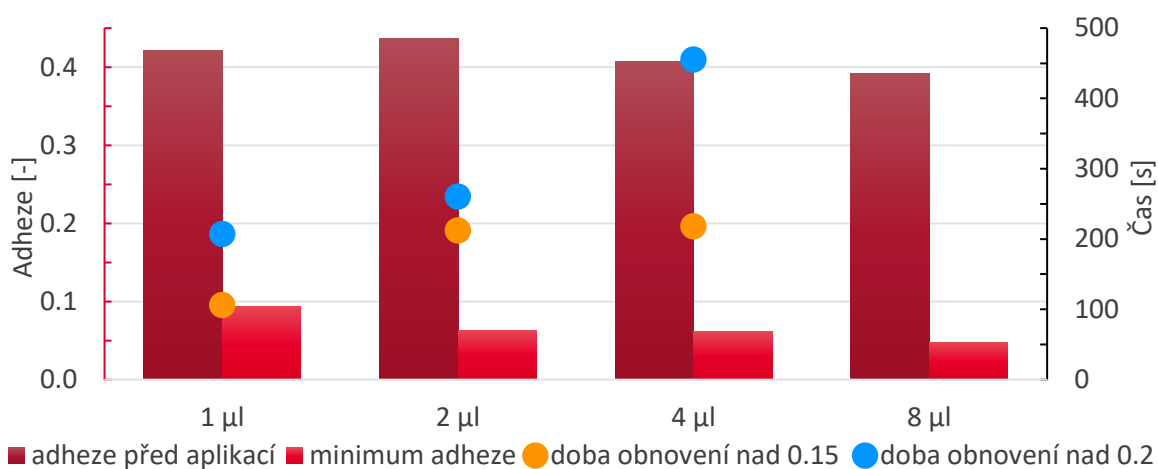


Obr. 5-12 Průběh experimentu pro 1 µl



Obr. 5-13 Průběh experimentu pro 2 µl

V dalších experimentech popisujících vliv aplikovaného množství byly provedeny celkem dvě série testů, kde v jedné sérii se na týž kontaktních tělesech střídala množství 1 a 2 μl a ve druhé pak 4 a 8 μl . Všechny tyto parametry jsou vyobrazeny pro jednotlivá množství na Obr. 5-14.

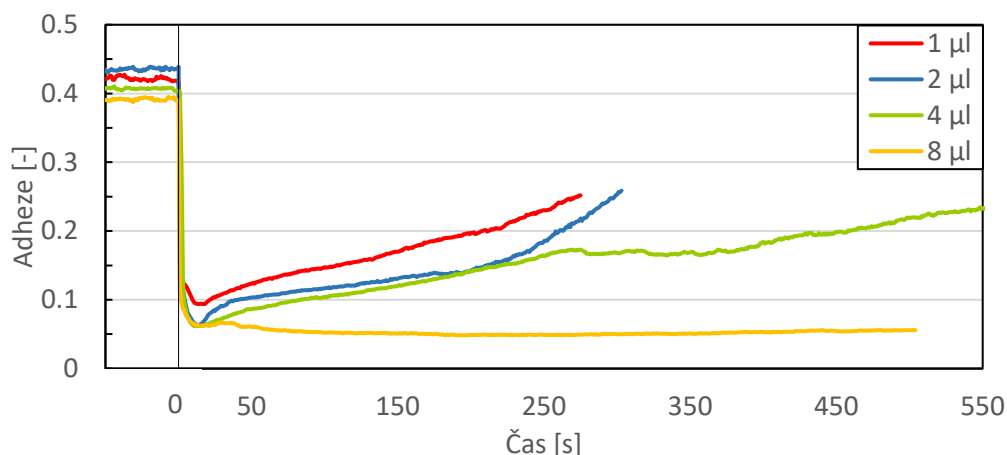


Obr. 5-14 Vliv aplikovaného množství pro 1, 2, 4 a 8 μl

Při porovnání 1, 2 a 4 μl lze vidět, že u dob obnovy nad stanovené hodnoty je patrný nárůst mezi jednotlivými množstvími, což koresponduje také s minimální hodnotou adheze bezprostředně po aplikaci maziva, která s navyšujícím se množstvím klesá. Tyto dva parametry značí, že při vyšším aplikovaném množství se do kontaktu dostává více maziva, tudíž adheze klesne na nižší hodnotu, a zároveň tak její obnova trvá delší dobu. U experimentu s 8 μl maziva se obě průměrné hodnoty adheze rovnají té minimální, a to z důvodu, že při takto vysokém množství již dochází k přemazání kontaktu, což znamená, že se adheze po celou dobu drží na velmi nízké, až kritické, hodnotě. Zároveň lze vidět, že na Obr. 5-14 chybí informace o době obnovy adheze nad určitou hodnotu, a to z důvodu, že adheze požadované hodnoty v průběhu celého experimentu nedosáhla.

Při porovnání průběhů experimentů, které jsou vyobrazeny na Obr. 5-15, lze názorněji pozorovat rozdíly mezi sledovanými parametry popsány výše, tedy například narůstající doba obnovy adheze se zvyšujícím se aplikovaným množstvím maziva do kontaktu. U aplikace 8 μl maziva je pak patrné totální přemazání kontaktu, což dokazuje žlutá křivka, která se po celou dobu experimentu drží na hodnotě adheze 0,05.

Hlavním závěrem těchto experimentů je, že jakékoli aplikované množství maziva do výše 4 μl včetně, je pro tento typ experimentů vhodné, jelikož trendově jsou jejich průběhy podobné, ovšem při aplikaci 8 μl nastává kritické přemazání a zcela jiný trend ve vývoji adheze v čase.



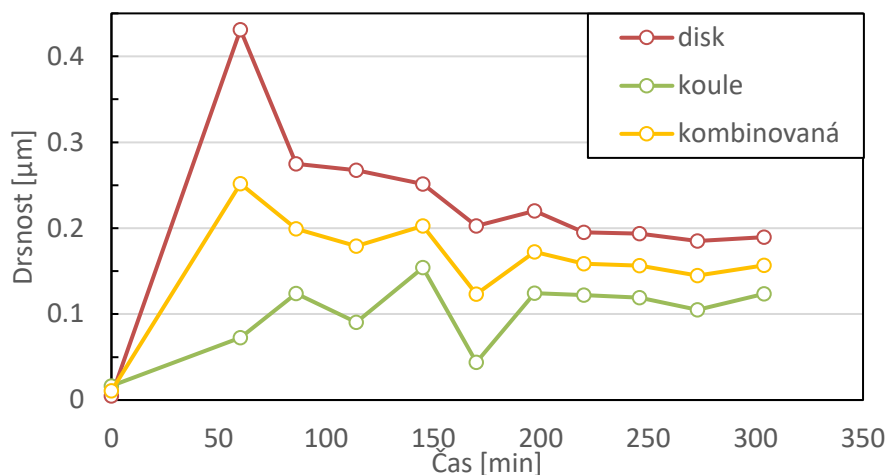
Obr. 5-15 Srovnání průběhů experimentů pro 1, 2, 4 a 8 µl

5.5 Vývoj geometrie a drsnosti kontaktních těles v čase

5.5.1 Vývoj drsnosti kontaktních těles v čase

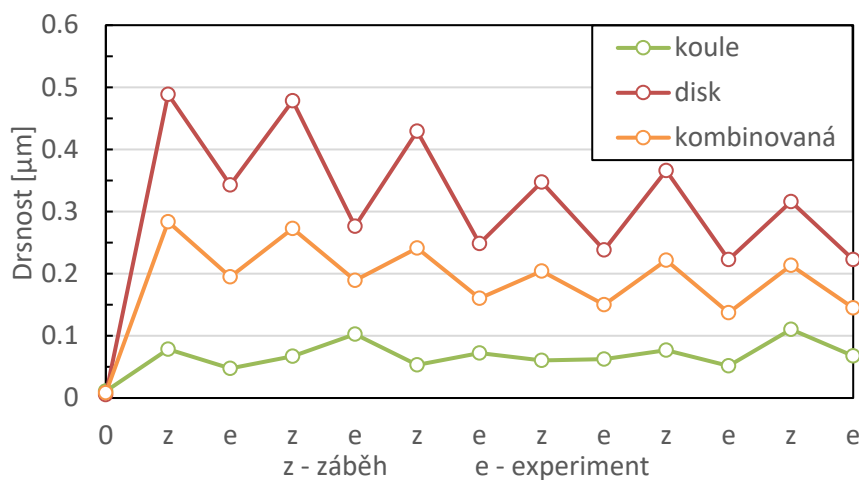
Při každém experimentu byl, jak již bylo řečeno v kap. 5.4, kontrolován vývoj vzniklé drážky na obou kontaktních tělesech mezi jednotlivými měřeními, a to zejména vývoj šířky, hloubky a drsnosti. Při záznamu vývoje drsnosti u experimentu popsaného na začátku kap. 5.4 bylo zjištěno, že při každém experimentu drsnost drážky u disku klesá, jak lze vidět na Obr. 5-16, jelikož po prvotním dlouhodobém záběhu byla drsnost drážky disku 0,43 µm a po devíti experimentech 0,19 µm.

Pro alespoň částečnou regulaci drsnosti byl mezi každý experiment zařazen tzv. mezi-záběh, což byl 20 min dlouhý úsek, kdy mezi tělesy byl pouze suchý kontakt, a který tak měl za úkol obnovit drsnost drážky disku na její původní hodnotu, tedy na hodnotu po prvotním dlouhodobém záběhu, a zároveň stabilizovat povrch drážky a odstranit tak vzniklé vyhlazené oblasti. Experimenty, u kterých byl tento mezi-záběh proveden, jsou již zmíněny v kap. 5.3.3 a jejichž vývoj drsností je vyobrazen pro 2 µl na Obr. 5-17 a pro 4 a 8 µl pak na Obr. 5-18. V obou grafech se nacházejí body pojmenované z–mezi-záběh a e–experiment, což jsou hodnoty, které byly zaznamenány vždy po provedeném typu testu.



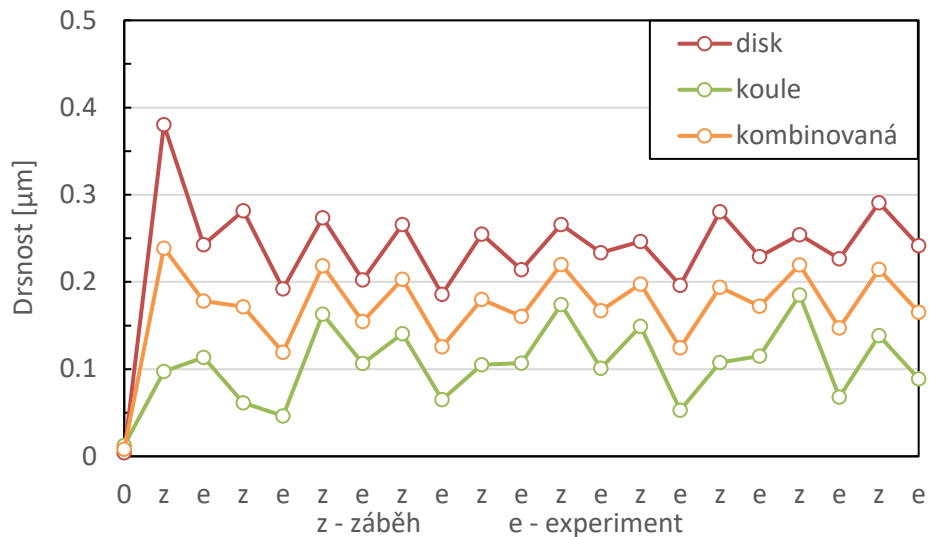
Obr. 5-16 Vývoj drsnosti v čase

Z Obr. 5-17 je patrné, že při suchém kontaktu dochází u disku ke zvyšování drsnosti, avšak nikoli na původní hodnotu, které bylo dosaženo při prvotním dlouhodobém záběhu, jelikož tato hodnota byla v tomto případě 0,49 μm a po posledním mezi-záběhu pouhých 0,32 μm. Při jiném experimentu se stejnými provozními parametry byl v jednom bodě mezi-záběh proveden dvakrát po sobě, jeho celková délka mezi experimenty byla tedy 40 min, přičemž drsnost byla kontrolována jak po prvním, tak po druhém mezi-záběhu, ovšem hodnoty drsností byly pro oba případy prakticky stejné, z čehož vyplývá, že prodloužení doby tohoto mezi-záběhu nevede k žádnému zlepšení.



