VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

VLIV POVRCHOVÝCH RÝH NA MAZÁNÍ BODOVÝCH KONTAKTŮ

THE EFFECT OF SURFACE GROOVES ON POINT CONTACTS LUBRICATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. KAMIL MATOUŠEK
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. PETR ŠPERKA, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování
Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Kamil Matoušek

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

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

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

Vliv povrchových rýh na mazání bodových kontaktů

v anglickém jazyce:

The effect of surface grooves on point contacts lubrication

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je popsat chování mazacího filmu při průchodu povrchu s rýhou bodovým kontaktem užitím optického tribometru. Práce má obsahovat vliv geometrie, maziva a provozních podmínek.

Cíle diplomové práce:

Diplomová práce musí obsahovat: (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci)
1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Analýza problému a cíl práce
4. Materiál a metody
5. Výsledky
6. Diskuze
7. Závěr
8. Seznam použitých zdrojů

Forma práce: průvodní zpráva, laboratorní protokol
Typ práce: experimentální; Účel práce: Specifický vysokoškolský výzkum
Výstup práce: publikace; Projekt: Specifický vysokoškolský výzkum
Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 - 50 stran textu bez obrázků)
Zásady pro vypracování práce:
http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2015.pdf
Šablona práce: http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK_sablona_praci.zip

Seznam odborné literatury:

1) STACHOWIAK, G. Engineering tribology. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005, xxiv, 801 s. ISBN 07-506-7836-4.

2) GOHAR, R. Elastohydrodynamics. 2nd ed. London: Imperial College Press, 2001, 446 s. ISBN 18-609-4170-2.

3) STACHOWIAK, G. Experimental methods in tribology. 1st ed. Amsterdam: Elsevier, 2004, xviii, 354 s. ISBN 04-445-1589-5.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Šperka, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 16. 11. 2014

L.S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá experimentálním studiem vlivu povrchových rýh na distribuci mazacího filmu v elastohydrodynamicky mazaném bodovém kontaktu. Tloušťka mazacího filmu je měřena pomocí aparatury typu kulička na disku využívající metody optické interferometrie - kolorimetrické interferometrie tenkých mazacích filmů. V této diplomové práci jsou popsány vlivy geometrie rýhy, maziva a provozních podmínek. Jednotlivé zkoumané vlivy jsou hodnoceny v závislosti na nově stanoveném parametru R_{GI} (poměr ovlivnění rýhou). Poměr ovlivnění rýhou je definován jako podíl tloušťky mazacího filmu ovlivněného rýhou a tloušťky mazacího filmu na hladkém povrchu.

KLÍČOVÁ SLOVA

tribologie, elastohydrodynamické (EHD) mazání, tloušťka mazacího filmu, rýha

ABSTRACT

This diploma thesis deals with experimental study of the effect of surface grooves on distribution of lubricant film in elastohydrodynamic lubricated point contact. Lubricant film thickness was measured by ball-on-disc apparatus using an optical interferometry technique - thin film colorimetric interferometry. The effects of groove geometry, lubricant and operating conditions were studied in this diploma thesis. The effects of these variables are evaluated based on newly suggested parameter R_{GI} (groove influence ratio). Groove influence ratio is defined as an influenced film thickness influenced by groove divided by film thickness for smooth surfaces.

KEYWORDS

tribology, elastohydrodynamic (EHD) lubrication, lubricant film thickness, groove

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MATOUŠEK, K. *Vliv povrchových rýh na mazání bodových kontaktů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 65 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Šperka, Ph. D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci *Vliv povrchových rýh na mazání bodových kontaktů* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Petra Šperky, Ph. D. a uvedl jsem v seznamu zdrojů všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně dne 22. května 2015 …..…….

vlastnoruční podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Petru Šperkovi, Ph. D. za jeho odborné vedení, podnětné připomínky, pomoc při prvních experimentech a další cenné rady, kterými mi pomohl k vypracování této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat mé rodině, přátelům a všem, kteří mi byli oporou a přispěli tak ke zvládnutí náročných okamžiků, které se během studia vyskytly.

OBSAH

ÚVOD **13**
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ **15**
1.1 Mazání a režimy mazání 15
1.1.1 Mezné mazání 16
1.1.2 Smíšené mazání 17
1.1.3 EHD mazání 17
1.1.4 Hydrodynamické mazání 17
1.2 Studie EHD mazání 18
1.3 Experimentální studie nerovností v EHD mazaném bodovém kontaktu 19
1.3.1 Experimentální studie vlivu povrchových rýh 19
2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE **28**
2.1 Zhodnocení poznatků získaných na základě rešerše 28
2.1.1 Závěry plynoucí z provedené rešerše 29
2.2 Cíl diplomové práce 29
3 MATERIÁL A METODY **30**
3.1 Zařízení pro tvorbu mikrotextur 30
3.2 Optický profilometr 31
3.3 Optický tribometr 32
3.3.1 Použitá maziva 33
3.4 Metodický přístup 34
3.4.1 Hodnocení geometrie rýhy 34
3.4.2 Příprava vzorků 34
3.4.3 Použité indentory a označení rýh 36
4 VÝSLEDKY **37**
4.1 Průchod rýhy bodovým kontaktem 37
4.1.1 Hodnocení tloušťky filmu ovlivněné rýhou 38
4.2 Vliv rychlosti 39
4.3 Vliv prokluzu 41
4.3.1 Délka ovlivněné oblasti 42
4.4 Vliv zatížení 43
4.5 Vliv maziva 44
4.6 Vliv geometrie rýhy 45
4.6.1 Soubor studovaných rýh 45
4.6.2 Vliv šířky rýhy 47
4.6.3 Vliv hloubky rýhy 48
4.6.4 Vliv úhlu rýhy 49
4.6.5 Vliv výstupků vzniklých plastickou deformací 50
5 DISKUZE **52**
5.1 Vliv rychlosti 52
5.2 Vliv prokluzu 53
5.3 Vliv zatížení 54
5.4 Vliv maziva 54
5.5 Vliv geometrie rýhy 55
5.5.1 Vliv nesymetričnosti rýhy 56
5.6 Opakovatelnost měření 57
6 ZÁVĚR **58**
7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ **59**

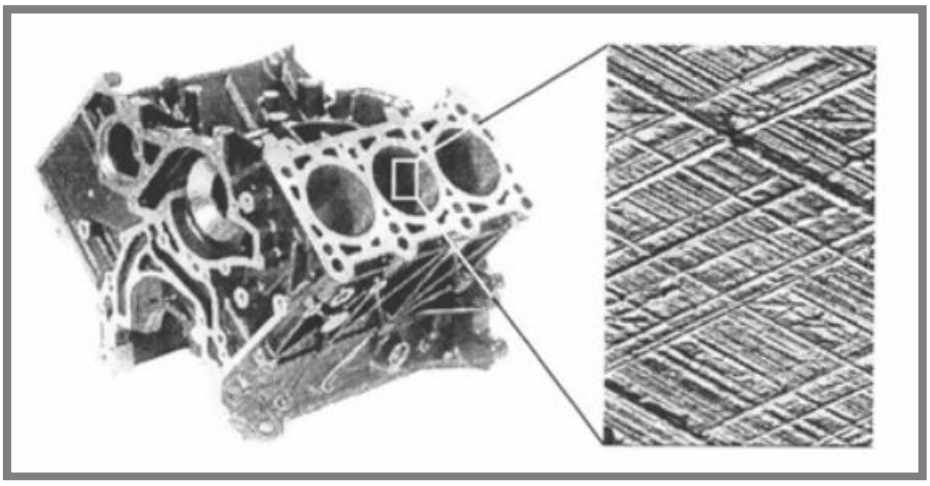
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ 62
8.1 Seznam použitých zkratek 62
8.2 Seznam použitých symbolů 62
9 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ 63
10 SEZNAM TABULEK 65

ÚVOD

V dnešní době nových technologií a rozvoje průmyslu je stále častěji kladen velký důraz na minimalizaci ztrát při chodu strojních součástí. Ztráty při chodu strojních součástí jsou nejčastěji způsobovány vlivem tření a opotřebení. Nadměrné tření a opotřebení ve strojních součástech může vést až k jejich výraznému poškození a v limitních případech i k úplnému znehodnocení součásti. Tření a opotřebení lze snižovat přívodem maziva do kontaktu, což vede k výraznému snížení ztrát. Věda, která spojuje a popisuje tření, opotřebení a mazání, se nazývá tribologie. Cílem tribologie je popisovat děje nastávající při vzájemném působení třecích povrchů při jejich relativním pohybu a využívat výsledky a poznatky k řešení technologických problémů [1].

Vznik opotřebení na povrchu strojních součástí je známkou toho, že dochází ke kontaktu povrchových nerovností. Kontakt povrchových nerovností nastává při přechodu z EHD režimu mazání do režimu smíšeného mazání.

Tribologická výzkumná skupina Ústavu konstruování (ÚK) sídlící v Brně na Fakultě strojního inženýrství (FSI) se již dlouhodobě zabývá problematikou EHD mazání. Přičemž předmětem zájmu v poslední době je studium povrchových nerovností a vyjádření jejich vlivu na utváření a rozložení mazacího filmu v bodovém kontaktu. Cílem tohoto studia je popsat a objasnit děje a mechanismy, které vedou k přechodu do režimu smíšeného mazání, a tím tedy ke kontaktu povrchových nerovností.



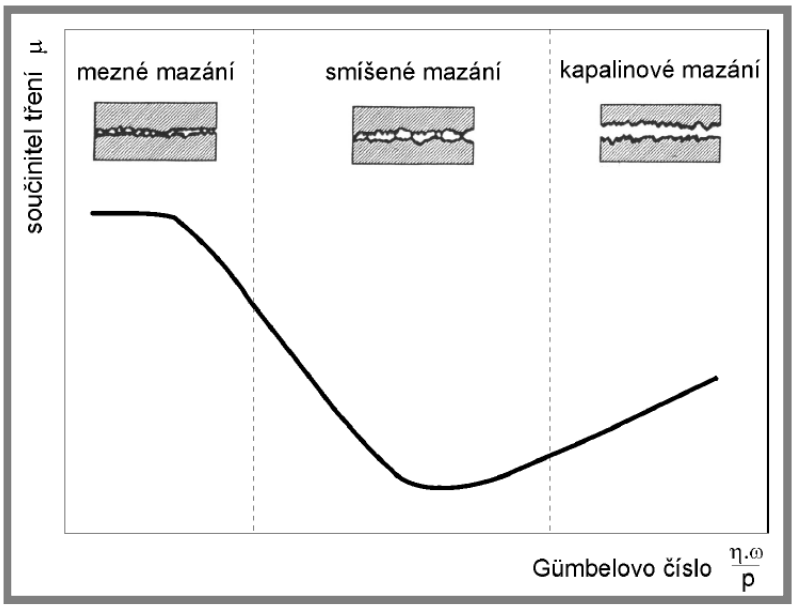
Obr. 1-1 Povrch strojních součástí [10]

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

1.1 Mazání a režimy mazání

Tribologický proces nazývaný mazání je jev, při kterém se přítomností maziva mezi třecími povrchy v relativním pohybu výrazně snižuje tření a opotřebení. Mazivo, jehož hlavní úlohou je zabránit bezprostřední interakci třecích ploch, může být v kapalném, plynném nebo pevném skupenství.