Obr. 5-17 Vývoj drsnosti pro 2 μl

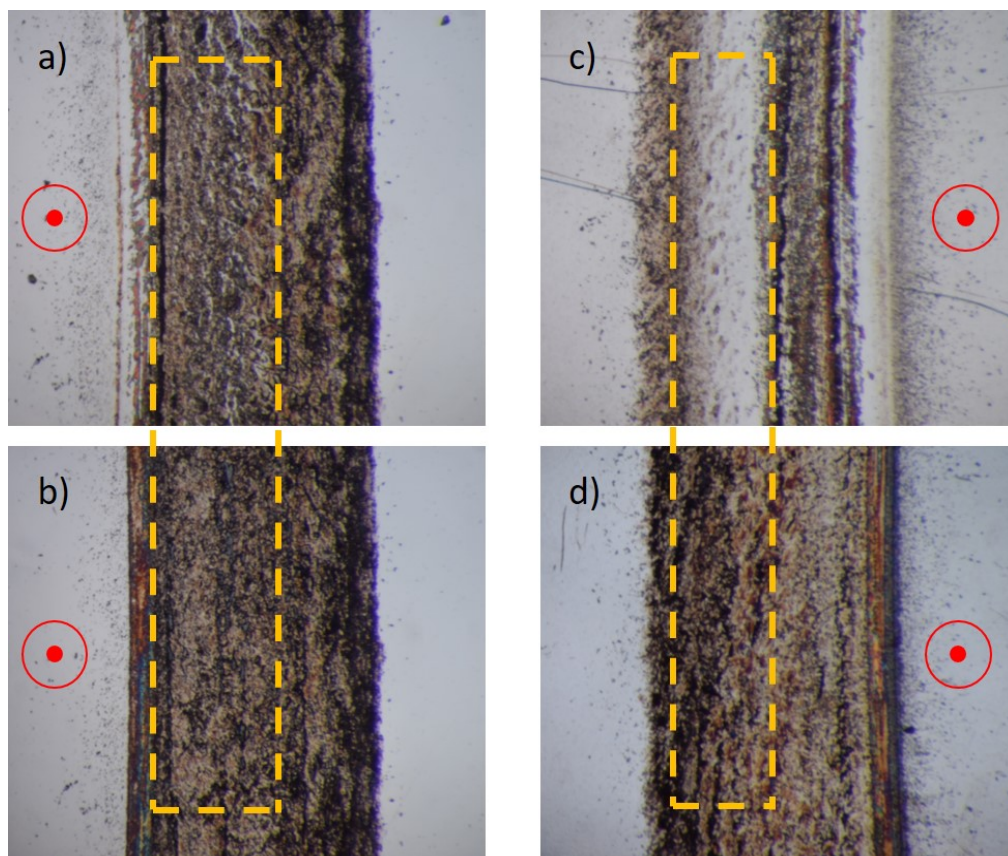
Na Obr. 5-18 je vyobrazen vývoj drsnosti pro experiment s aplikací 4 a 8 μl, ze kterého je patrné, že drsnost disku po prvotním dlouhodobém záběhu byla 0,38 μm, po následném mezi-záběhu pak 0,28 μm a po posledním 0,29 μm. Z těchto hodnot je patrné, že nedošlo k obnově drsnosti na hodnotu po prvotním dlouhodobém záběhu, nicméně, jak lze vidět na Obr. 5-18, dochází prakticky k obnovám hodnoty drsnosti po každém mezi-záběhu na hodnotu prvního mezi-záběhu.



Obr. 5-18 Vývoj drsnosti pro 4 a 8 µl

Při pohledu na povrch drážek pomocí binokuláru bylo možné sledovat jejich změny mezi stavy po experimentu a po mezi-záběhu, jak lze pozorovat na Obr. 5-19, kde červený symbol označuje stranu, která je blíže ose rotace a kde obrázek a) zobrazuje drážku disku po experimentu s mazivem, b) pak disk po mezi-záběhu, c) kouli po experimentu a nakonec d) kouli po mezi-záběhu.

Na Obr. 5-19 a) lze ve žlutě vyznačeném obdélníku vidět vyhlazení drážky, které se projevuje patrnými bílými stopami, jenž vlivem suchého kontaktu opět zanikají, jak lze vidět na obrázku b). Rozdíly mezi povrchem drážky u koule jsou též vyznačeny žlutým obdélníkem a jsou podstatně znatelnější oproti rozdílům u disku, jelikož, jak lze vidět na obrázku c), u koule po experimentu s mazivem dochází k výraznému vyhlazení kontaktního místa, které se značí bílou stopou, ovšem vlivem suchého kontaktu vyobrazeného na obrázku d) dochází k opětovnému zdrsňení celého povrchu drážky.

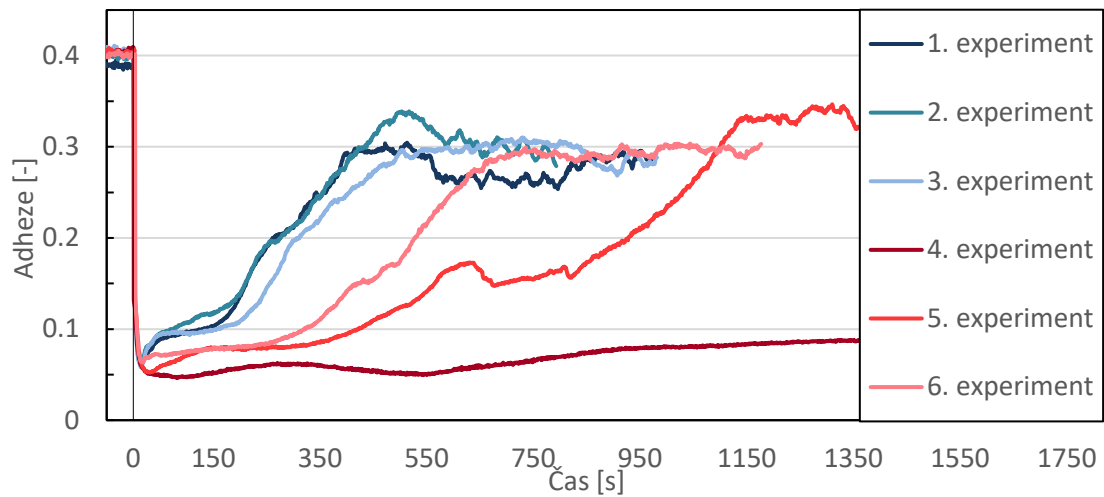


Obr. 5-19 Vývoj povrchů drážek; a) disk po experimentu, b) disk po mezi-záběhu, c) koule po experimentu, d) koule po mezi-záběhu

5.5.2 Vývoj geometrie kontaktních těles v čase

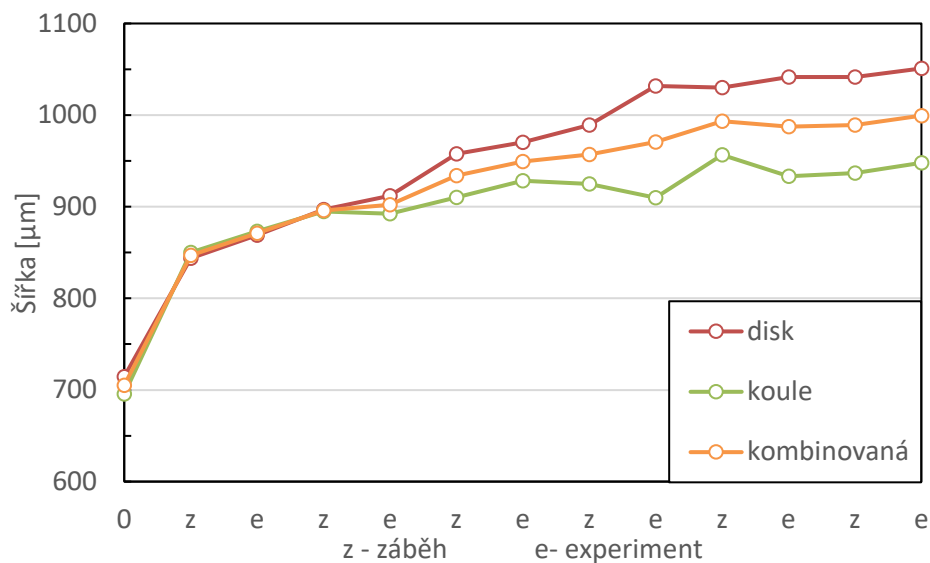
Cílem těchto experimentů bylo stanovit životnost kontaktních těles, což znamená maximální šířku drážek, kdy ještě vývoj experimentu vykazuje trendový průběh a kdy již není možné jejich průběh brát za vypovídající. K experimentu, kde se aplikovaly 2 μl maziva, byla použita kontaktní tělesa s již vytvořenou drážkou, kdy na kouli byla o šířce 696 μm , na disku pak 715 μm .

Na Obr. 5-20 jsou vyobrazeny průběhy experimentů při aplikaci 2 μl maziva, ze kterých lze vidět, že první tři provedené experimenty jsou trendově stejné, a zároveň u nich ihned po aplikaci maziva dochází k nárůstu adheze, konkrétně hodnoty 0,2 dosahují v rozmezí 250–300 s. Avšak u následujících tří experimentů již nedochází k trendovému průběhu. V jednom případě dochází k úplnému přemazání kontaktu po celou dobu experimentu, v dalších dvou případech pak lze pozorovat mírný nárůst adheze ihned po aplikaci na hodnotu 0,08 a následnou stagnaci na této hodnotě po dobu 110 s. Po této době opět dochází k nárůstu adheze, který je ovšem pozvolnější oproti předchozím experimentům, jelikož z minimální hodnoty po aplikaci na hodnotu 0,2 adheze narůstala po dobu 525 resp. 933 s.



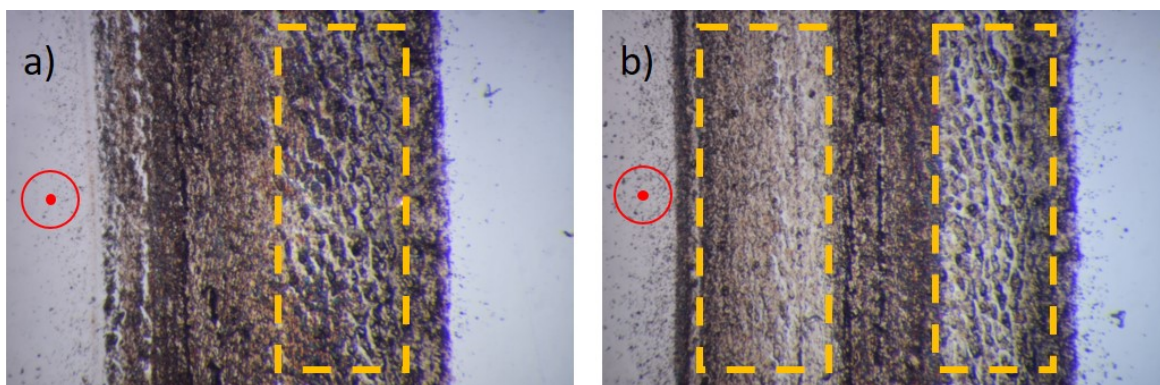
Obr. 5-20 Průběhy experimentů stanovující životnost těles pro 2 μ l maziva

Na Obr. 5-21 je vyobrazen vývoj šířky drážky obou kontaktních těles, ze kterého je patrné, že po provedení třetího experimentu je šířka drážky disku 970 μ m, avšak po dokončení čtvrtého experimentu již překračuje 1000 μ m, konkrétně hodnotou 1032 μ m. Po provedení všech experimentů je šířka drážky disku 1051 μ m.



Obr. 5-21 Vývoj šířky drážky těles pro 2 μ l maziva

Na Obr. 5-22 je vyobrazen povrch drážky disku, konkrétně na obrázku a) po třetím experimentu a na obrázku b) po 5. experimentu. Na obrázku a) lze vidět, že se povrch drážky dělí na dvě oblasti, přičemž levá oblast má vyšší drsnost povrchu než žlutě vyznačená pravá oblast, která je vyhlazená vlivem přítomnosti maziva. Na obrázku b) jsou pak viditelné tři oblasti o různé struktuře povrchu, což znamená, že v každé z těchto oblastí se nachází jiné množství maziva, a působí tak i jiný kontaktní tlak.



Obr. 5-22 Povrch drážky disku; a) po 3. experimentu, b) po 5. experimentu

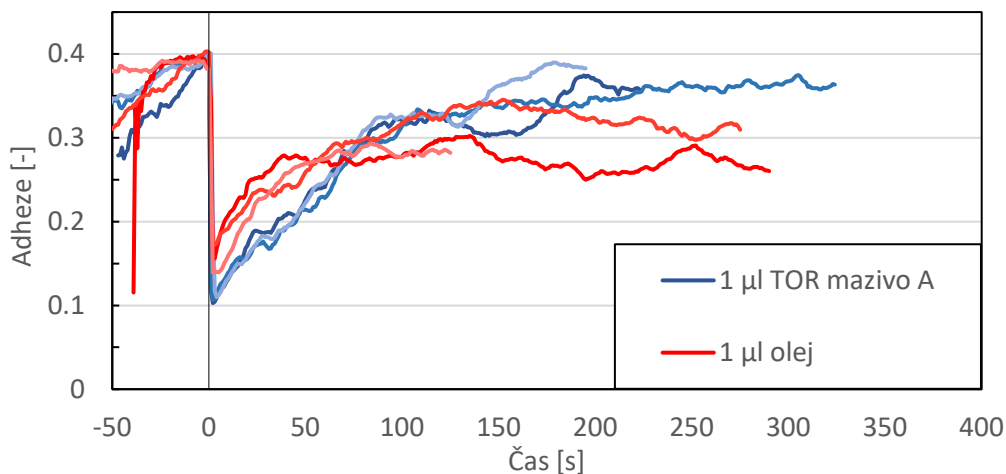
Na začátku každého experimentu byla jako zatěžující síla volena síla o velikosti 18 N, která v přepočtu na nových tělesech vytvářela kontaktní tlak o velikosti 800 MPa. S postupujícím rozšiřováním drážky na tělesech kontaktní oblast rostla, a Hertzův tlak se tak snižoval, a to až na hodnotu 731 MPa při šířce drážky disku 1050 μm a koule 948 μm . Celkový pokles tlaku za celou dobu životnosti disku byl o 9 %. Na základě výše zmíněného byla životnost kontaktních těles stanovena v závislosti na šířce drážky disku, a to do její maximální hodnoty v intervalu 900–1000 μm .

5.6 Experimenty bez využití navržené metodiky

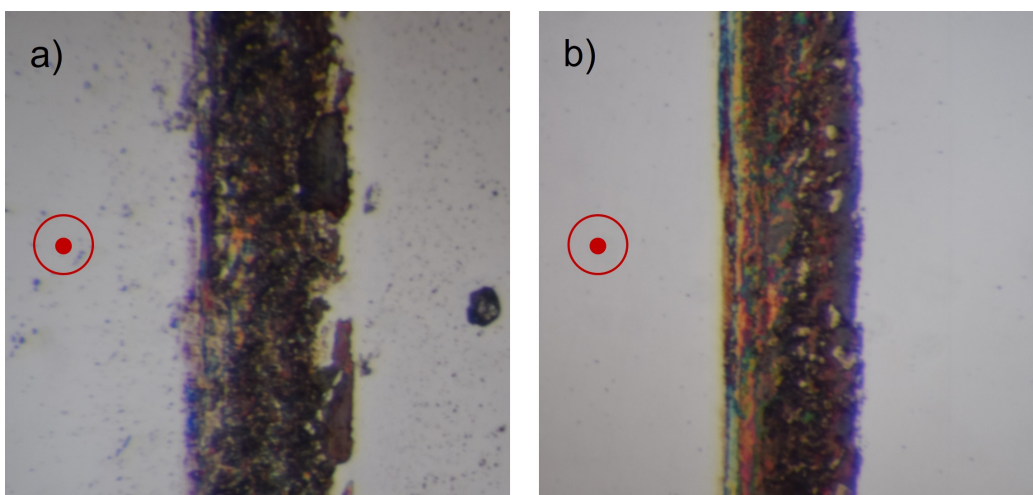
Pro objasnění důležitosti sestavení správné metodiky testování TOR produktů bylo provedeno několik sérií experimentů, které se žádnou metodikou neřídily. Na nových kontaktních tělesech nebyl proveden žádný prvotní dlouhodobý záběh, při experimentech se statickou aplikací maziva nebyl proveden ani krátkodobý záběh, při experimentech s dynamickou aplikací pak bylo vyčkáno pouze na nárůst adheze na hodnotu 0,4, nikoli však na její ustálení. Aplikované množství maziva do kontaktu byl 1 μl . Vzhledem k absenci dlouhodobého záběhu nebyla na kontaktních tělesech vytvořena drážka, byly stejné experimenty provedeny pouze se základovým olejem pro zjištění, zda-li se do kontaktu při použití maziva dostávají i pevné částice v něm obsažené.

Na Obr. 5-23 jsou vyobrazeny průběhy experimentů s krátkým krátkodobým záběhem při aplikaci 1 μl maziva (modře) a oleje (červeně). Trendově jsou průběhy pro obě maziva stejné, jediný rozdíl spočívá v rychlosti vyhladovění kontaktu. Při aplikaci oleje dochází k nárůstu adheze na hodnotu 0,2 za 9–21 s, při aplikaci maziva pak za 39–43 s, což je oproti nárůstu při experimentech s vytvořenou drážkou, kde při aplikaci 1 μl maziva dochází k nárůstu adheze na hodnotu 0,2 za 207 s, viz. Obr. 5-14, téměř pětinašobně rychlejší nárůst. K vyhladovění kontaktu, tedy k dosažení hodnoty adheze 0,35, pak dochází pro mazivo v rozmezí 150–185 s. Na Obr. 5-24 jsou vyobrazeny povrchy drážek disků po prvních experimentech při použití a) maziva a b) oleje. Šířka drážky disku při použití

maziva byla po tomto experimentu 207 μm a koule 189 μm , při použití oleje pak byla šířka u disku 174 μm a koule 140 μm .

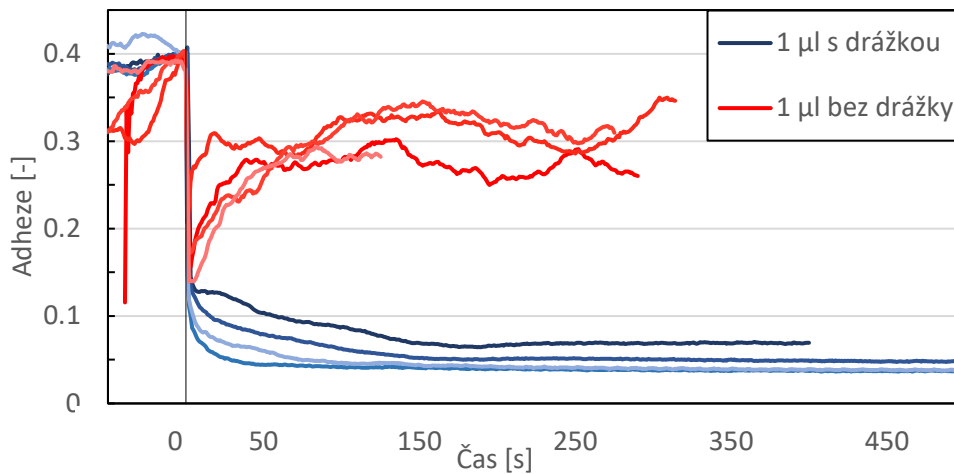


Obr. 5-23 Srovnání experimentů s dynamickou aplikací pro mazivo a olej

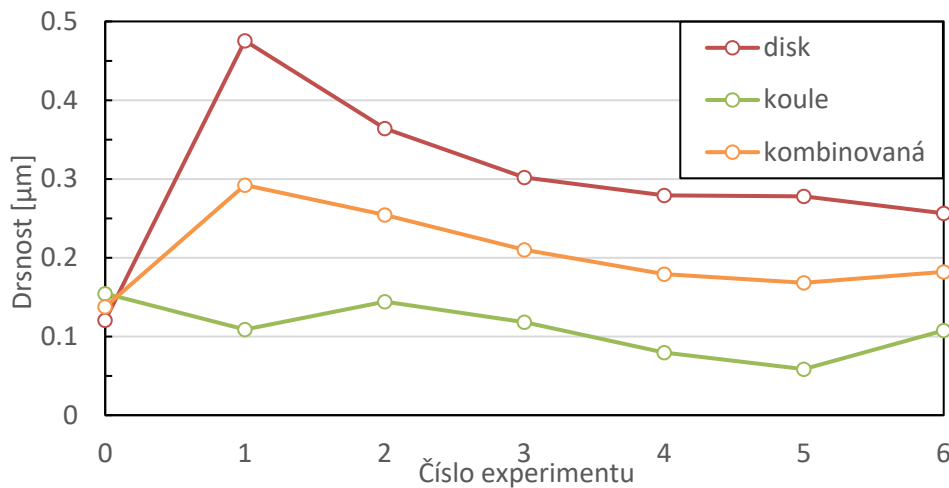


Obr. 5-24 Povrch drážky disku po experimentu s; a) mazivem, b) olejem

Pro ověření chování samotného základového oleje v kontaktu s vytvořenými drážkami po dlouhodobém záběhu byly provedeny experimenty se stejnými podmínkami jako pro experimenty popsané výše. Na Obr. 5-25 je vyobrazeno porovnání experimentů provedených s aplikací základového oleje na nová tělesa (červeně) a na tělesa po provedení dlouhodobého záběhu (modře), ze kterého jsou patrné znatelné rozdíly. Při použití těles s drážkou došlo ve všech případech k přemazání kontaktu, což potvrzuje přítomnost oleje v kontaktu po celou dobu trvání experimentu. Na Obr. 5-26 je vyobrazen vývoj drsností při experimentech na zaběhlých tělesech, ze kterého je patrné, že drsnost má klesající trend. Při porovnání průběhů experimentů z obou sérií je patrné, že nevytvoření drážky před započatím testování maziv vede na téměř okamžité vyhladovění kontaktu, a tudíž v tomto případě nelze testovat chování jakéhokoli maziva.



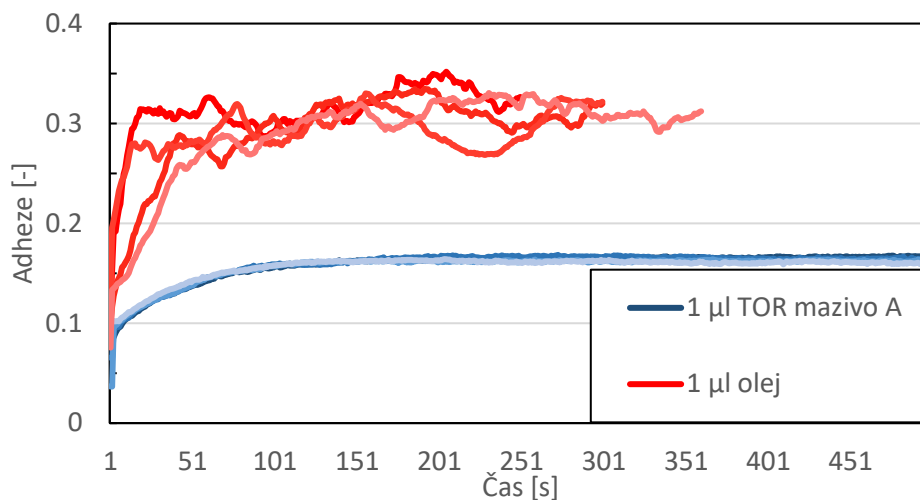
Obr. 5-25 Srovnání průběhů experimentů s drážkou a bez drážky



Obr. 5-26 Vývoj drsností při aplikaci oleje na zaběhlý disk

Při experimentech se statickou aplikací byl pozorován značný rozdíl mezi experimenty s aplikací maziva a oleje, jak je vyobrazeno na Obr. 5-27. Při aplikaci oleje došlo k vyhladovění kontaktu v čase 15–75 s, zatímco při aplikaci maziva došlo v čase 90–100 s k ustálení adheze na hodnotě 0,16, na které se kontakt držel až do ukončení experimentu.

Pro srovnání chování samotného oleje aplikovaného na nový a zaběhlý disk byl pozorován téměř stejný rozdíl jako při experimentech s dynamickou aplikací, viz. Obr. 5-25, tedy při experimentech bez drážky docházelo k vyhladovění kontaktu, zatímco u zaběhlých těles byl kontakt zcela přemazán.



Obr. 5-27 Srovnání experimentů se statickou aplikací pro mazivo a olej

5.7 Navržení metodiky a její verifikace

Na základě všech provedených experimentů popsanych v kap. 5.1–5.5 byla sestavena metodika testování pro TOR maziva zohledňující vliv záběhů kontaktních těles, způsob a množství aplikovaného maziva a stav kontaktních těles mezi jednotlivými experimenty. Po sestavení této metodiky byla provedena její verifikace pro tři TOR produkty, konkrétně pak pro dvě TOR maziva a jeden MT.