Jednotlivé režimy mazání se dají charakterizovat podle toho, zda jsou třecí povrchy odděleny koherentním mazacím filmem nebo dochází k bezprostřednímu styku třecích povrchů. K oddělení třecích povrchů souvislým mazacím filmem dochází u mazání hydrostatického, hydrodynamického, EHD a mazání vytlačovaným filmem. Naopak bezprostřední styk třecích povrchů nastává u mezného mazání a mazání tuhými mazivy. K soubornému znázornění jednotlivých režimů mazání slouží Stribeckova křivka (obr. 1-2). Tato křivka vyjadřuje závislost součinitele tření v kluzném radiálním ložisku na součinu dynamické viskozity maziva a úhlové rychlosti čepu, podělené tlakem. Tento součin je bezrozměrná veličina zvaná Gümbelovo číslo a v závislosti na jeho hodnotě lze definovat tři části Stribeckovy křivky, které odpovídají třem základním režimům mazání – meznému, smíšenému a kapalinovému. [3, 8]



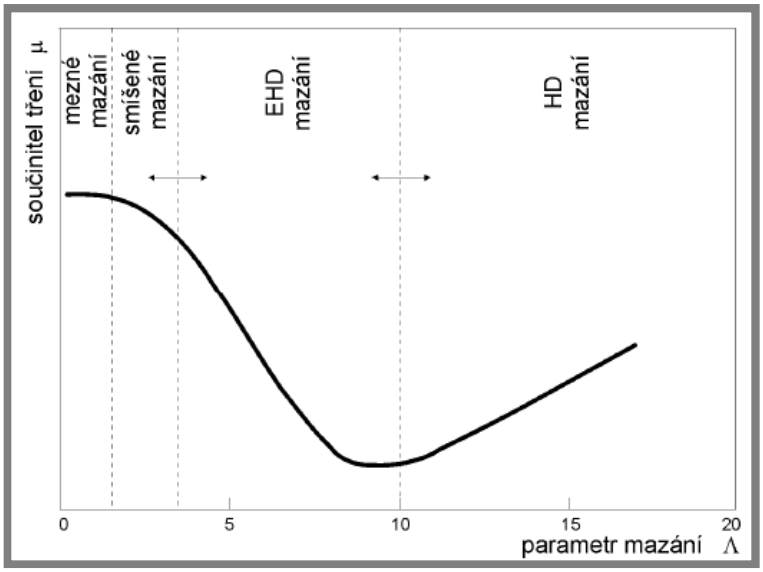
Obr. 1-2 Stribeckova křivka [8]

Režimy mazání lze také znázornit v závislosti (obr. 1-3) součinitele tření na parametru mazání *Λ*. Parametr mazání porovnává tloušťku mazacího filmu, který odděluje třecí povrchy, s průměrnou kvadratickou úchylkou profilu kontaktních těles a je definovaný jako [3]:

$$\Lambda = \frac{h_{min}}{R_{red}} = \frac{h_{min}}{\sqrt{Rq_a^2 + Rq_b^2}} \tag{1}$$

Kde:

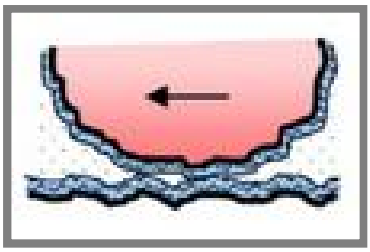
Λ		- parametr mazání
h_{min}	µm	- minimální tloušťka filmu
R_{red}	µm	- redukovaná kvadratická úchylka třecích povrchů
Rq_a	µm	- průměrná kvadratická úchylka profilu tělesa a
Rq_b	µm	- průměrná kvadratická úchylka profilu tělesa b



Obr. 1-3 Závislost součinitele tření na parametru mazání [9]

1.1.1 Mezné mazání

Jedná se o režim mazání, při kterém nastává vzájemný kontakt mezi povrchovými nerovnostmi třecích povrchů, které se nacházejí v bezprostřední blízkosti. U tohoto režimu mazání je zatížení přenášeno velmi tenkým mezným film (obr. 1-4), který má minimální tloušťku přibližně 5 až 100 nm a vzniká chemickými nebo fyzikálními reakcemi třecích povrchů a maziva [2, 9].

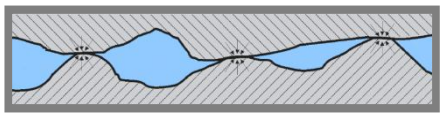


Obr. 1-4 Mezné mazání [4]

1.1.2 Smíšené mazání

1.1.2

K tomuto režimu mazání dochází zejména při velkém zatížení, relativně malých rychlostech třecích povrchů a při změně směru jejich pohybu. Tento režim je kombinací mezného a kapalinového mazání. Třecí povrchy nejsou plně oddělovány hydrodynamickým mazacím filmem, dochází tedy k vzájemnému kontaktu jejich povrchových nerovností. Tyto povrchové nerovnosti se deformují a v místě jejich styku nastává režim mezného mazání, naopak v dalších oblastech kontaktu nastává mazání kapalinové. Minimální tloušťka mazacího filmu u tohoto režimu mazání je přibližně 0,01 až 1 μm [2, 3, 9].

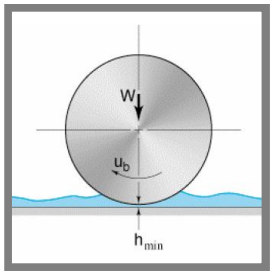


Obr. 1-5 Smíšené mazání [9]

1.1.3 EHD mazání

1.1.3

Je režim kapalinového mazání, při kterém jsou elastické deformace třecích povrchů řádově srovnatelné s tloušťkou mazacího filmu. EHD mazání nastává u zatížených a nekonformně zakřivených třecích ploch, které jsou v relativním pohybu. Minimální tloušťka filmu u EHD režimu mazání je 0,01 až 10 μm a maximální tlak v kontaktu je 0,5 až 5 GPa [2, 3, 9].

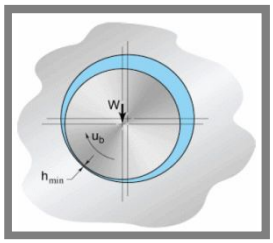


Obr. 1-6 EHD mazání [9]

1.1.4 Hydrodynamické mazání

1.1.4

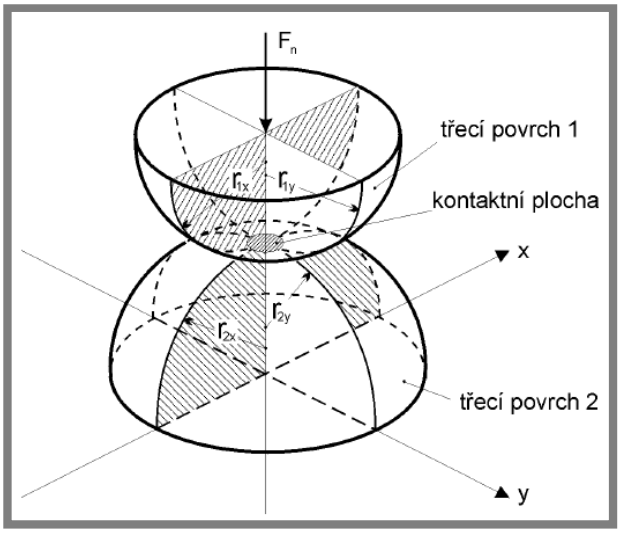
Jedná se o režim kapalinového mazání, který nastává u konformně zakřivených třecích ploch nacházejících se v relativním pohybu. U hydrodynamického mazání dochází k úplnému oddělení třecích ploch souvislým mazacím filmem. Hydrodynamický tlak v mazacím filmu, který je generovaný relativním pohybem těles, přenáší zatížení třecích povrchů, přičemž nedochází k deformaci těchto povrchů. Minimální tloušťka mazacího filmu u hydrodynamického mazání je větší než 1 μm a maximální tlak v kontaktu je přibližně 5 MPa [2, 3, 9].



Obr. 1-7 Hydrodynamické mazání [9]

1.2 Studie EHD mazání

V předchozí kapitole již bylo popsáno, že EHD mazání je režim kapalinového mazání, ke kterému dochází u nekonformně zakřivených třecích ploch v relativním pohybu, a že tloušťka EHD mazacího filmu je přibližně stejně velká jako elastické deformace třecích povrchů. EHD mazání se podle tvaru třecích ploch dá rozdělit na EHD mazání liniových kontaktů a EHD mazání bodových kontaktů (obr. 1-8).



Obr. 1-8 Kontakt nekonformních těles [3]

Teorie EHD mazání vychází ze dvou základních prací, z Hertzovy teorie styku elastických těles a z Reynoldsovy teorie hydrodynamického mazání, které jsou více než sto let staré. K prvnímu úspěšnému vyjádření analytického řešení tloušťky EHD mazacího filmu v liniovém kontaktu došlo roku 1949 Grubinem. Na jeho práci bylo navázáno o dva roky později Petruševičem, kterým byly potvrzeny tři základní znaky EHD kontaktu předpovídané Grubinem. Prvním znakem EHD kontaktu je, že v centrální oblasti kontaktu je tenká vrstva mazacího filmu, přičemž tloušťka tohoto mazacího filmu náhle klesá ve výstupní oblasti kontaktu. V této výstupní oblasti kontaktu, kde náhle klesá tloušťka filmu, se nachází druhé tlakové maximum (Petruševičovo), přičemž tlak v mazacím filmu přibližně odpovídá Hertzovu rozložení.

Po potvrzení těchto základních znaků EHD kontaktu docházelo ke zkoumání různých metod numerického řešení EHD mazaných liniových kontaktů, jejichž hlavní nevýhodou ovšem byla velmi pomalá a omezená konvergence. Až roku 1959 se podařilo autorům Dowsonovi a Higginsovi [5] přijít s novým přístupem numerického řešení a byly vyjádřeny rovnice pro minimální a centrální tloušťku mazacího filmu v liniovém kontaktu. Následně se Dowsonovi, tentokrát společně s Hamrockem [6], v publikaci z roku 1977 podařilo vyjádřit i vztahy pro minimální a centrální tloušťku mazacího filmu v EHD mazaném bodovém kontaktu.