Metodika byla sestavena pro laboratorní tribometr v konfiguraci kulička-disk, konkrétně Mini-traction-machine. Pro experimenty byla využívána kontaktní tělesa z nerezové oceli AISI 52 100, přičemž kulička měla tvrdost 800–900 HV a drsnost $R_a=0,012 \mu\text{m}$ a disk měl tvrdost 720–780 HV a drsnost $R_a=0,01 \mu\text{m}$. Celá tato metodika je podrobněji popsána v Příloze 1. Parametry, které jsou nutné nastavit před započítím každého experimentu, jsou:

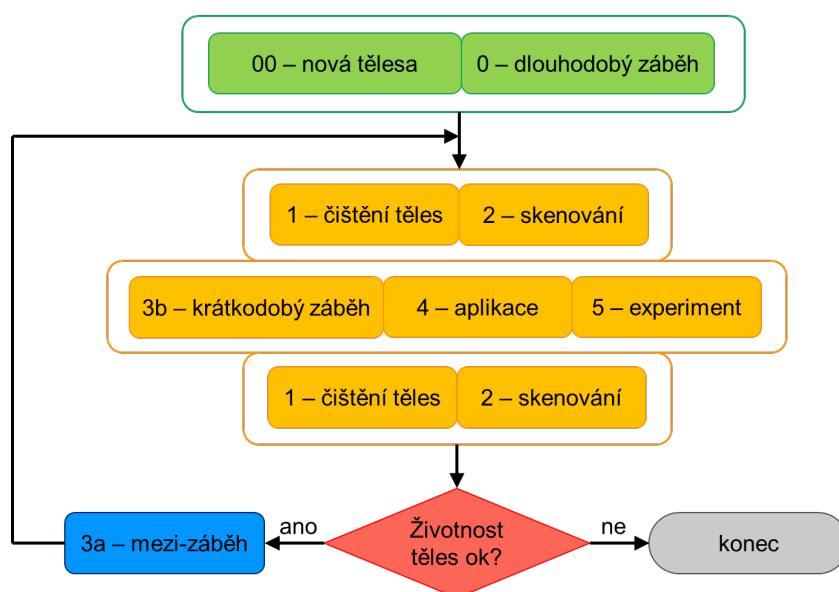
- zátěžná síla 18 N,
- rychlost 1 m/s,
- skluz 2 %,
- frekvence zaznamenávání vývoje adheze 1 Hz.

Jednotlivé kroky navržené metodologie jsou schematicky vyobrazeny na Obr. 5-29 a jsou následující:

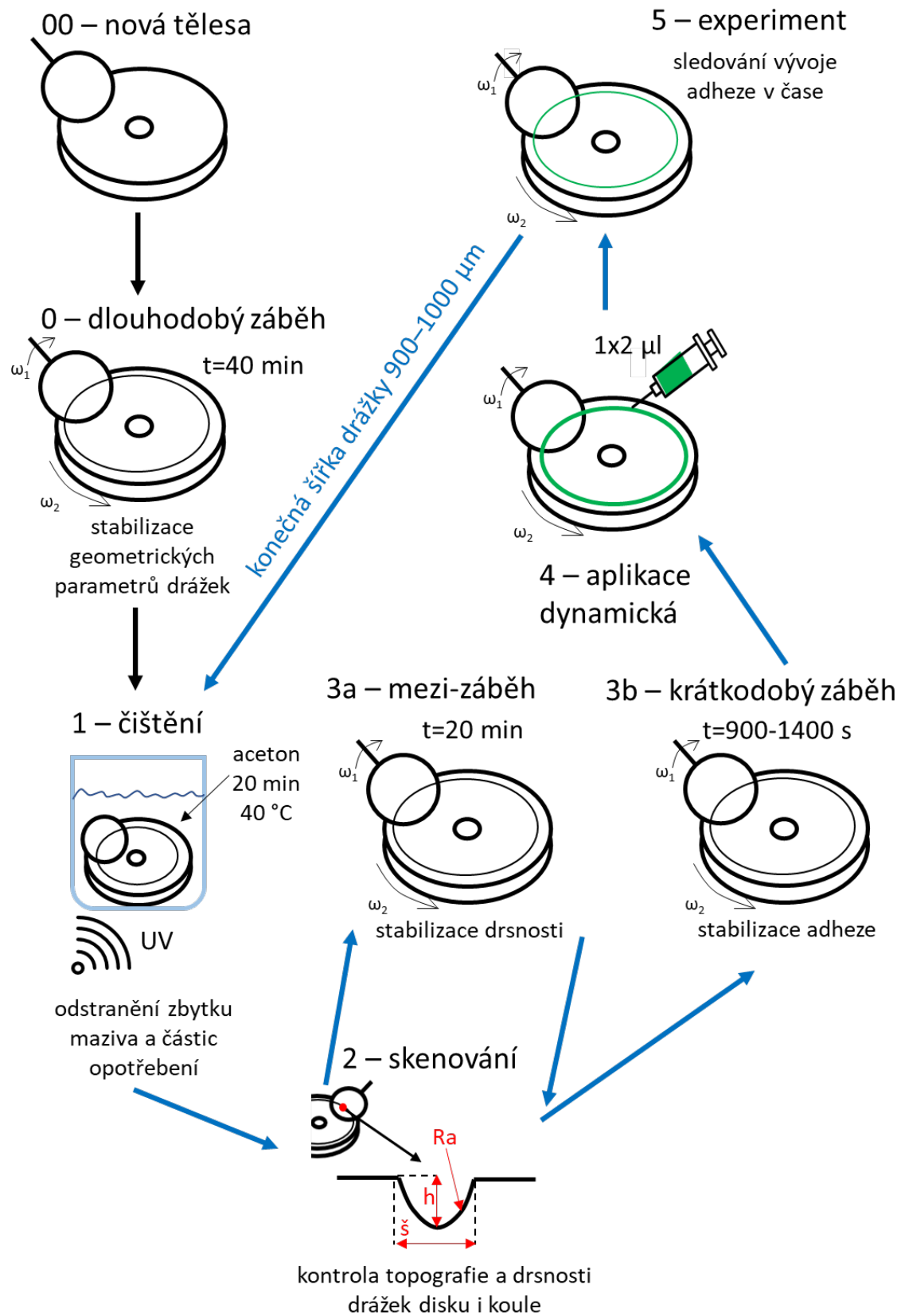
- 00) nová kontaktní tělesa očištěna ručně pomocí acetonu od konzervačního oleje,
- 0) tělesa jsou upnuta do MTM a je proveden dlouhodobý záběh 40 min na nové kontaktní dvojici za suchého tření,

- 1) po všech experimentech jsou tělesa vždy očištěna pomocí ultrazvukové čističky v acetonové lázni a důkladně osušena, aby aceton netvořil mokré stopy viditelné na profilometru,
- 2) obě tělesa jsou naskenována pomocí profilometru Bruker, u disku jsou skenována 4 místa rovnoměrně od sebe vzdálena, na kuličce pak 2 protilehlá místa,
- 3a) tělesa jsou upnuta zpět do MTM a je proveden mezi-záběh, tedy 20 min test za suchého tření, který je realizován vždy jen po experimentu s aplikací maziva, a tedy není prováděn po dlouhodobém záběhu,
- 3b) tělesa jsou upnuta zpět do MTM a je proveden krátkodobý záběh, jehož doba je proměnlivá, ovšem interval jeho trvání je ve valné většině 900–1400 s, avšak vždy je potřeba vyčkat na ustálení adheze na hodnotě suchého tření, tedy 0,37–0,42, v mezichase, kdy probíhá krátkodobý záběh, je vždy důkladně promáčkáno mazivo v jeho nádobě a nasáto několikanásobné množství oproti množství potřebnému pro aplikaci a vždy je několik prvních dávek aplikováno na papír, dokud se viditelně neustálí aplikované množství, aby se zabránilo nepřesné aplikaci maziva do kontaktu,
- 4) po ustálení adheze je na MTM upnut přípravek, do kterého je nasazena mikropipeta a následně se dynamicky aplikuje mazivo přímo do kontaktu a zkontroluje se, zda-li se aplikovalo celé požadované množství, a nebo jeho část ulpěla na hrotu pipety, přípravek je i s mikropipetou odejmut z MTM a zbylé mazivo se z mikropipety vrátí zpět do nádoby, aby pro další aplikaci mohlo být nasáto čerstvě promíchané mazivo,
- 5) nyní se již čeká na vývoj součinitele adheze do doby, než se ustálí na nějaké hodnotě a poté je experiment ukončen.

Pro zpřesnění průběhu celé série provedené na jedné kontaktní dvojici těles jsou jednotlivé kroky jdoucí za sebou vyobrazeny ve vývojovém diagramu na Obr. 5-28.



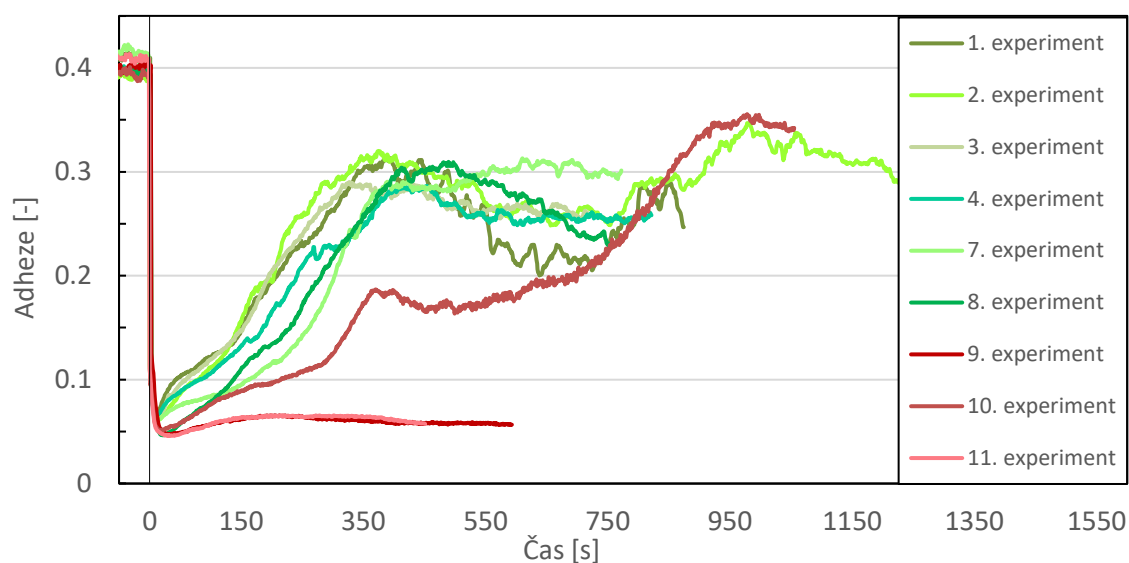
Obr. 5-28 Vývojový diagram navržené metodiky



Obr. 5-29 Schéma navržené metodiky

5.7.1 Výsledky experimentů dle navržené metodiky na TOR mazivu A

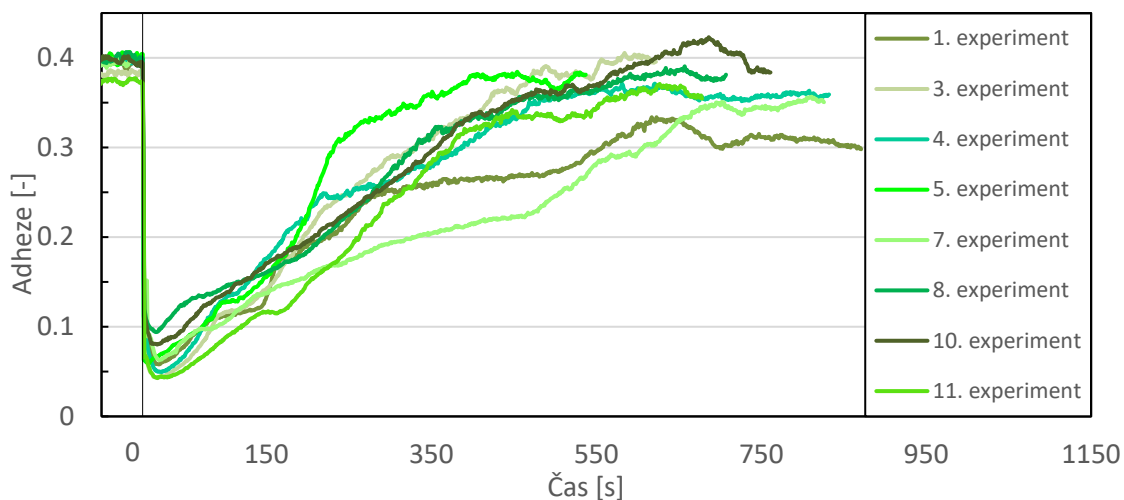
Pro ověření navržené metodiky byly realizovány experimenty při použití TOR maziva A, na kterém byla celá metodika vyvíjena. Celkem bylo provedeno 11 experimentů s aplikací maziva, přičemž poslední tři experimenty již trendově neodpovídaly předchozím průběhům. Na Obr. 5-30 je vyobrazen vývoj experimentů, kde červeně jsou vyobrazeny průběhy experimentů vymykající se trendovému průběhu. U těchto experimentů šířka drážky disku přesahovala 950 μm , na základě čehož byly stanoveny jako experimenty provedeny za životnosti těles. U zbylých experimentů je trend vývoje stejný až do dosažení hodnoty adheze 0,3.