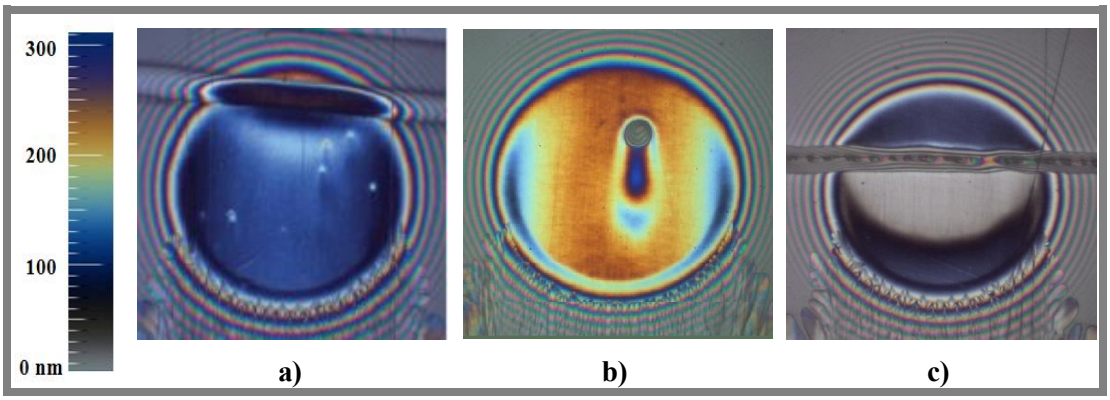
Tyto teoretické poznatky pak byly v mnoha studiích experimentálně ověřovány. I když byla teorie EHD mazání hladkých povrchů dostatečně popsána a ověřena, tak za skutečných podmínek je ale chování mazacího filmu mnohem komplexnější, zejména vlivem drsnosti třecích povrchů. Proto se vědecké skupiny od této doby začaly zabývat studiem povrchů s povrchovými nerovnostmi. Přičemž se jednalo o nerovnosti na reálných površích i uměle vytvořené nerovnosti [3, 4].

1.3 Experimentální studie nerovností v EHD mazaném bodovém kontaktu

1.3

V experimentálních pracích, které se doposud zabývaly vlivem povrchových nerovností na mazání bodových kontaktů, se studovaly vlivy třech základních modelových nerovností a to:

- výstupků (obr. 1-9*a*)
- dentů (obr. 1-9*b*)
- rýh (obr. 1-9*c*)



Obr. 1-9 Povrchové nerovnosti: a) výstupek, b) dent, c) rýha [24]

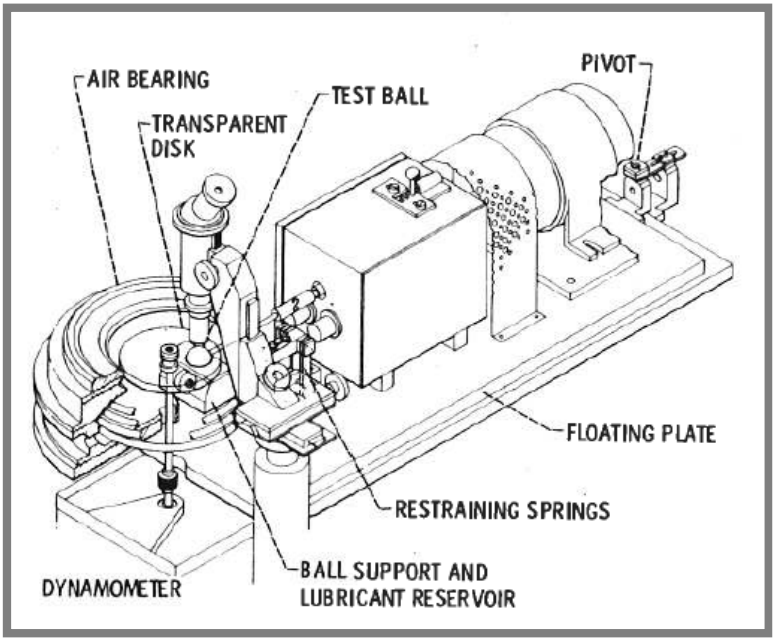
Všechny tyto typy experimentálně zkoumaných nerovností jsou při průchodu bodovým kontaktem zobrazeny na obr. 1-7, v jehož levé části je stupnice v nanometrech, která přiřazuje jednotlivým interferenčním barvám hodnotu tloušťky mazacího filmu. V experimentálních studiích [11, 12, 13] již bylo dokázáno, že deformace výstupků v bodovém kontaktu (i když je jejich výška větší, než je střední tloušťka mazacího filmu) je natolik velká, že nedochází ke styku třecích povrchů. Dále bylo objasněno, že denty [14, 15, 16] při průchodu bodovým kontaktem vedou pouze k lokálnímu snížení tloušťky mazacího filmu. Na vstupu do kontaktu se v nich mazivo zachycuje a následným postupem kontaktní oblastí tloušťku mazacího filmu zvyšuje. Zatímco rýhy můžou vést i k úplnému protržení mazacího filmu, a tím tedy ke kontaktu třecích povrchů (viz obr. 1-9*c*). Jelikož se tato diplomová práce zabývá vlivem povrchových rýh na mazání bodových kontaktů, budou v této kapitole detailněji rozebrány pouze experimentální práce, které se věnovaly právě problematice vlivu rýh na utváření mazacího filmu v bodovém kontaktu.

1.3.1 Experimentální studie vlivu povrchových rýh

1.3.1

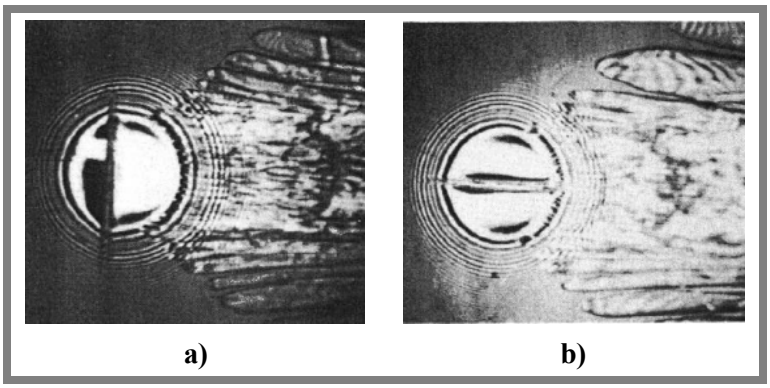
Jednou z prvních experimentálních studií problematiky vlivu povrchových rýh na distribuci mazacího filmu v EHD mazaném bodovém kontaktu je práce Wedevena a Cusana [17] z roku 1979. V jejich práci bylo využito k měření EHD tloušťky mazacího filmu metody optické interferometrie. K experimentům byl použit simulátor (obr. 1-10) typu ball on disc, u kterého byla jako kontaktní dvojice užita ocelová kulička a skleněný disk s tenkou vrstvou chromu. Měření interference bylo provedeno pomocí vlnových délek červené a zelené barvy, které byly získány použitím speciálního filtru a xenonové lampy použité jako světelného zdroje. Všechna měření probíhala za pokojové teploty 23 °C a jako mazivo byl použit

syntetický olej s označením XRM 109F3. Při podmínkách čistého valení a čistého skluzu byly zkoumány uměle vytvořené rýhy.



Obr. 1-10 Simulátor kontaktu typu ball on disc [17]

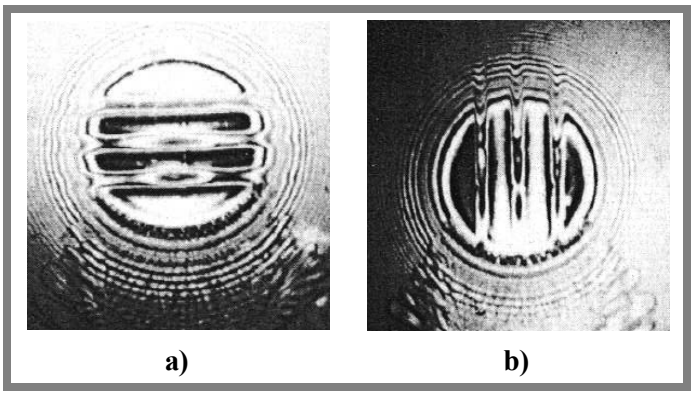
Výsledky experimentů byly porovnávány s nedeformovaným profilem zkoumaných nerovností při statickém kontaktu tak, aby mohly být stanoveny deformace třecích povrchů zapříčiněné vznikem mikroelastohydrodynamického (zkráceně µEHD) tlaku. Dále pak byl studován vliv orientace rýhy vzhledem ke směru toku maziva, a to pro kolmo (obr. 1-11*a*) a rovnoběžně (obr. 1-11*b*) natočenou rýhu. Při rovnoběžné orientaci byla zkoumána rýha o hloubce 0,55 µm a šířce 35 µm. Pro orientaci rýhy kolmo vzhledem k toku maziva pak byly zkoumány dvě rýhy o stejných šířkách 40 µm, ale odlišných hloubkách 1 µm a 0,5 µm.



Obr. 1-11 Interferogram s rýhou orientovanou vzhledem k toku maziva: a) kolmo b) rovnoběžně [17]

Pro čisté valení byl při experimentech pozorován pokles nominální tloušťky mazacího filmu v porovnání s průchodem hladkého povrchu při stejných pracovních podmínkách, jak pro povrch s rýhou orientovanou kolmo ke směru toku maziva, tak pro rovnoběžnou orientaci rýhy. Nicméně pokles tloušťky mazacího filmu byl vždy větší u rýhy orientované kolmo. Při podmínkách čistého skluzu byly efekty μEHD mnohem dominantnější opět pro kolmou orientaci rýhy vzhledem k toku maziva. Experimenty dále také ukázaly, že rýhy vedou k daleko většímu narušení rozložení mazacího filmu v kontaktní oblasti při podmínkách čistého skluzu než za podmínek čistého valení.

Další publikace autorů Cusana a Wedevena [18] z roku 1981 navazuje na jejich předchozí práci z roku 1979. V této práci již ovšem nebyla sledována pouze jedna rýha, ale při průchodu bodovým kontaktem byl zkoumán soubor několika rýh v těsné blízkosti vedle sebe. Opět byly studovány deformace nerovností za podmínek čistého valení a čistého skluzu a byl také porovnáván vliv orientace nerovností při orientaci kolmo (obr. 1-12*a*) a rovnoběžně (1-12*b*) vzhledem k proudění maziva.