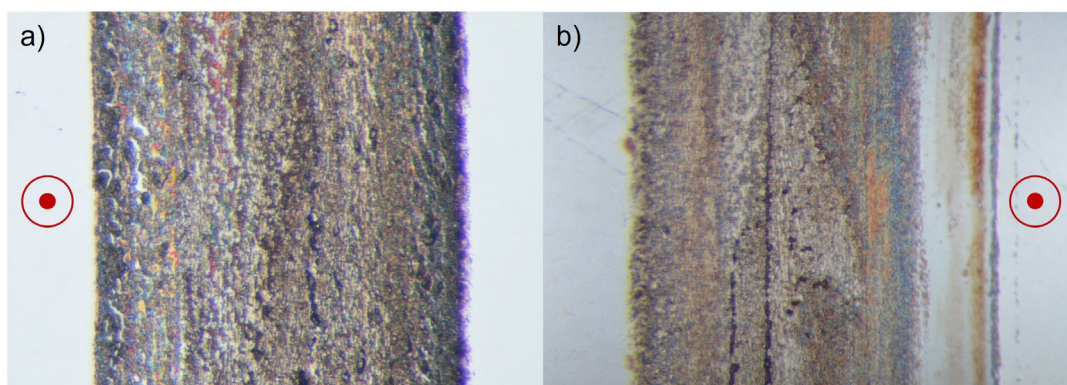
Obr. 5-30 Verifikace metodiky pro TOR mazivo A

5.7.2 Výsledky experimentů dle navržené metodiky na TOR mazivu B

Dalším mazivem, na kterém byla otestována navržená metodika, bylo TOR mazivo B. Celkem bylo provedeno 11 experimentů s aplikací maziva, po kterých ovšem nedošlo k narušení životnosti kontaktních těles i přes fakt, že na konci série experimentů byla šířka drážky disku 961 μm a koule 909 μm . Jejich povrch v tomto stavu je vyobrazen na Obr. 5-32. Trend vývoje byl pro všechny experimenty stejný, a to až do hodnoty adheze 0,25, jak je vyobrazeno na Obr. 5-31.



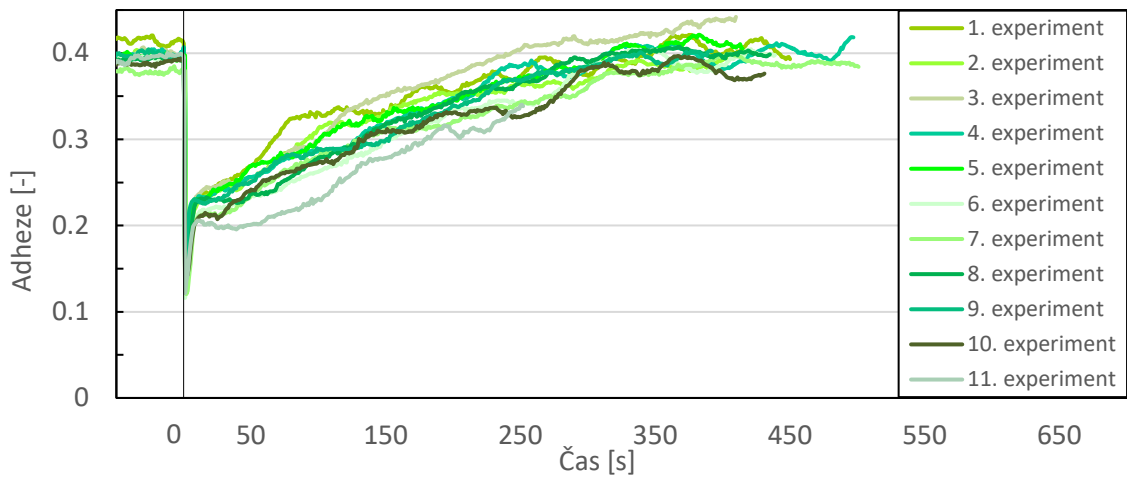
Obr. 5-31 Verifikace metodiky pro TOR mazivo B



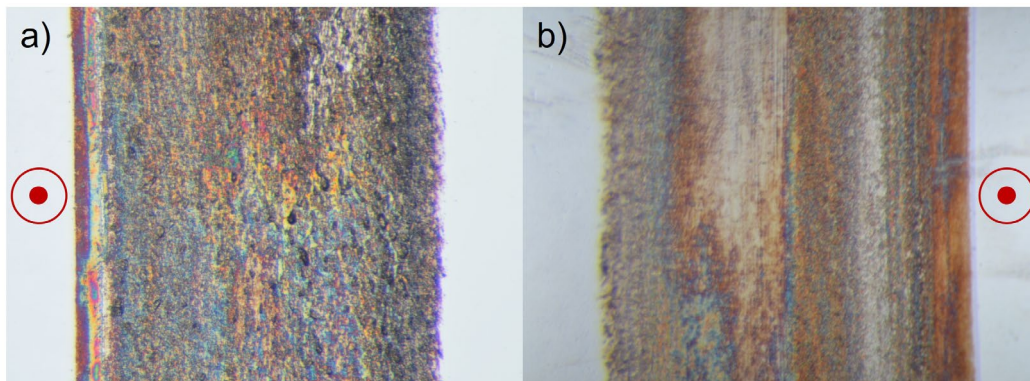
Obr. 5-32 Povrch drážky; a) disku, b) koule

5.7.3 Výsledky experimentů dle navržené metodiky na MT

Kvůli odlišnému složení MT oproti TOR mazivům byla metodika otestována na jednom MT, aby bylo možné říci, jestli je tato metodika pro jejich testování vhodná či nikoli. Celkem bylo provedeno 11 experimentů s aplikací MT, jejichž průběh je vyobrazen na Obr. 5-33. Trend vývoje je pro všechny experimenty stejný, což značí velmi dobrou opakovatelnost. Od bodu aplikace dochází k úplnému vyhladovění kontaktu, tedy k dosažení hodnoty adheze 0,39, za 310–390 s. Po provedení všech experimentů byla šířka drážky disku i koule 939 μm . V tomto stavu jsou vyobrazeny topografie drážek na Obr. 5-34.



Obr. 5-33 Verifikace metodiky pro MT



Obr. 5-34 Povrch drážky; a) disku, b) koule

6 DISKUZE

6.1 Dlouhodobý a krátkodobý záběh

Dlouhodobé experimenty se suchým kontaktem a skluzem 2 % prokázaly dobu potřebnou pro prvotní dlouhodobý záběh nových kontaktních těles, která činila 60 min, dobu potřebnou pro krátkodobý záběh, která činila 900 s a také hodnotu součinitele adheze za suchého kontaktu 0,39. Pro skluz 3 % poté experimenty prokázaly dobu pro dlouhodobý záběh 60 min, pro krátkodobý 800 s a hodnotu adheze 0,49. Rozdílné hodnoty součinitele adheze potvrzují jejich závislost na výši skluzu, což koresponduje s tvrzením uvedeným ve studiích [10, 11, 13, 14, 17], ve kterých se uvádí, že se zvyšujícím se skluzem roste i hodnota součinitele adheze při suchém kontaktu.

Při experimentech se suchým kontaktem docházelo, jak lze vidět na Obr. 5-1, k ustálení součinitele adheze v čase 900 s ve všech případech. Stejného trendu dosáhl ve své studii [9] také Lundmark, který prováděl všechny experimenty se suchým kontaktem a jemuž docházelo k ustálení hodnoty adheze v čase 2000 s. Tento rozdíl je dán odlišným typem měřicího zařízení a také rozdílnými provozními parametry experimentů. Ovšem při ostatních provedených experimentech, ve kterých již vždy došlo k aplikaci TOR maziva, byla doba potřebná pro ustálení adheze při krátkodobém záběhu rozdílná, a to v řádu stovek sekund. To bylo pravděpodobně způsobeno nedostatečným vyčištěním kontaktních těles od zbytků maziva ulpěných v drážkách a také přítomností acetonu při procesu čištění. Z těchto poznatků vyplývá, že při experimentech s použitím TOR maziva nelze stanovit zcela fixní dobu potřebnou pro krátkodobý záběh, jak tomu bylo v některých studiích [11, 13–15], ale že je vždy potřeba vyčkat na ustálení adheze pro zamezení ovlivnění průběhu experimentů, jako tomu bylo ve studiích [10, 16, 17].

Doba pro prvotní dlouhodobý záběh byla stanovena na základě stabilizace rozvoje geometrie drážek u kontaktních těles, které bylo dosaženo v čase 60 min, viz Obr. 5-2 b). Vzhledem k tomu, že po tomto dlouhodobém záběhu následoval vždy i záběh krátkodobý, který trval přibližně 20 min, byla doba pro prvotní záběh zkrácena na 40 min, jelikož v součtu těchto dvou záběhů vždy došlo k 60 min trvajícím suchému kontaktu před první aplikací maziva.

6.2 Vliv skluzu

Při experimentech popisujících vliv skluzu na průběh experimentu bylo prokázáno, že při vyšším skluzu dochází k rychlejšímu opotřebení těles, jak lze vidět na Obr. 5-5. Ke stejnému závěru dospěli i autoři studií [11, 13]. Tento rozdíl je způsoben rozdílnými skluzovými

vzdálenostmi, kterých dosáhnou tělesa za stejný časový úsek při rozdílném skluzu v kontaktu. Při nulovém skluzu by tedy teoreticky nedocházelo k žádnému opotřebením těles, jelikož tělesa neurazí žádnou skluzovou vzdálenost.

Při porovnání výdrže maziva v kontaktu pro experimenty se stejnou velikostí kombinované šířky drážky u obou kontaktních dvojic bylo zjištěno, že při skluzu 3 % docházelo k rychlejšímu nárůstu adheze z minimální hodnoty na hodnotu 0,3 než při skluzu 2 %. K závěru, že při vyšším skluzu dochází k rychlejší obnově součinitele adheze zpět na hodnotu suchého kontaktu, došel ve své studii [11] i Arias-Cuevas. Zkrácení výdrže maziva v kontaktu se zvyšujícím se skluzem má pravděpodobně za následek fakt, že při zvyšujícím se skluzu dochází k porušení mazacího filmu a vytlačení maziva z kontaktu do okolí drážky. Z důvodu opakovaného využití kontaktní dvojice byl stanoven skluz 2 %, jelikož docházelo k pomalejšímu opotřebením těles a delší výdrži maziva v kontaktu.

6.3 Vliv aplikace

Při srovnání tří způsobů aplikace maziva do kontaktu, kterými byla aplikace dynamická, statická a statická s roznesením, bylo zjištěno, že způsob aplikace má dopad na následný průběh experimentu, což ve své práci [12] potvrdil i Chen. Při statické aplikaci totiž docházelo k rozlití nanesené kapky po větší oblasti disku, než byla šířka drážky, a což tak mělo na následek snížení množství maziva ovlivňujícího kontakt. Zároveň také pravděpodobně po spuštění experimentu vlivem skluzu došlo k vytlačení části maziva ven z kontaktu. U aplikace statické s následnou fází roznesení docházelo vlivem čistého valení k rovnoměrnému roznesení maziva ulpěného v drážce po celém obvodu kontaktní oblasti, vlivem čehož docházelo k nejnižší minimální adhezi v porovnání s ostatními způsoby aplikace, jak je vyobrazeno na Obr. 5-6. Při aplikaci dynamické docházelo k lepšímu vtáhnutí celého aplikovaného množství přímo do kontaktu, což eliminovalo úbytek maziva vlivem rozlití kapky po disku, jak tomu bylo u aplikace statické. To mělo pravděpodobně za následek velmi dobrou opakovatelnost experimentů oproti oběma statickým aplikacím. Z těchto důvodů byla dynamická aplikace zvolena jako nejvhodnější.

Při porovnání průběhů experimentů při různém dávkování maziva do kontaktu nebyl pozorován markantní rozdíl mezi jednotlivými způsoby dávkování, viz. Obr. 5-10, jelikož až do hodnoty adheze 0,15 byly průběhy stejné a začaly se lišit až po dosažení této hodnoty. Při aplikaci celého množství naráz mazivo vykazovalo nejdelší výdrž v kontaktu, což vzhledem k použitému zařízení mohlo mít nepříznivý dopad na vyhodnocení vlivu maziva, jelikož po delší době experimentu dochází k vytvoření nějaké třetí vrstvy na tělesech, která již není zcela tvořena pouze aplikovaným mazivem, a která tak může významně ovlivňovat chování kontaktu. Zároveň také u jednorázové aplikace celých 4 μ l docházelo k ulpívání části maziva na pipetě, viz. Obr. 5-11, což vykazovalo značně rozdílné průběhy experimentů, proto bylo při vyšším aplikovaném množství lepší jej dávkovat postupně. Pro případ 2 μ l již

k výše zmíněným problémům nedocházelo, a bylo tak vyhodnoceno, že je možné jej naaplikovat v jedné dávce. Tento způsob také eliminoval možnost projevu chyby pipety, která reagovala na požadavek aplikace pomalu, což mohlo způsobit, že při rychlém zmáčknutí tlačítka pro aplikaci 2x rychle za sebou nemusela pipeta zareagovat a aplikovat tak pouze jednou.

6.4 Vliv aplikovaného množství

Při testování vlivu aplikovaného množství maziva do kontaktu bylo zjištěno, že při použité metodologii lze testovat maziva v rozmezí množství 1–4 μl . Mezi jednotlivými množstvími se však vyskytovaly rozdíly týkající se průběhů experimentů. Z porovnání experimentů bylo prokázáno, že kontakt je citlivý na aplikované množství, a to především v délce výdrže maziva v kontaktu. Čím více maziva bylo aplikováno, tím delší byla jeho výdrž, viz. Obr. 5-15, což koresponduje s tvrzením z Galasovy studie [17]. Tento jev je pravděpodobně dán tím, že se zvyšujícím se aplikovaným množstvím dostává více maziva, což má za následek jeho delší výdrž a oddaluje tak vyhladovění kontaktu. Fakt, že se do kontaktu dostává více maziva, potvrzuje také Obr. 5-14, ze kterého je patrné, že se zvyšujícím se množstvím klesá minimální adheze bezprostředně po aplikaci.

Při aplikaci 1 μl docházelo s rozšiřující se drážkou k navyšování minimální hodnoty adheze po aplikaci, jak lze pozorovat na Obr. 5-12. Tento jev byl pravděpodobně důsledkem nedostatečného množství maziva, což mělo za následek také kratší trvání experimentů. Opačný trend je potom viditelný při aplikaci 2 μl na Obr. 5-13, kde je patrné snižování minimální adheze, což značí fakt, že při postupujícím rozvinutí drážky se do ní dostávalo větší množství maziva, které bylo dostatečné pro mazání celého kontaktu. Stejný trend byl pozorován také pro množství 4 μl . Z těchto poznatků plyne, že pro opakované použití kontaktních těles je vhodnější využívat vyšší množství maziva než 1 μl . Při aplikaci 4 μl docházelo k významnému prodlužování experimentů vlivem většího množství maziva v kontaktu, což mohlo být zapříčiněno vytvořením třecí vrstvy, jak již bylo popsáno v kap. 6.3.

6.5 Vývoj geometrie a drsnosti kontaktních těles v čase

Při sledování vývoje drsnosti drážek bylo zjištěno, že přítomnost maziva má za následek vyhlazování jejich povrchu, což by mohlo znamenat při markantní změně drsnosti změnu režimu mazání, a tedy i rozdíl v průběhu experimentu. Vyhlazování povrchu drážek má za následek přítomnost základového oleje, což dokazuje srovnání grafů na Obr. 5-16 (vyhlazování při použití maziva) a Obr. 5-26 (vyhlazování při použití oleje).

K závěru, že přítomnost oleje v kontaktu vyhlazuje jeho povrch, došel ve své studii [10] také Gallardo-Hernández. Zařazení mezi-záběhu mezi experimenty s mazivem mělo za následek částečnou obnovu drsnosti na původní hodnotu, jak lze vidět na Obr. 5-17. Nikdy však nedošlo ke 100% navrácení na původní hodnotu, přesněji řečeno, drsnost se i přes tento mezikrok snižovala. To mohlo být způsobeno tím, že s rozšiřující se drážkou klesal Hertzův kontaktní tlak. Tím pádem nemohlo docházet k tak velkému opotřebenosti, jako tomu bylo při prvotním dlouhodobém záběhu, kde byla kontaktní oblast menší, a tedy větší Hertzův tlak.

U experimentů zaměřených na stanovení životnosti těles bylo zjištěno, že po překročení šířky drážky 1000 μm došlo k výrazné změně průběhů experimentů. Jedním z faktorů, které mohly tyto experimenty ovlivnit, byl pokles kontaktního tlaku, který se od počátku experimentů snížil o 9 %. Dalším možným vysvětlením by mohla být změna povrchu drážek vyobrazená na Obr. 5-22, kde lze vidět, že po experimentu provedeném za životnosti disku je struktura povrchu, která se dělí na tři části a na kterých je při jejich porovnání vidět rozdílné vyhlazení. To by mohlo značit, že v každé části kontaktu se nachází rozdílné množství maziva oddělující povrchy, a tedy i na každou část působí jiný kontaktní tlak. Dalším faktorem také mohlo být množství maziva přítomného v kontaktu, jelikož s rozšiřující se drážkou se do ní aplikovalo větší množství, což by mohlo vysvětlovat delší výdrž maziva v kontaktu a také jeho přemazání, viz. Obr. 5-20.

6.6 Experimenty bez využití navržené metodiky

Při experimentech nerespektujících navrženou metodiku bylo zjištěno, že bez provedení dlouhodobého záběhu docházelo při dynamické aplikaci jak maziva, tak i samotného základového oleje k téměř okamžitému vyhladování kontaktu. To značí fakt, že bez vytvoření drážky se do kontaktu mezi tělesy dostane jen velmi malé množství aplikované látky, která tak vykazuje velmi krátkou výdrž, a zbylé množství je ihned vytlačeno mezi kontakt. Z porovnání průběhů experimentů při aplikaci maziva a oleje, viz. Obr. 5-23, je možné říct, že při aplikaci maziva se do kontaktu dostává jen velmi málo pevných částic, které jsou v mazivu obsaženy, jelikož průběh je prakticky identický s průběhem experimentů se samotným olejem, ve kterém se žádné pevné částice nenachází.

Při srovnání experimentů s aplikací oleje na zaběhlá a nezaběhlá kontaktní tělesa, viz. Obr. 5-25, je patrné, že při vytvoření drážky dochází k přemazání kontaktu, což potvrzuje, že se do kontaktu dostává větší množství aplikované látky, která ovlivňuje chování kontaktu po znatelně delší dobu oproti kontaktu drážky. Při aplikaci oleje na nezaběhlý disk nebyl pozorován žádný výrazný mazací účinek, z čehož vyplývá, že tyto podmínky experimentu jsou zcela nevhodné pro testování jakékoli látky.

Při statické aplikaci došlo při aplikaci oleje k téměř okamžitému vyhladování kontaktu, naopak při aplikaci maziva došlo k ustálení adheze na nízké hodnotě. Toto chování

se zcela vymyká očekávanému průběhu, jelikož olej by měl kontakt zcela přemazat. Tento rozdíl byl pravděpodobně způsoben tím, že při statické aplikaci se olej kvůli své nízké viskozitě rozlil po velké oblasti disku, a do kontaktu se tak dostala jen část. Všechny zmíněné poznatky potvrzují důležitost dlouhodobého záběhu před započítáním experimentů popisující vliv aplikované látky.

6.7 Navržení metodiky a její verifikace

Při testování TOR maziva A došlo k překročení životnosti kontaktních těles, a to po osmi experimentech, což potvrdilo, že životnost těles při použití tohoto maziva se pohybuje někde mezi šířkou drážky disku 900–1000 μm . U TOR maziva B k překročení životnosti v tomto rozmezí nedošlo, což může být způsobeno rozdílným složením maziv. Při porovnání povrchů drážek po použití obou maziv vyobrazených na Obr. 5-19 a Obr. 5-32 jsou totiž patrné rozdíly při pohledu na okolí drážek, kdy u aplikace TOR maziva A se po jejich stranách objevují drobné prohlubně, k čemuž při použití TOR maziva B nedochází. To by mohlo být způsobeno rozdílnými pevnými částicemi obsaženými v mazivu, přesněji řečeno, v mazivu A by mohly být přidané částice tvrdší, na základě čehož by při jejich vytlačování z kontaktu mohly interagovat s povrchy kontaktních těles a vytvářet tak abrazivní opotřebení. Tohoto jevu by pravděpodobně bylo dosaženo v tom případě, pokud by vytlačované mazivo částečně přenášelo kontaktní tlak v bezprostřední blízkosti drážek těles. Tento jev by pak mohl ovlivňovat průběh celého experimentu, což by mohlo vést ke snížení životnosti kontaktních těles a což by vysvětlovalo fakt, že při aplikaci TOR maziva B nedošlo k dosažení hranice životnosti. Vzhledem k tomu, že tato metodologie má být schopna testovat jakékoli TOR mazivo, zůstává stanoveno rozmezí životnosti v rozmezí 900–1000 μm .

Opakovatelnost experimentů při aplikaci TOR maziva A byla lepší oproti experimentům s aplikací TOR maziva B. To bylo pravděpodobně způsobeno rozdílnou mírou viskozity mezi oběma mazivy, jelikož u TOR maziva B docházelo k neúplné aplikaci celého množství. Pro zamezení výskytu tohoto problému by mohl pomoci větší otvor na hrotu pipety, který by omezil vliv povrchového napětí, a tedy by bylo možné zabránit ulpívání části maziva na hrotu.

Při srovnání průběhů experimentů při aplikaci TOR maziva a MT byly patrné významné rozdíly, a to především v rychlosti nárůstu adheze, kde nárůst při použití MT nad adhezi 0,2 byl téměř 50x rychlejší oproti použití TOR maziva. To bylo pravděpodobně způsobeno rozdílným složením, především pak základovou bází. Dalším důvodem by mohla být aplikace příliš malého množství. Galas totiž ve své studii [16] zaměřené na testování MT aplikoval nejmenší testované množství rovno 5 μl , což je 2,5x více, proto pravděpodobně dosahoval odlišných výsledků. Na základě tohoto srovnání tedy lze zkonstatovat, že navržená metodika není vhodná pro testování MT, jelikož aplikované

množství je příliš malé a dále, při vyšším aplikovaném množství by bylo potřeba vyčkat na odpaření vodního média, jak bylo potvrzeno v již zmíněné studii [16], což nekoresponduje s dynamickou aplikací zvolenou do navržené metodiky.

V průběhu všech provedených experimentů se vyskytly další parametry, které by mohly ovlivňovat chování těles při experimentu, ale které v rozsahu práce nebylo možné podrobněji zkoumat. Jedním z nich bylo zjištění, že při vyšším skluzu dochází k rychlejšímu a výraznějšímu vyhlazení drážek. Dalším poznatkem bylo, že při pokračování experimentů na stejných kontaktních tělesech s několikadenním odstupem vykazovaly takové experimenty i po provedeném mezi-záběhu ve všech případech rozdílný vývoj oproti experimentům prováděným první den. Jako vysvětlení se nabízí chemická změna povrchu drážek, která nebyla identifikovatelná použitím profilometru, jelikož vzhledem k použití ložiskové oceli nedocházelo k oxidaci povrchu do hnědé barvy, proto by bylo nutné provést detailnější analýzu, například pomocí Ramanovy spektroskopie, a zjistit, jaké chemické procesy se během klidové doby na povrchu drážek dějí. V neposlední řadě pak bylo pozorováno, že ve většině případů docházelo při první aplikaci maziva na nové (pouze zaběhlé) disky, k odlišnému vývoji adheze oproti všem následným experimentům. To by mohlo být zapříčiněno tím, že i přes čištění povrchů pomocí ultrazvukové čističky nedošlo k úplnému odstranění zbytků maziva z drážek, což mohlo ovlivňovat následné experimenty. Naopak před první aplikací byly drážky čisté a jejich drsnost byla vyšší než při každém dalším experimentu.

7 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývala testováním TOR produktů v laboratorním prostředí za účelem sestavení metodiky pro jejich testování v laboratorním prostředí. TOR produkty představují nový způsob řízení adheze v kontaktu kolo-kolejnice, zároveň také slouží k redukci jejich opotřebení. Navržená metodika má zajišťovat dobrou opakovatelnost experimentů zaznamenávajících vývoj součinitele adheze v čase, a zároveň zajistit schopnost srovnání vlastností jednotlivých TOR produktů.

V první fázi této práce byly identifikovány parametry ovlivňující průběh experimentů, mezi které patří krátkodobý a dlouhodobý záběh těles, skluz, způsob a množství aplikovaného maziva a v neposlední řadě pak drsnost a geometrie vzniklých drážek na kontaktních tělesech. Ve druhé fázi pak proběhlo ověření jejich důležitosti, na základě čehož poté byla sestavena metodika experimentů a v poslední fázi pak proběhla její verifikace na třech TOR produktech, konkrétně na dvou TOR mazivech a jednom MT.

Získané výsledky ukázaly, že před započítáním experimentů je nezbytné kontaktní tělesa zaběhnout pro vytvoření drážky, ve které by se mohlo udržet aplikované mazivo. Dále byl prokázán výrazný vliv na skluz mezi kontaktními tělesy, na způsobu a množství aplikovaného maziva do kontaktu, v neposlední řadě pak i na stavu kontaktních těles, tedy na šířce a drsnosti drážek.

Všechny stanovené cíle práce byly splněny v celém jejich rozsahu. Byly identifikovány a následně experimentálně ověřeny parametry ovlivňující průběh experimentů. Na základě zjištění z provedených experimentů byla sestavena metodika testování TOR maziv pro kolejovou dopravu v laboratorním prostředí schopna srovnat vlastnosti jednotlivých maziv mezi sebou.