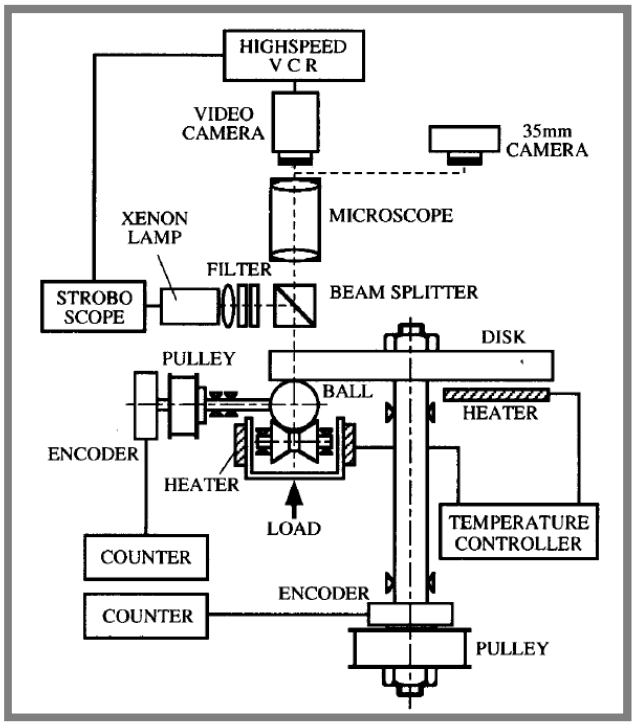


Obr. 1-12 Interferogram s rýhami orientovanými vzhledem k toku maziva: a) kolmo b) rovnoběžně [17]

Výsledky korespondovaly s předchozí prací, tudíž za podmínek čistého skluzu byly deformace nerovností více zřetelné než za podmínek čistého valení, s výjimkou souboru rýh orientovaných rovnoběžně vzhledem ke směru toku, u kterých byly deformace při čistém valení a čistém skluzu téměř srovnatelné. Autory byla tato odlišnost vysvětlena tím, že při rovnoběžné orientaci rýh vzhledem k toku maziva se při průchodu kontaktní oblastí jen nepatrně mění jejich geometrie, čímž přítomnost skluzu natolik výrazně nenaruší děje spojené s μEHD.

Velkým přínosem k této problematice byly práce Kanety [19, 20]. Ke zkoumání vlivu povrchových rýh na rozložení tloušťky mazacího filmu v mazaném bodovém kontaktu bylo využito experimentální aparatury zobrazené na obr. 1-13. Podobně jako u aparatury využité Wevedenem a Cusanem [17, 18] se jedná o simulátor kontaktu typu ball on disc, tedy kontakt kuličky a disku. U tohoto simulátoru byla jako kontaktní dvojice využita ocelová kulička o průměru 25,4 mm a skleněný disk o průměru 165 mm a tloušťce 12 mm, jehož kontaktní plocha byla opatřena semireflektivní vrstvou chromu za účelem zvýšení kontrastu snímaných interferogramů. Kulička a disk byly odděleně poháněny převody s ozubenými

řemeny a řízeny pomocí motorů s proměnnými otáčkami. Rychlost kuličky a disku mohla být měřena pomocí rotačních enkodérů, které byly připevněny k jednotlivým koncům hřídele. Tvar a tloušťka mazacího filmu v bodovém EHD mazaném kontaktu byla měřena pomocí metody optické interferometrie. Odražené paprsky z kontaktu, který byl osvětlován xenonovým světelným zdrojem, byly snímány vysokorychlostní VCR kamerou a 35mm kamerou připojenou k mikroskopu.



Obr. 1-13 Experimentální aparatura [19]

V Kanetově [19] práci zabývající se problematikou rýh, která byla publikována roku 1992, byla zkoumána rýha o šířce 0,12 mm a hloubce 6 µm. V této práci již nebyly uvažovány pouze podmínky čistého valení a čistého skluzu jako v pracích Wevedena a Cusana, ale byl zkoumán i vliv tzv. *„slide/roll ratio“* (*SRR*), tedy poměru skluz/valení vyjádřeného vztahem:

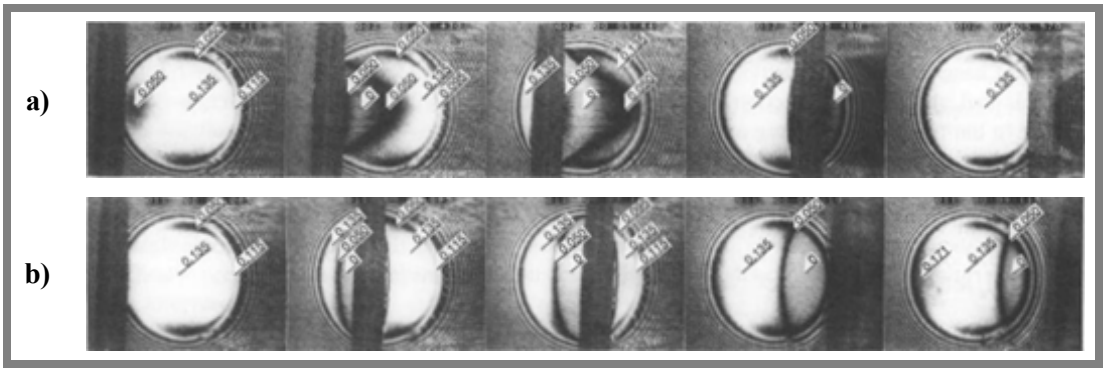
$$SRR = \frac{2(u_D - u_B)}{(u_D + u_B)} \tag{2}$$

Kde:

SRR		- poměr skluz/valení
u_D	$m \cdot s^{-1}$	- rychlost disku
u_B	$m \cdot s^{-1}$	- rychlost kuličky

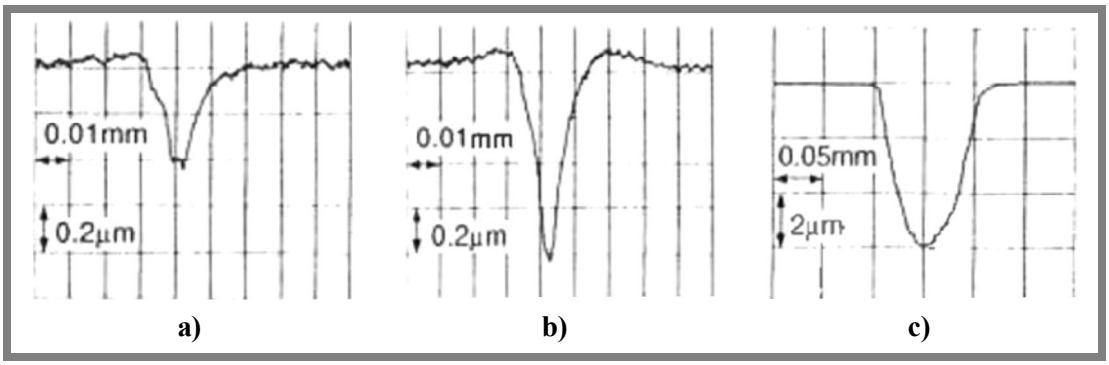
Poměr *SRR* může nabývat libovolné hodnoty. Pro čistý skluz platí *SRR* = 2 nebo -2. Pro čisté valení je *SRR* = 0. Pro |*SRR*| > 2 se povrchy nacházejí v relativním pohybu proti sobě. Pro hodnotu *SRR* mezi 2 a -2, s výjimkou hodnoty 0, se pak jedná o valení s částečným skluzem [21].

Ve studii z roku 1992 bylo pozorováno Kanetou [19], že v určité oblasti kontaktu za rýhou (pro *SRR* < 0) a před rýhou (pro *SRR* > 0) došlo k úplnému protržení mazacího filmu a k poklesu tloušťky mazacího filmu na nulu (obr. 1-14). Byl vyvozen závěr, že tento jev je způsoben zachycením maziva rýhou a jeho následným výtokem bokem rýhy, přičemž vlivem nedostatku maziva v kontaktu od sebe třecí povrchy nejsou separovány a dochází k jejich bezprostřednímu styku. Dále pak bylo vyjádřeno, že pokud je rychlost kuličky s rýhou větší, než je rychlost hladké plochy disku (obr. 1-14*b*), tak film před rýhou není nikdy rýhou ovlivněn, protože mazivo před rýhou je vtahováno hladkou plochou disku do kontaktní oblasti. Nicméně pokud je střední rychlost maziva pomalejší, než je rychlost rýhy procházející kontaktní oblastí, vrstva mazacího filmu se nikdy nevytvoří v určité oblasti mezi koncovou hranou rýhy a mazivem nově přiváděným do kontaktní oblasti. K dosažení plné tloušťky mazacího filmu dojde ve chvíli, kdy rýha opustí kontaktní oblast. Naopak pokud má kulička s rýhou pomalejší rychlost, než je rychlost hladkého povrchu disku (obr. 1-14a), ačkoliv od té doby je střední rychlost maziva rychlejší než rychlost rýhy, film v určité oblasti před rýhou se protrhne kompletně. K dosažení plné tloušťky mazacího filmu dojde opět ve chvíli, kdy rýha opustí kontaktní oblast.



Obr. 1-14 Průchod rýhy bodovým kontaktem: a) *SRR* = 1,5, b) *SRR* = -1,5 [19]

Další Kanetovou [20] prací, která se zabývá problematikou povrchových rýh, je práce z roku 1994. V této práci nebyla zkoumána již pouze jedna rýha, ale byly studovány 3 rýhy různých šířek a hloubek tak, jak je zobrazeno na obr. 1-15.



Obr. 1-15 Profily zkoumaných rýh: a) typ A, b) typ B. c) typ C [20]

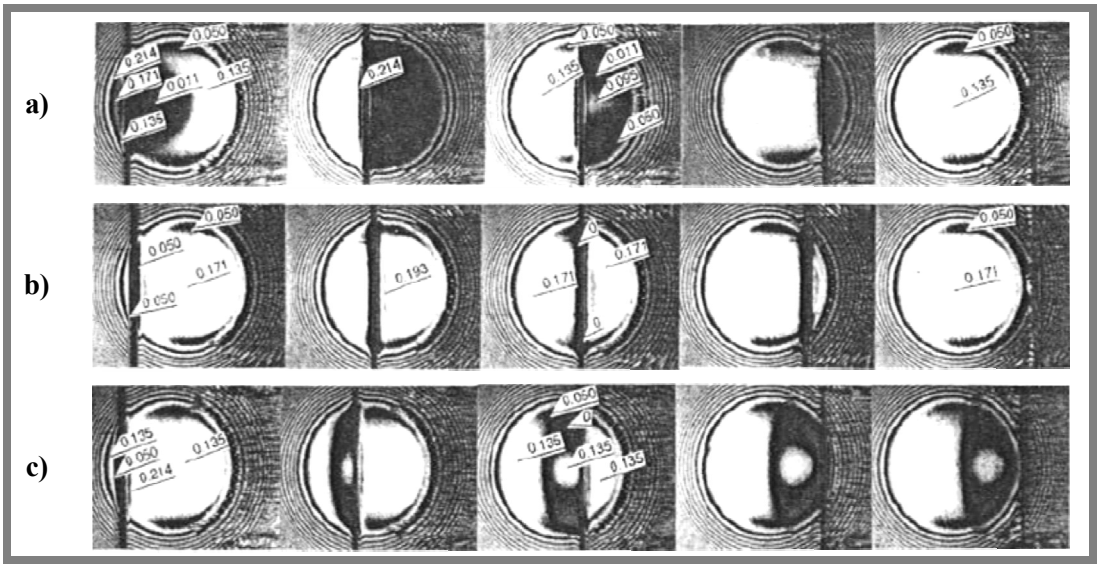
Dále pak experimenty nebyly zaměřovány pouze na valení s částečným skluzem, ale i na čisté valení (*SRR* = 0). Všechny experimenty s těmito rýhami probíhaly při maximálním Hertzově tlaku 0,54 GPa, teplotě oleje na vstupu do kontaktu 21,5 ± 0,8 °C a za dvou různých rychlostí vyjádřených bezrozměrným parametrem rychlosti *U*, který je dán vztahem:

$$U = \frac{\eta_0(u_D+u_B)}{2E'R} \tag{3}$$

Kde:

U		- bezrozměrný parametr rychlosti
u_D	$m \cdot s^{-1}$	- rychlost disku
u_B	$m \cdot s^{-1}$	- rychlost kuličky
R	mm	- poloměr kuličky
η_0	Pa·s	- viskozita za atmosférického tlaku
E'	GPa	- redukovaný modul pružnosti

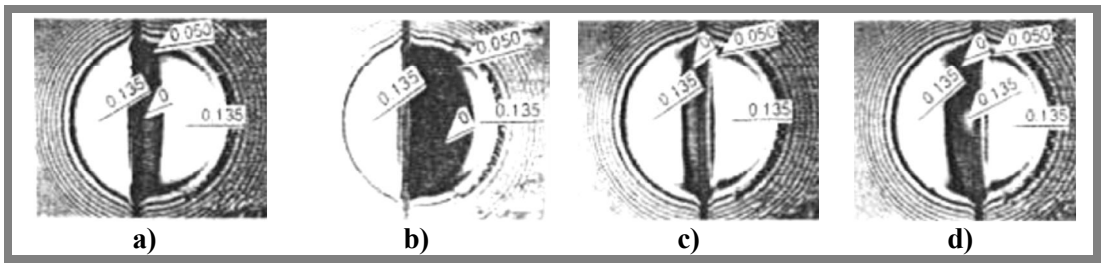
Obr. 1-16 zobrazuje interferogramy získané při průchodu rýhy typu B, která je zobrazena na obr. 1-15*b,* různými pozicemi kontaktu při hodnotě bezrozměrného parametru rychlosti $U = 9 \cdot 10^{-12}$ a při hodnotách *SRR* = 1,5; -1,5 a 0. Na interferogramech jsou vyjádřeny hodnoty tloušťky filmu v µm.



Obr. 1-16 Průchod rýhy typu B kontaktem při $U = 9 \cdot 10^{-12}$ a pro *SRR*: a) 1,5, b) 0, c) -1,5 [20]

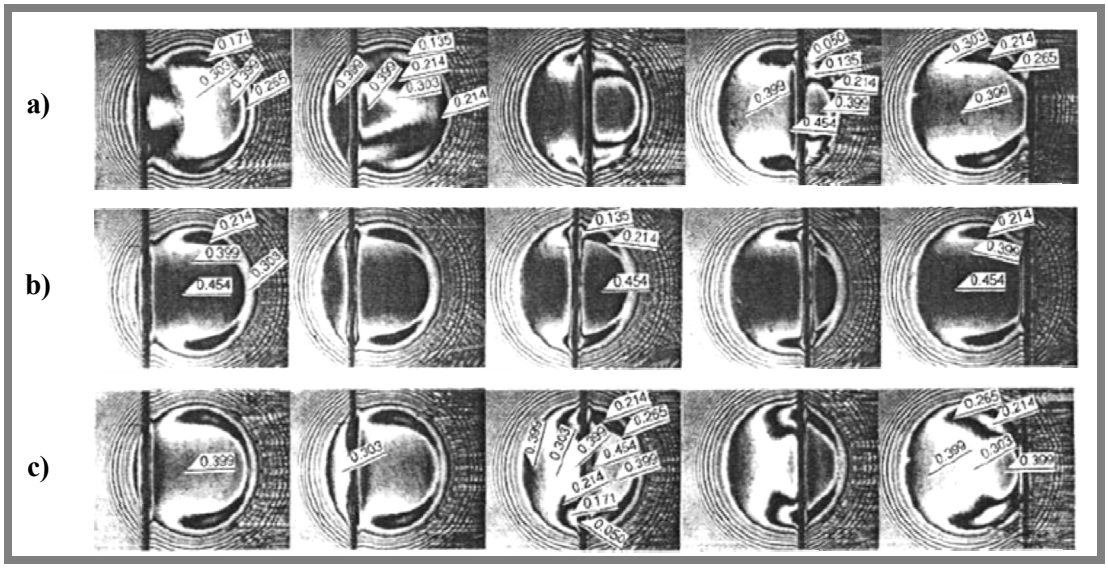
Pro hodnoty *SRR* = -1,5 a 1,5 byly pozorovány stejné efekty jako v předchozí práci z roku 1992, tedy že pro *SRR* = 1,5 dochází k výraznému poklesu tloušťky filmu před rýhou, naopak pro *SRR* = -1,5 toto ovlivnění tloušťky nastává za rýhou. Tyto výsledky korespondovaly s předchozími výsledky experimentů provedených pro rýhu jiné šířky a hloubky. Pro hodnotu poměru *SRR* = 0 (pro podmínky čistého valení) pak bylo pozorováno, že tloušťka mazacího filmu při průchodu povrchu s rýhou je přibližně stejná jako při průchodu hladkého povrchu. Vliv rýhy na tloušťku mazacího filmu je lokalizovaný pouze v místě těsné blízkosti rýhy. Dále také v této studii byly provedeny experimenty i pro další čtyři hodnoty poměru *SRR*

(0,5; -0,5; 1 a -1). Na základě těchto experimentů pak bylo vyjádřeno, že při zmenšování hodnoty poměru *SRR* se zmenšuje i délka oblasti, v které dochází k poklesu tloušťky mazacího filmu vlivem rýhy. Interferogramy z těchto experimentů jsou pro jednotlivé hodnoty *SRR* zobrazeny na obr. 1-17.



Obr. 1-17 Interferogramy s rýhou typu B v kontaktní oblasti pro *SRR*: a) 0,5, b) 1, c) -0,5, d) 1 [20]

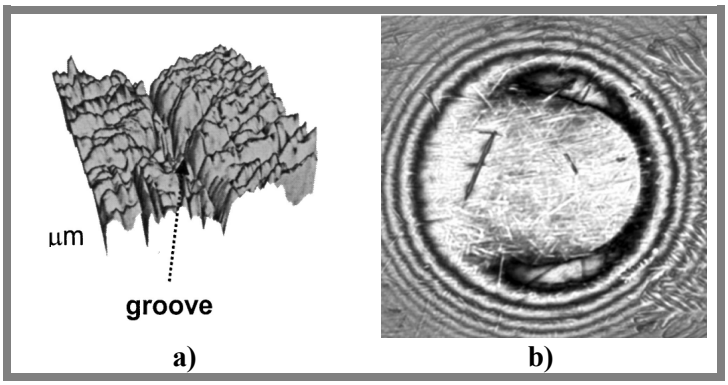
S rýhou typu B (obr. 1-15) také byly provedeny experimenty při další hodnotě bezrozměrného parametru rychlosti $U = 4 \cdot 10^{-11}$. Interferogramy získané z tohoto experimentu jsou zobrazeny na obr. 1-18 pro hodnoty *SRR* = 1,5; -1,5 a 0.



Obr. 1-18 Průchod rýhy typu B kontaktní oblastí při $U = 4 \cdot 10^{-11}$ a pro *SRR*: a) 1,5, b) 0, c) -1,5 [20]

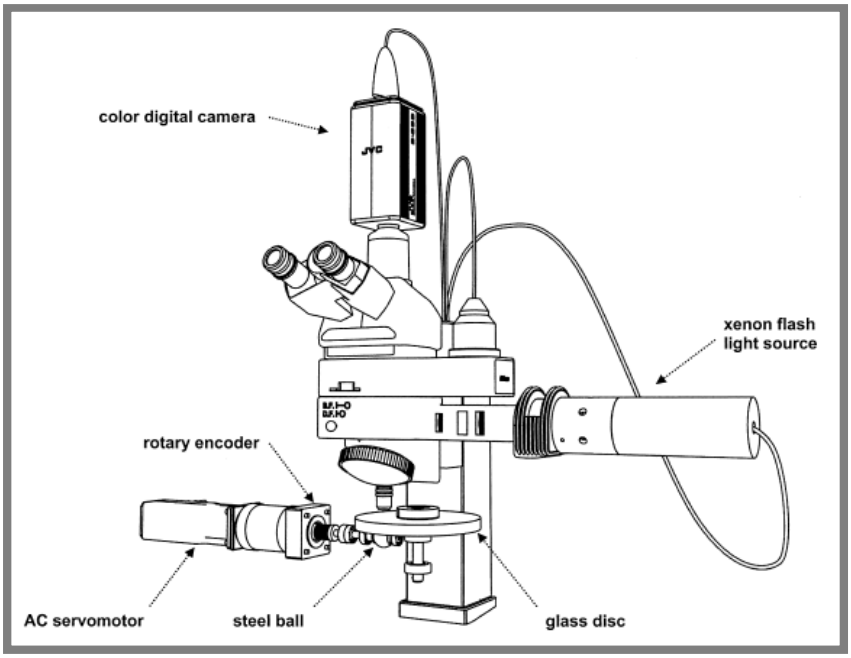
Z experimentů provedených s těmito rýhami o různé šířce a hloubce, při různých hodnotách poměru *SRR* a pro dvě různé hodnoty parametru *U* pak bylo vyvozeno několik nových poznatků. V předchozí práci již bylo objasněno, že boční výtok rýhou způsobuje pokles tloušťky mazacího filmu. V této studii pak bylo doplněno, že se zvyšováním rychlosti, tím pádem se zvyšováním tloušťky mazacího filmu, dochází ke snížení množství maziva vytečeného bokem rýhy, a proto k menšímu poklesu tloušťky mazacího filmu v kontaktu vlivem průchodu povrchu s rýhou. Dále pak bylo vyjádřeno, že výtok bokem rýhy je řízený šířkou a hloubkou rýhy a také celkovou tloušťkou mazacího filmu. Tedy že zvyšováním tloušťky mazacího filmu a snižováním hloubky a šířky rýhy se dá předcházet úplnému protržení mazacího filmu nebo jeho lokální redukci v kontaktu.

Jednou z novějších prací zabývající se problematikou rýh je práce Hartla [22] z roku 2004. Článek prezentuje experimentální studii vlivu mikrorýhy nacházející se na reálném povrchu na tloušťku filmu v EHD mazaném bodovém kontaktu. Hloubka této mikrorýhy byla 90 nm a její délka nebyla větší, než byl průměr kontaktní oblasti, jak je možné vidět na interferogramu na obr. 1-19*b*.