Při řešení práce vyvstaly některé otázky, které v rámci práce nebylo možné objasnit. Jako nejdůležitější se jeví podrobnější studium vývoje drsnosti a topografie povrchu kontaktních těles. Dále pak provést chemický rozbor povrchů drážek po několikadenním odstavení těles. V neposlední řadě pak provést zpřesnění aplikace maziva z důvodu odlišných viskozit jednotlivých TOR maziv. Vzhledem k odlišnému složení MT oproti TOR mazivům je nutné sestavit metodiku jejich testování reflektující odpařování vodní báze bezprostředně po jejich aplikaci do kontaktu.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Rail Industry Component: L.B. Foster Company: TOR XL-BarTM: Railroad Product Information - for Railroading Professionals*. [vid. 24. únor 2020]. Dostupné z: <https://www.progressiverailroading.com/railproducts/product.aspx?id=2556>
- [2] LEWIS, R. *Basic tribology of the wheel-rail contact*. UK: University of Sheffield. 2009, s. 34–57.
- [3] HARMON, M. a R. LEWIS. Review of top of rail friction modifier tribology. *Tribology - Materials, Surfaces and Interfaces*. 2016, roč. 10, č. 3, s. 150–162. ISSN 1751584X.
- [4] KVARDA, D. *Vliv složení modifikátorů tření na trakci v kontaktu kola a kolejnice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 83 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Radovan Galas. ISBN 9781845694128.
- [5] ZHU, Y. *Adhesion in the wheel-rail contact. Stockholm, 2013. Disertační práce. Royal Institute of Technology. Department of Machine Design. Vedoucí práce Prof. Ulf Olofsson*. 2013. ISBN 978-91-7501-896-6.
- [6] GALAS, R. *Friction Modification within Wheel-Rail Contact*. Brno, 2017, s. 110 p. PhD thesis. Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Machine and Industrial Design. Supervisor: prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
- [7] STOCK, Richard, Louisa STANLAKE, Chris HARDWICK, Marcia YU, Donald EADIE a Roger LEWIS. Material concepts for top of rail friction management – Classification, characterisation and application. *Wear*. 2016, roč. 366–367, s. 225–232. ISSN 00431648.
- [8] OLOFSSON, ulf. Adhesion and friction modification. *Wheel-Rail Interface Handbook*. 2009, s. 510–527.
- [9] LUNDMARK, J., E. KASSFELDT, J. HARDELL a B. PRAKASH. The influence of initial surface topography on tribological performance of the wheel/rail interface during rolling/sliding conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2009, roč. 223, č. 2, s. 181–187. ISSN 09544097.
- [10] GALLARDO-HERNANDEZ, E.A. a R. LEWIS. Twin disc assessment of wheel/rail adhesion. *Wear*. 2008, roč. 265, č. 9–10, s. 1309–1316. ISSN 00431648.
- [11] ARIAS-CUEVAS, O., Z. LI, R. LEWIS a E. A. GALLARDO-HERNÁNDEZ. Rolling-sliding laboratory tests of friction modifiers in dry and wet wheel-rail contacts. *Wear*. 2010, roč. 268, č. 3–4, s. 543–551. ISSN 00431648.
- [12] CHEN, H., S. FUKAGAI, Y. SONE, T. BAN a A. NAMURA. Assessment of lubricant applied to wheel/rail interface in curves. *Wear*. 2014, roč. 314, č. 1–2, s. 228–235. ISSN 00431648.
- [13] BUCKLEY-JOHNSTONE, L., M. HARMON, R. LEWIS, C. HARDWICK a R. STOCK. A comparison of friction modifier performance using two laboratory test scales. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2019, roč. 233, č. 2, s. 201–210. ISSN 20413017.

- [14] HARMON, M., J. F. SANTA, J. A. JARAMILLO, A. TORO, A. BEAGLES a R. LEWIS. Evaluation of the coefficient of friction of rail in the field and laboratory using several devices. *Tribology - Materials, Surfaces and Interfaces*. 2020, roč. 14, č. 2, s. 119–129. ISSN 1751584X.
- [15] ZHU, Y., U. OLOFSSON a K. PERSSON. Investigation of factors influencing wheel-rail adhesion using a mini-traction machine. *Wear*. 2012, roč. 292–293, s. 218–231. ISSN 00431648.
- [16] GALAS, Radovan, Daniel KVARDA, Milan OMASTA, Ivan KRUPKA a Martin HARTL. The role of constituents contained in water-based friction modifiers for top-of-rail application. *Tribology International*. 2018, roč. 117, č. August 2017, s. 87–97. ISSN 0301679X.
- [17] GALAS, Radovan, Milan OMASTA, Ivan KRUPKA a Martin HARTL. Laboratory investigation of ability of oil-based friction modifiers to control adhesion at wheel-rail interface. *Wear*. 2016, roč. 368–369, s. 230–238. ISSN 00431648.
- [18] HARMON, M. a R. LEWIS. New laboratory methodologies to analyse the top of rail friction modifier performance across different test scales. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2020, roč. 0, č. 0, s. 1–10. ISSN 20413017.
- [19] ARIAS-CUEVAS, Oscar. *Low Adhesion in the Wheel-Rail Contact Investigations towards a better understanding of the problem and its possible countermeasures*. nedatováno. ISBN 9789085705888.
- [20] PCS INSTRUMENTS. *MTM2 Mini-Traction Machine*. nedatováno [vid. 1. duben 2020]. Dostupné z: <https://pcs-instruments.com/wp-content/uploads/2017/01/MTM2-brochure-2017-Publisher-version-1.pdf>
- [21] *MTM | Products | PCS Instruments*. [vid. 25. únor 2020]. Dostupné z: <https://pcs-instruments.com/product/mtm/>
- [22] ŠPERKA, P. 3D Optický profilometr pro mapování inženýrských povrchů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2007, s. 83.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

3D	three-dimensional space
FMA	friction modifier A
FMB	friction modifier B
GL	grease lubricant
HPF	high positive friction
LCF	low coefficient of friction
MT	modifikátor tření
MTM	mini-traction-machine
OL	oil lubricant
Ra	roughness arithmetical
RTRI	Railway Technical Research Institute
SL	solid lubricant
SRR	slide-to-roll ratio
TOR	top-of-rail
VHPF	very high positive friction
WL	water-soluble lubricant
ξ	skluz
v	rychlost kola
ω	úhlová rychlost kola
r	poloměr kola
A	parametr mazání
F_f	síla třecí
F_T	síla trakční
F_N	síla normálová

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1-1	TOR aplikátor [1].....	13
Obr. 2-1	Základní názvosloví a rozložení sil v kontaktu kolo (modrá) a kolejnice (černá) [4]	14
Obr. 2-2	Schéma a) čistého skluzu, b) valení - upraveno [5].....	15
Obr. 2-3	Trakční křivka – upraveno [6]	15
Obr. 2-4	Pozitivní a negativní třecí charakteristika – upraveno [7].....	16
Obr. 2-5	Stribeckova křivka zobrazující režimy mazání [6].....	17
Obr. 2-6	Závislost součinitele tření na čase pro dvojice drsností: S – hladký, R – drsný [9].....	19
Obr. 2-7	Závislost hodnoty adheze na skluzu a kontaminaci kontaktu [10]	20
Obr. 2-8	Experiment při hodnotě skluzu 1 % [11].....	21
Obr. 2-9	Experiment při mokrých podmínkách a skluzu 2 % [11].....	22
Obr. 2-10	Vývoj součinitele adheze v závislosti na skluzu a použitém TOR produktu [12].....	23
Obr. 2-11	Vývoj součinitele adheze při 2% skluzu a zatížení 1 500 MPa [13].....	24
Obr. 2-12	Závislost hodnoty adheze na skluzu a tvrdosti materiálu [14]	24
Obr. 2-13	Vliv teploty na hodnotu adheze při tlaku 900 MPa; a) při použití vody, b) při použití oleje [15]	25
Obr. 2-14	Závislost hodnoty adheze na skluzu pro různé kontaminanty a drsnosti povrchů [15].....	26
Obr. 2-15	Graf závislosti adheze na čase pro mokrý film (vlevo) a suchý film (vpravo) [16]	27
Obr. 2-16	Průběh experimentu včetně záběhu [17].....	28
Obr. 2-17	Vývoj součinitele adheze při skluzu 2% a tlaku 1 500 MPa [13].....	29
Obr. 2-18	Závislost hodnoty adheze na skluzu při různých podmínkách [14].....	30
Obr. 2-19	Množství přeneseného MT na kolo v závislosti na aplikovaném množství a výšce aplikátoru [18].....	31
Obr. 2-20	Vliv rozdílných provozních parametrů na výsledném přenosu MT na kolo [18].....	32
Obr. 4-1	Pozorovatelné, proměnné s nastavitelné parametry	37

Obr. 4-2	Schéma popisující vývoj metodiky	39
Obr. 4-3	Definice adhezních pásem	40
Obr. 4-4	Schéma zařízení mini traction machine [20]	41
Obr. 4-5	Vyhodnocení drážky; a) disku, b) koule	42
Obr. 5-1	Suchý kontakt pro skluz 2 %; a) průběh experimentů, b) hodnoty adheze ..	43
Obr. 5-2	Vývoj kontaktních těles; a) šířka, b) drsnost	44
Obr. 5-3	Průběh experimentu pro skluz 2 %	45
Obr. 5-4	Průběh experimentu pro skluz 3 %	45
Obr. 5-5	Drážka disků po 5. experimentu; a) skluz 2 %, b) skluz 3 %.....	46
Obr. 5-6	Vliv způsobu aplikace pro 2 μ l maziva	47
Obr. 5-7	Srovnání průběhů experimentů pro různé způsoby aplikace	47
Obr. 5-8	Aplikace maziva pomocí přípravku; a) uchycení pipety do přípravku, b) přesnost aplikace do drážky	48
Obr. 5-9	Vliv dávkování do kontaktu pro 4 μ l maziva	49
Obr. 5-10	Srovnání průběhů experimentů pro různá dávkování maziva do kontaktu ..	49
Obr. 5-11	Ulpěné mazivo na pipetě	50
Obr. 5-12	Průběh experimentu pro 1 μ l.....	51
Obr. 5-13	Průběh experimentu pro 2 μ l.....	51
Obr. 5-14	Vliv aplikovaného množství pro 1, 2, 4 a 8 μ l.....	52
Obr. 5-15	Srovnání průběhů experimentů pro 1, 2, 4 a 8 μ l.....	53
Obr. 5-16	Vývoj drsnosti v čase	54
Obr. 5-17	Vývoj drsnosti pro 2 μ l	54
Obr. 5-18	Vývoj drsnosti pro 4 a 8 μ l	55
Obr. 5-19	Vývoj povrchů drážek; a) disk po experimentu, b) disk po mezi-záběhu, c) koule po experimentu, d) koule po mezi-záběhu	56
Obr. 5-20	Průběhy experimentů stanovující životnost těles pro 2 μ l maziva.....	57
Obr. 5-21	Vývoj šířky drážky těles pro 2 μ l maziva	57
Obr. 5-22	Povrch drážky disku; a) po 3. experimentu, b) po 5. experimentu	58
Obr. 5-23	Srovnání experimentů s dynamickou aplikací pro mazivo a olej	59
Obr. 5-24	Povrch drážky disku po experimentu s; a) mazivem, b) olejem.....	59

Obr. 5-25	Srovnání průběhů experimentů s drážkou a bez drážky.....	60
Obr. 5-26	Vývoj drsností při aplikaci oleje na zaběhlý disk	60
Obr. 5-27	Srovnání experimentů se statickou aplikací pro mazivo a olej	61
Obr. 5-28	Vývojový diagram navržené metodiky	62
Obr. 5-29	Schéma navržené metodiky	63
Obr. 5-30	Verifikace metodiky pro TOR mazivo A.....	64
Obr. 5-31	Verifikace metodiky pro TOR mazivo B.....	65
Obr. 5-32	Povrch drážky; a) disku, b) koule	65
Obr. 5-33	Verifikace metodiky pro MT	66
Obr. 5-34	Povrch drážky; a) disku, b) koule.....	66

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 2-1	Souhrn drsností testovacích vzorků [9]	18
Tab. 2-2	Provozní parametry experimentů [9].....	18
Tab. 2-3	Provozní parametry experimentů [10].....	19
Tab. 2-4	Provozní parametry experimentu [11].....	20
Tab. 2-5	Drsnosti kontaktních těles při experimentu za suchých podmínek [11]	21
Tab. 2-6	Provozní parametry experimentů [12].....	22
Tab. 2-7	Provozní parametry experimentů [13].....	23
Tab. 2-8	Provozní parametry experimentů [14].....	24
Tab. 2-9	Provozní parametry experimentů [15].....	25
Tab. 2-10	Provozní parametry experimentů [16].....	27
Tab. 2-11	Provozní parametry experimentů [17].....	28
Tab. 2-12	Provozní parametry experimentů [13].....	29
Tab. 2-13	Provozní parametry experimentů [14].....	30
Tab. 4-1	Výpis provozních parametrů jednotlivých experimentů	40
Tab. 4-2	Provozní parametry zařízení [21]	41
Tab. 4-3	Parametry použitých TOR produktů [23–26]	42

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Metodologie testování maziv pro temeno kolejnice pomocí tribometru kulička-disk

Příloha 1 – Metodologie testování maziv pro temeno kolejnice pomocí tribometru kulička-disk

Metodika je sestavena pro laboratorní tribometr v konfiguraci kulička-disk, konkrétně Mini-traction-machine. Pro experimenty jsou využívána kontaktní tělesa z nerezové oceli AISI 52 100, přičemž kulička má tvrdost 800–900 HV a drsnost $R_a=0,012 \mu\text{m}$ a disk má tvrdost 720–780 HV a drsnost $R_a=0,01 \mu\text{m}$. Parametry, které jsou nutné nastavit před započítáním každého experimentu, jsou:

- zátěžná síla 18 N,
- rychlost 1 m/s,
- skluz 2 %,
- frekvence zaznamenávání vývoje adheze 1 Hz.

Před započítáním celého experimentu jsou vyznačena 4 rovnoměrně rozložená místa na disku, a to po jeho okrajích. Tato místa poté slouží jako identifikátory míst, která se sledují v průběhu pomocí profilometru, jelikož je ve snaze sledovat vývoj vždy na stejných místech. Na kuličce je poté u díry vedoucí osou kuličky vyznačeno jedno místo, které spolu s protilehlým místem vůči této značce slouží také jako identifikátory sledovaných míst.

Je potřeba si dát pozor na častý jev, a to odlišnost chování prvního experimentu prováděného na nových, resp. zaběhlých kontaktních tělesech, který spočívá v rychlejším nárůstu adheze zpět na hodnotu suchého tření, jak je schematicky vyobrazeno na Obr. 3.

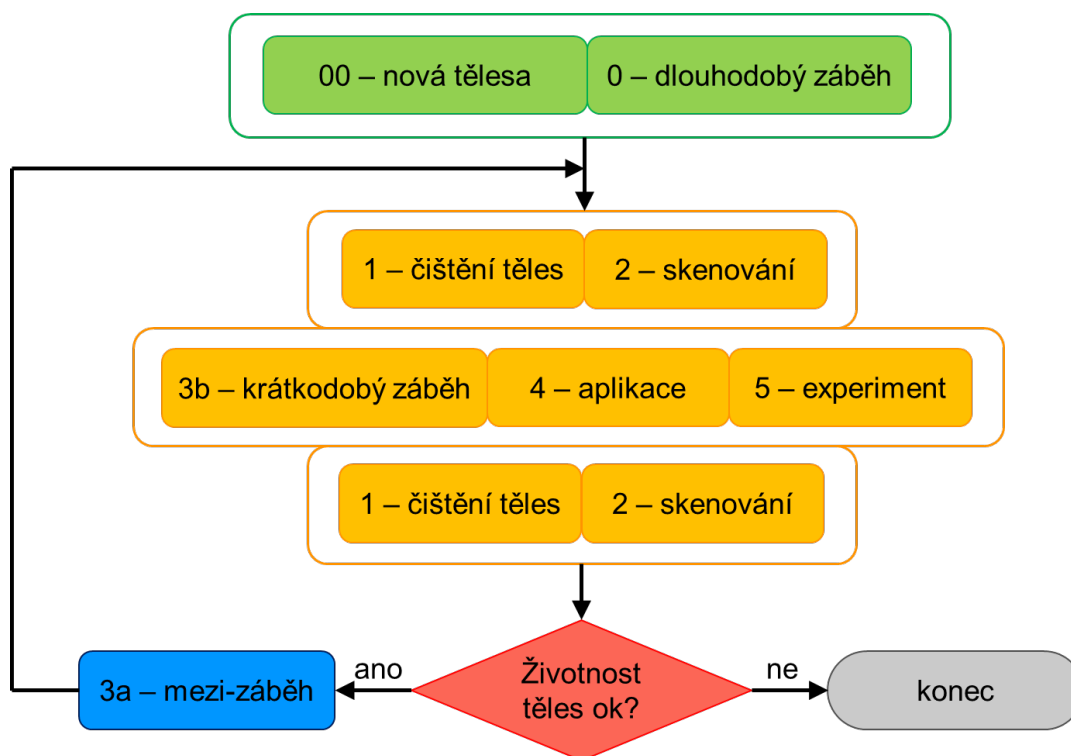
Experimenty na jedné kontaktní dvojici se musí vždy provádět pouze v jeden den. To z důvodu, že při jejich několikanásobném odložení a následném pokračování v experimentech dochází k odlišným vývojům všech experimentů, což nabeuráává jejich přesnost a opakovatelnost.

Jednotlivé kroky navržené metodologie jsou schematicky vyobrazeny na Obr. 5-291 a jsou následující:

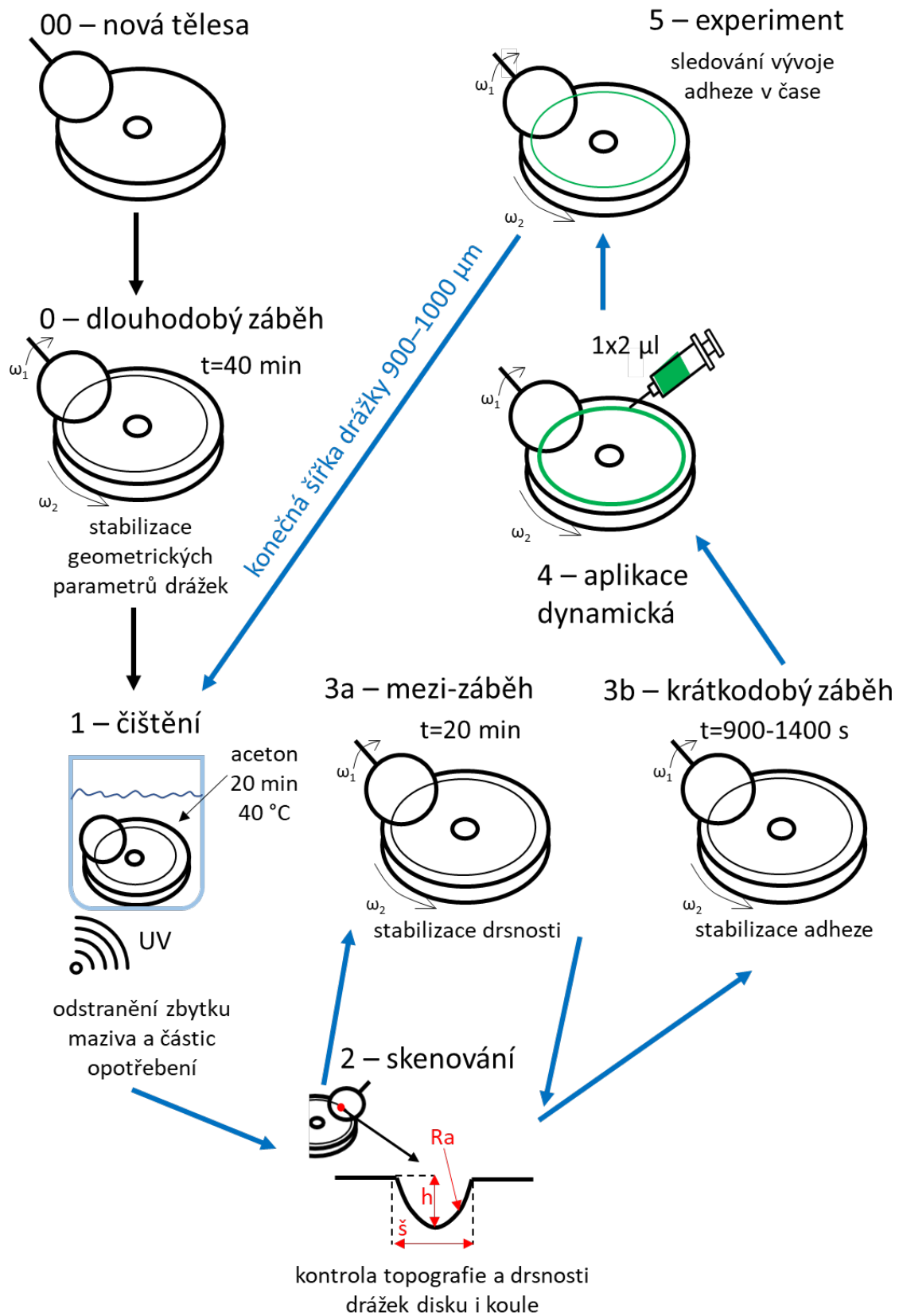
- 00) nová kontaktní tělesa očištěna ručně pomocí acetonu od konzervačního oleje
- 0) tělesa jsou upnuta do MTM a je proveden dlouhodobý záběh 40 min na nové kontaktní dvojici za suchého tření,
- 1) po všech experimentech jsou tělesa vždy očištěna pomocí ultrazvukové čističky v acetonové lázni a důkladně osušena, aby aceton netvořil mokré stopy viditelné na profilometru,
- 2) obě tělesa jsou naskenována pomocí profilometru Bruker, u disku jsou skenována 4 místa rovnoměrně od sebe vzdálena, na kuličce pak 2 protilehlá místa,
- 3a) tělesa jsou upnuta zpět do MTM a je proveden mezi-záběh, tedy 20 min test za suchého tření, který je realizován vždy jen po experimentu s aplikací maziva, a tedy není prováděn po dlouhodobém záběhu,

- 3b) tělesa jsou upnuta zpět do MTM a je proveden krátkodobý záběh, jehož doba je proměnlivá, ovšem interval jeho trvání je ve valné většině 900–1400 s, avšak vždy je potřeba vyčkat na ustálení adheze na hodnotě suchého tření, tedy 0,37–0,42, v mezičase, kdy probíhá krátkodobý záběh, je vždy důkladně promáčáno mazivo v jeho nádobě a nasáto několikanásobné množství oproti množství potřebnému pro aplikaci a vždy je několik prvních dávek aplikováno na papír, dokud se viditelně neustálí aplikované množství, aby se zabránilo nepřesné aplikaci maziva do kontaktu,
- 3) po ustálení adheze je na MTM upnut přípravek, do kterého je nasazena mikropipeta a následně se dynamicky aplikuje mazivo přímo do kontaktu a zkontroluje se, zda-li se aplikovalo celé požadované množství, a nebo jeho část ulpěla na hrotu pipety, přípravek je i s mikropipetou odejmut z MTM a zbylé mazivo se z mikropipety vrátí zpět do nádoby, aby pro další aplikaci mohlo být nasáto čerstvě promíchané mazivo,
- 4) nyní se již čeká na vývoj součinitele adheze do doby, než se ustálí na nějaké hodnotě a poté je experiment ukončen.

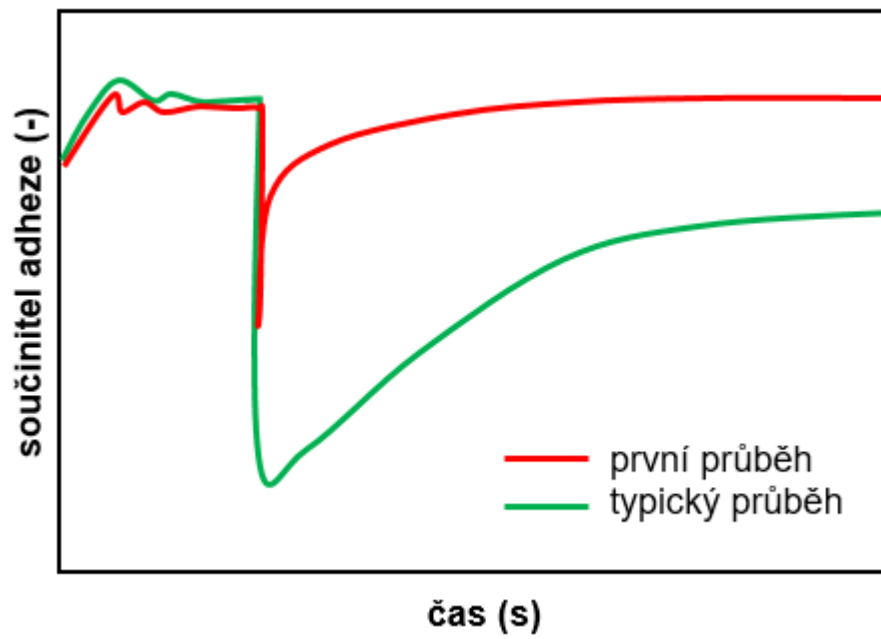
Pro zpřesnění průběhu celé série provedené na jedné kontaktní dvojici těles jsou jednotlivé kroky jdoucí za sebou vyobrazeny ve vývojovém diagramu na Obr. 5-282.



Obr. 1 Vývojový diagram navržené metodiky



Obr. 2 Schéma navržené metodiky



Obr. 3 Schéma průběhu prvního a typického experimentu