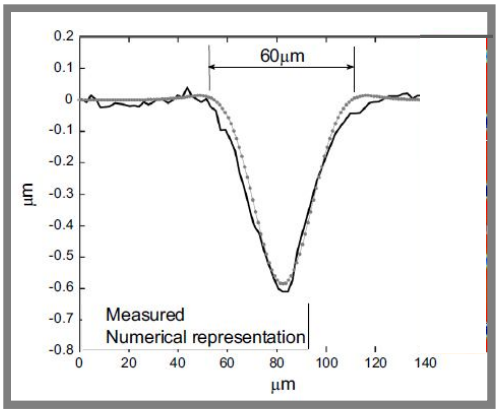
Obr. 1-19 Rýha na reálném povrchu: a) topografie, b) v kontaktní oblasti [22]

Při experimentech byl využit optický tribometr (obr. 1-20) typu ball on disc, tedy kontakt ocelové kuličky a skleněného disku s tenkou vrstvou chromu. Průměr kuličky byl 25,4 mm a průměr disku 150 mm. Experimenty probíhaly při Hertzově tlaku 0,43 GPa a za pokojové teploty 25 °C. Použité mazivo mělo při této teplotě viskozitu 1,75 Pa·s. Experimenty byly prováděny pro různé střední rychlosti, které byly vyjádřeny bezrozměrným rychlostním parametrem *U*. Následně byl zkoumán vliv zvyšující se střední rychlosti na utváření mazacího filmu při průchodu povrchu s rýhou.



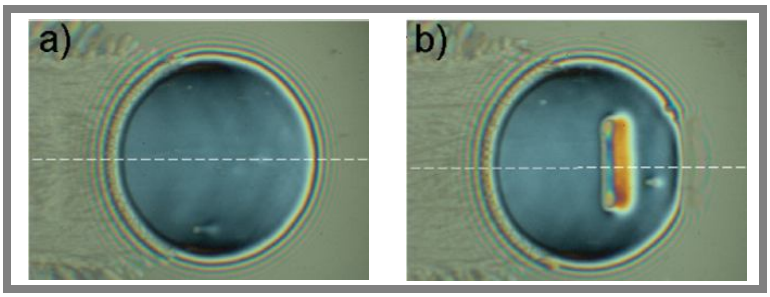
Obr. 1-20 Optický tribometr typu ball on disc [22]

Experimenty s touto rýhou na reálném povrchu přinesly podobné výsledky jako předchozí práce, které se zabývaly uměle vytvořenými rýhami. Pro rýhu na reálném povrchu byla také pozorována lokální redukce v tloušťce mazacího filmu při vstupu rýhy do bodového kontaktu. Při jejím průchodu kontaktem pak rýha udržovala svůj nedeformovaný tvar i se zvyšující se střední rychlostí.



Obr. 1-21 Profil studované rýhy [23]

Článek Aliho [23] z roku 2015 se zabývá experimentální i numerickou studií efektu uměle vytvořené příčně orientované mikrorýhy na chování tloušťky mazacího filmu a tření v EHD mazaném bodovém kontaktu. Hloubka zkoumané mikrorýhy byla přibližně 600 nm, šířka 60 µm (obr. 1-21) a délka rýhy, která nebyla větší než kontaktní oblast, byla 200 µm. Experimenty byly prováděny s mazivem o viskozitě 0,215 Pa·s (při teplotě 25 °C) a při Hertzově tlaku 0,68 GPa. V experimentech byla měřena a porovnávána tloušťka mazacího filmu při průchodu hladkého (obr. 1-22*a*) povrchu a při průchodu povrchu s rýhou (obr. 1-22*b*).



Obr. 1-22 Interferogram při průchodu: a) hladkého povrchu, b) povrchu s rýhou [23]

Výsledky této práce ukázaly, že příčně orientované mikrorýhy, s délkou menší než je průměr Hertzova kontaktu, jsou schopny efektivně zvýšit tloušťku mazacího filmu při různých pracovních podmínkách a fungují jako účinné zásobníky maziva. Příčně orientované mikrorýhy zkoumané v této práci výrazně zvýšily tloušťku filmu a snížily tření v EHD mazaném bodovém kontaktu.

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

2.1 Zhodnocení poznatků získaných na základě rešerše

V experimentálních pracích, které se doposud zabývaly problematikou povrchových nerovností, byly zkoumány tři základní typy nerovností, a to rýhy, výstupky a denty [24]. V těchto experimentálních studiích již bylo vysvětleno, jak jednotlivé nerovnosti působí na distribuci mazacího filmu v bodovém kontaktu. Výstupky (i když je jejich výška větší, než je průměrná tloušťka mazacího filmu) jsou v kontaktu natolik deformovány, že nedochází ke styku třecích povrchů [11, 12, 13]. Přítomnost dentů v bodovém kontaktu způsobuje pouze lokální redukci tloušťky mazacího filmu. Denty fungují jako zásobníky maziva, v kterých se mazivo zachytává a postupným průchodem kontaktní oblastí následně tloušťku mazacího filmu částečně zvyšují [14, 15, 16]. Rýhy, jejichž délka prochází celou kontaktní oblastí, způsobují vlivem svého tvaru boční výtok maziva z kontaktu, který může za určitých podmínek vést až k úplnému protržení mazacího filmu. Tento výrazný pokles tloušťky mazacího filmu může vést k přechodu z EHD režimu mazání do režimu smíšeného mazání, kdy dochází ke kontaktu třecích povrchů. Z tohoto hlediska se rýhy dají označit jako nerovnosti, které svým vlivem nejvíce narušují rozložení tloušťky mazacího filmu v kontaktní oblasti.

Prvními studiemi, které se zabývaly problematikou vlivu rýhy na utváření mazacího filmu v bodovém kontaktu, byly práce autorů Wevedena a Cusana [17,18]. Na základě jejich experimentů byly popsány změny mazacího filmu při průchodu rýhy kontaktní oblastí za podmínek čistého valení a čistého skluzu. Dále pak bylo objasněno, jaký vliv na utváření mazacího filmu v kontaktu má orientace rýhy, přičemž byly zkoumány rýhy orientované kolmo a rovnoběžně vzhledem k toku maziva. Z jejich prací vyplynuly závěry, že při podmínkách čistého skluzu dochází k daleko většímu narušení distribuce mazacího filmu v kontaktu než za podmínek čistého valení. Dále pak bylo vyjádřeno, že při orientaci rýhy kolmo ke směru toku maziva dochází k většímu ovlivnění tloušťky filmu než pro rovnoběžnou orientaci rýhy. Tento jev byl autory vysvětlen tím, že při rovnoběžné orientaci rýhy nedochází k natolik výrazné změně geometrie v kontaktu.

Na základě rešerše se dá konstatovat, že autorem, který nejvíce přispěl k vysvětlení jevů spojených s průchodem rýhy bodovým kontaktem, byl Kaneta. Ve svých experimentálních studiích [19,20] dokázal kvalitativně popsat děje, které nastávají při průchodu rýhy bodovým kontaktem. Na základě jeho experimentů byl vyjádřen vliv rýhy na distribuci filmu v kontaktní oblasti při změně střední rychlosti za podmínek valení s částečným skluzem, přičemž byl popsán vliv záporné a kladné hodnoty *SRR*. Dále mu pak experimenty s třemi rýhami odlišných rozměrů umožnily dojít k závěru, že pokles filmu v kontaktní oblasti vlivem průchodu povrchu s rýhou je řízený geometrií rýhy, tedy že zmenšování šířky a hloubky rýhy vede ke zmenšování množství maziva vytečeného bokem rýhy. Z čehož plyne, že změnou geometrie rýhy se dá předcházet narušení tloušťky filmu v kontaktní oblasti, které může vést v limitních případech až k úplnému protržení mazacího filmu a ke kontaktu třecích povrchů.

V práci Hartla [22] byla na rozdíl od předešlých prací, které studovaly rýhy uměle vytvořené, zkoumána rýha na reálném povrchu. Výsledky této práce se shodovaly se studiemi, které se zabývaly uměle vytvořenými rýhami. Na základě této práce se dá konstatovat, že zkoumané uměle vytvořené rýhy mají na utváření

mazacího filmu v kontaktu stejný vliv jako rýhy na reálném povrchu, které se vyskytují v praxi v kontaktech běžných strojních součástí.

V práci Aliho [23] byla zkoumána uměle vytvořená rýha, jejíž délka nebyla větší, než byl průměr kontaktní oblasti. V této studii bylo objasněno, že při délce rýhy nepřesahující celou délku kontaktní oblasti nedochází k bočnímu výtoku rýhou. Mazivo je v této rýze podobně jako u dentů zachyceno a postupným průchodem rýhy kontaktem tloušťku filmu částečně navyšuje.

2.1.1 Závěry plynoucí z provedené rešerše

2.1.1

Na základě provedené rešerše a jejího následného zhodnocení se dají vyjádřit tyto závěry:

- Z doposud zkoumaných povrchových nerovností se dají rýhy označit jako nerovnosti, které způsobují největší pokles tloušťky filmu v kontaktu.
- Při orientaci rýhy kolmo ke směru toku maziva dochází k většímu poklesu tloušťky mazacího film, než nastává u rovnoběžné orientace rýhy.
- Byl vyjádřen vliv změny střední rychlosti na utváření mazacího filmu v kontaktní oblasti při průchodu povrchu s rýhou.
- Bylo popsáno, že při kladné hodnotě *SRR* dochází k ovlivnění tloušťky mazacího filmu před rýhou, naopak pro zápornou hodnotu *SRR* se nachází oblast ovlivnění tloušťky mazacího filmu za rýhou. Zmenšování hodnoty *SRR* vede ke zmenšování délky oblasti ovlivněné rýhou.
- U rýh neprocházejících přes celou délku kontaktní oblasti nedochází k bočnímu výtoku rýhou. Tyto rýhy tloušťku mazacího filmu v kontaktu částečně navyšují.
- Boční výtok rýhou je řízený geometrií rýhy, přičemž vliv geometrie rýhy doposud nebyl detailněji zkoumán.

2.2 Cíl diplomové práce

2.2

Cílem této diplomové práce je popsat chování mazacího filmu při průchodu povrchu s rýhou bodovým kontaktem. K simulaci bodového kontaktu bude používán optický tribometr. Práce má obsahovat vliv geometrie rýhy, maziva a provozních podmínek. Pro splnění cílů práce je zapotřebí realizovat tyto kroky:

- Stanovení metodiky hodnocení výsledků.
- Testování možností modifikace geometrie rýhy.
- Experimenty pro vyjádření vlivu rychlosti, prokluzu a zatížení.
- Experimenty pro vyjádření vlivu maziva.
- Experimenty pro vyjádření vlivu geometrie rýhy.
- Analýza výsledků provedených experimentů.

Výstupem této diplomové práce v kategoriích definovaných pro základní výzkum v souladu s platnou Metodikou hodnocení výsledků a vývoje je [25]:

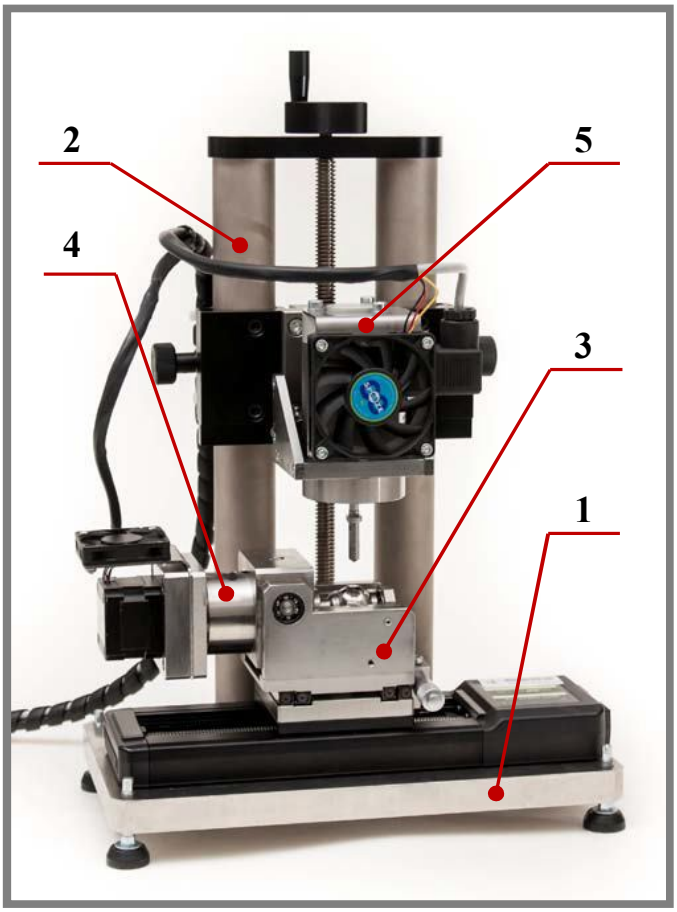
- **J – recenzovaný odborný článek**

3 MATERIÁL A METODY

V této kapitole budou popsána laboratorní zařízení, která byla při řešení této diplomové práce využita. Dále zde pak bude definován stanovený metodický přístup obsahující způsob hodnocení získaných výsledků a způsob přípravy vzorků před experimenty.

3.1 Zařízení pro tvorbu mikrotextur

Pro tvorbu textury na povrchu zkušebních vzorků slouží na ÚK progresivní zařízení pro tvorbu mikrotextur (obr. 3-1), které bylo na ÚK zkonstruováno v rámci diplomové práce. Toto zařízení pracuje na principu zkoušky tvrdosti, kdy je do zkušebního vzorku (ocelová kulička) vtlačován indentor s diamantovou špičkou o definované geometrii. Hlavními částmi zařízení jsou základní deska (1), stojan s vertikálním polohovacím systémem (2), polohovací systém vzorku (3), držák vzorku (4) a texturovací jednotka s indetorem (5) [26].



Obr. 3-1 Zařízení pro tvorbu mikrotextur [26]

Konstrukce tohoto zařízení umožňuje vertikální posuv texturovací jednotky a podélný a příčný posuv polohovacího systému vzorku. Vertikální posuv texturovací jednotky je zajištěn trapézovým šroubem. Podélný posuv polohovacího systému vzorku je realizován motorizovaným lineárním posuvem, který poskytuje řízený přejezd ocelové kuličky vzhledem k indentoru, což dovoluje modifikovat délku

vtisku (rýhy). Pro možnost příčného posuvu polohovacího systému vzorku je využito mikrometrické hlavice, která zajišťuje přesné nastavení vrchlíku kuličky proti špičce indentoru, čímž se zaručí přesná pozice vytvořeného vtisku (rýhy). Texturovací jednotka je složena z elektromagnetického aktuátoru s vratnou pružinou, ke kterému je pomocí spojky připevněn indentor. Rozměr mikrovtisků se dá modifikovat změnou vstupního napětí elektromagnetického aktuátoru neboli změnou přítlačné síly indentoru ke kuličce. Další možností modifikace geometrie mikrovtisku je užití indentorů s odlišnou geometrií špičky.

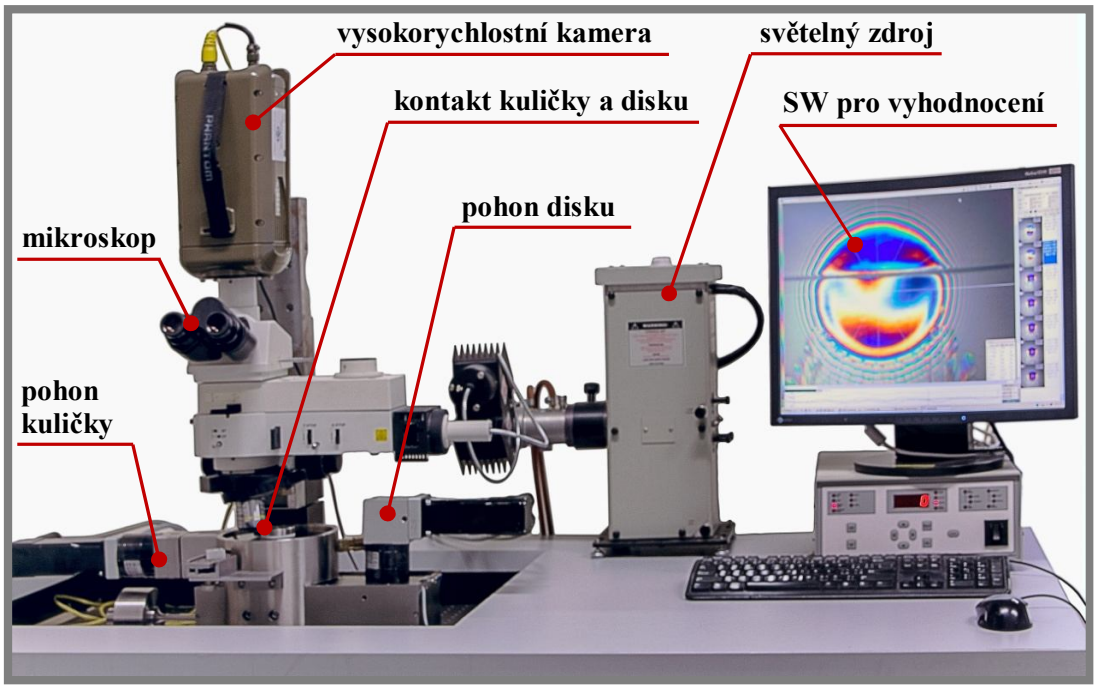
3.2 Optický profilometr

Po výrobě rýhy na zkušebním vzorku pomocí zařízení pro tvorbu mikrotextur bylo zapotřebí stanovit přesné rozměry vyrobené rýhy. K tomuto účelu byl využit komerční optický profilometr [27] od firmy Bruker se sériovým označením ContourGT-X (obr. 3-2), který je k dispozici v laboratoři ÚK. Při měření rýh bylo využito dvou měřících přístupů. Byla využita metoda „Phase Shifting Interferometry“ (PSI) a metoda „Vertical Scanning Interferometry“ (VSI), která je odvozená od metody PSI. Obě tyto metody jsou bezkontaktní optické metody, které umožňují velmi přesné a rychlé měření topografie povrchu s přesností v nanometrech. U bezkontaktních optických metod se k měření využívá světla ze světelného zdroje, které prochází soustavou čoček a clon, následně se odráží od polopropustného zrcadla k děliči svazku. V děliči svazku dochází k rozdělení paprsku, jedna část paprsku se odráží k referenčnímu povrchu a druhá část paprsku k povrchu měřenému. Paprsky odražené od referenčního povrchu a od měřeného povrchu spolu následně interferují v interferenčním objektivu a jsou snímány digitální CCD kamerou. Hlavní rozdíl mezi metodami PSI a VSI je v typu použitého světla. Metoda PSI využívá monochromatického světla, které obsahuje jednu vlnovou délku. Metoda VSI využívá světla bílého, které má ve všech vlnových délkách stejnou intenzitu. [28]

Obr. 3-2 Optický profilometr firmy Bruker [27]

3.3 Optický tribometr

Po výrobě rýh a stanovení jejich přesných rozměrů následovala měření na optickém tribometru (obr. 3-3). Tento tribometr byl zkonstruován výzkumným týmem na ÚK. Jedná se o tribometr typu ball on disc, u kterého je jako kontaktní dvojice využito ocelové kuličky a skleněného disku.



Obr. 3-3 Optický tribometr typu ball on disc dostupný na ÚK

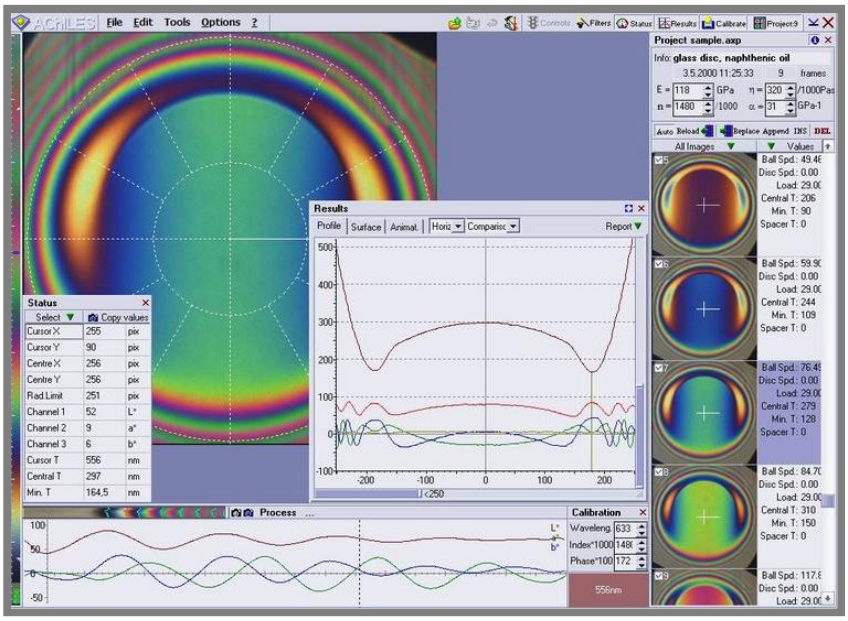
Při experimentech byla využita kulička o průměru 25,4 mm z ložiskového materiálu AISI 52100 a disk o průměru 150 mm a tloušťce 12,7 mm ze skla BK7. Mechanické vlastnosti kontaktní dvojice jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1 Mechanické vlastnosti kontaktní dvojice [24]

Poissonův poměr oceli μ_B	0,29
Modul pružnosti oceli E_B (GPa)	210
Poissonův poměr skla μ_D	0,208
Modul pružnosti skla E_D (GPa)	81

Optický tribometr umožňuje simulaci podmínek EHD mazaného bodového kontaktu, u kterého je mazací film vytvářen v kontaktu mezi otáčející se ocelovou kuličkou a rotujícím skleněným diskem. Konstrukce optického tribometru umožňuje nezávislé řízení obou kontaktních těles pomocí servopohonů s frekvenčními měniči, což dovoluje sledovat chování mazacího filmu v EHD kontaktu za proměnných středních rychlostí.. Osy rotace obou kontaktních těles jsou vůči sobě kolmé. Na spodní straně skleněného disku, která je v kontaktu s ocelovou kuličkou, je napařena tenká vrstva chromu. Druhá strana skleněného disku je opatřena antireflexivní vrstvou. Na kontaktní oblast dopadá kolmo světlo ze světelného zdroje, odráží se na rozhraní mezi sklem a vrstvou chromu a na rozhraní mezi mazacím filmem a

deformovaným povrchem kuličky. Odražené paprsky spolu interferují a výsledné interferenční barvy jsou sledovány průmyslovým mikroskopem. K záznamu chování mazacího filmu v kontaktu je použita vysokorychlostní digitální kamera (Phantom v710). Získané interferogramy jsou následně naimportovány do softwaru Achiles (obr. 3-4), který umožňuje zmapovat zkoumaný kontakt a stanovit tloušťku mazacího filmu využitím metody kolorimetrické interferometrie [24, 29].



Obr. 3-4 Prostředí softwaru Achiles [30]

3.3.1 Použitá maziva

3.3.1

V experimentech bylo pro vyjádření vlivu maziva využito třech různých maziv s označením SN650, R560/88 a R825/95. Všechna tato maziva jsou minerální oleje. Parametry těchto maziv jsou uvedeny v tab. 2. Index lomu světla byl určen pomocí Abbeho refraktometru. Dynamická viskozita byla stanovena pomocí rotačního viskozimetru HAAKE RotoVisco 1. Obě tato zařízení jsou součástí vybavení laboratoří ÚK.

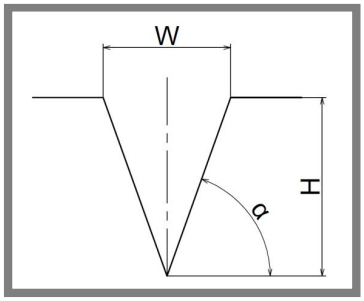
Tab. 2 Parametry použitých maziv

Označení oleje	R560/88	SN650	R825/95
Dynamická viskozita η při 25° C (Pa·s)	1,15	0,356	0,06
Index lomu	1,5	1,49	1,487

3.4 Metodický přístup

3.4.1 Hodnocení geometrie rýhy

Z důvodu respektování cíle této diplomové práce, tzn. vyjádření vlivu geometrie rýhy na utváření mazacího filmu v EHD mazaném bodovém kontaktu, bylo nutné stanovit, které parametry budou na rýhách hodnoceny. Proto bylo rozhodnuto, že vytvořené rýhy se budou rozlišovat a následně vyhodnocovat podle jejich šířky, hloubky a úhlu, který bude měřen tak, jak je zobrazeno na obr. 3-5.



Obr. 3-5 Hodnocení geometrie rýhy

Úhel rýhy je pak vyjádřen následujícím vztahem:

$$\tan \alpha = \frac{2H}{W} \tag{4}$$

Kde:

α	°	- úhel rýhy
W	µm	- šířka rýhy
H	µm	- hloubka rýhy

3.4.2 Příprava vzorků

Dále pak bylo rozhodnuto, že po výrobě rýh bude následovat odstraňování výstupků (označeno na obr. 3-6 červeným kroužkem), které vznikly při tvorbě rýhy vytečením materiálu vlivem plastické deformace.

Obr. 3-6 Profil rýhy s výstupky

Odstraňování těchto výstupků probíhalo pomocí aplikace diamantové brusné pasty na ocelovou kuličku a následně leštěním ocelové kuličky pomocí speciálního nástavce s vnitřním kuželem poháněným akumulátorovou vrtačkou. Bylo využito diamantových brusných past o zrnitosti 5/3, 3/2 a 1/0. Leštění probíhalo při konstantních otáčkách kuličky umístěné v držáku a poháněné servopohonem a při proměnných otáčkách vrtačky. K odstranění výstupků bylo nutné provést leštění přibližně v devíti cyklech, přičemž nejdříve byly provedeny čtyři cykly s brusnou pastou o zrnitosti 5/3, následovaly tři cykly s pastou o zrnitosti 3/2 a pro dokončení dostatečné kvality povrchu následovaly 2 cykly s nejjemnější pastou o zrnitosti 1/0. Opakovatelnost tohoto postupu byla ale u každé rýhy odlišná, proto docházelo během leštění k průběžnému měření na optickém profilometru a leštící cyklus se na základě naměřených dat dodatečně upravoval. Leštěním ocelové kuličky se dosahovalo drsnosti povrchu přibližně 0,005 µm. Po dokončení leštění docházelo k očištění ocelové kuličky pomocí acetonu kvůli odstranění všech nečistot. Kompletní leštící souprava je zobrazena na obr. 3-7.

Obr. 3-7 Leštící souprava

3.4.3 Použité indentory a označení rýh

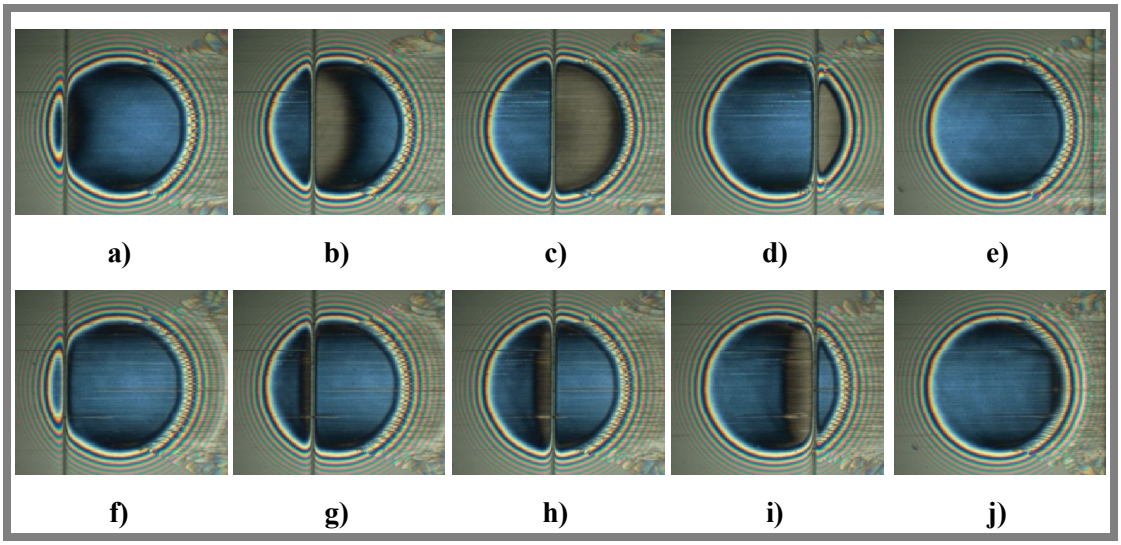
Jak již bylo popsáno v kap. 3.1, na zařízení pro tvorbu mikrotextur je možné modifikovat tvar výsledného vtisku pomocí změny přítlačné síly indentoru k ocelové kuličce nebo užitím indentorů s odlišnou geometrií špičky. V rámci této diplomové práce byly po testování vybrány a k modifikaci rýh použity tři indentory zobrazené na obr. 3-8. Jednalo se o dva indentory typu Rockwell, které mají na vrcholu kužel o vrcholovém úhlu 120° a poloměru zaoblení 0,2 mm, přičemž poloměr zaoblení špičky těchto dvou indentorů se od sebe mírně lišil. Třetí indentor s označením Knoop je indentor, který má na vrcholu čtyřboký diamantový jehlan. Modifikace geometrie rýh pak probíhala pomocí užití těchto tří indentorů a změnou hodnoty přítlačné síly. Bylo rozhodnuto, že rýhy se pro rozlišení budou značit podle indentoru, kterým byla daná rýha vytvořena. Rýhy vytvořené indentorem Knoop budou značeny písmenem K (obr. 3-8*c*). Rýhy vytvořené indentory typu Rockwell budou označovány písmenem R (obr. 3-8*a*) a RS (obr. 3-8*b*). Za písmenem symbolizující použitý indentor (K, R a RS) bude následovat číslo, které bude dále rozlišovat rýhy podle jejich hloubky, šířky a úhlu.

Obr. 3-8 Použité indentory: a) Rockwell R, b) Rockwell RS, c) Knoop K

4 VÝSLEDKY

4.1 Průchod rýhy bodovým kontaktem

Na obr. 4-1 je zobrazena sekvence interferogramů pořízených pomocí vysokorychlostní kamery. Na těchto interferogramech je zachycen průchod rýhy EHD mazaným bodovým kontaktem při střední rychlosti 0,02 $m \cdot s^{-1}$, přičemž interferogramy *a-e* jsou zachyceny pro hodnotu poměru *SRR* = 1 a interferogramy *f-j* pro hodnotu *SRR* = -1. Jak již popsal Kaneta ve svých pracích [19, 20], při průchodu rýhy EHD mazaným bodovým kontaktem dochází při vstupu přední hrany rýhy do kontaktní oblasti (obr. 4-1*a,f*) k prudkému poklesu tlaku. Mazivo je při vstupu rýhy do kontaktu zachyceno rýhou a při geometrii rýhy, která prochází přes celou šířku kontaktní oblasti, je mazivo tlakem v kontaktu vytlačováno a odváděno bokem rýhy ven z kontaktní oblasti, což vede ke značné redukci tloušťky mazacího filmu v bodovém kontaktu. Tento značný pokles tloušťky mazacího filmu je pak unášen střední rychlostí po celou délku kontaktní oblasti (obr. 4-1*b-d* a *g-i*), přičemž pro kladnou hodnotu poměru *SRR* tento pokles tloušťky mazacího filmu nastává v oblasti před rýhou, naopak pro zápornou hodnotu poměru *SRR* nastává pokles tloušťky mazacího filmu v oblasti za rýhou. Ke kompletnímu zotavení tloušťky mazacího filmu v bodovém kontaktu na původní hodnotu dochází v momentě, kdy rýha úplně opustí kontaktní oblast (obr. 4-1*e,j*).



Obr. 4-1 Průchod rýhy EHD mazaným bodovým kontaktem pro *SRR*: a-e) 1, f-j) -1

4.1.1 Hodnocení tloušťky filmu ovlivněné rýhou

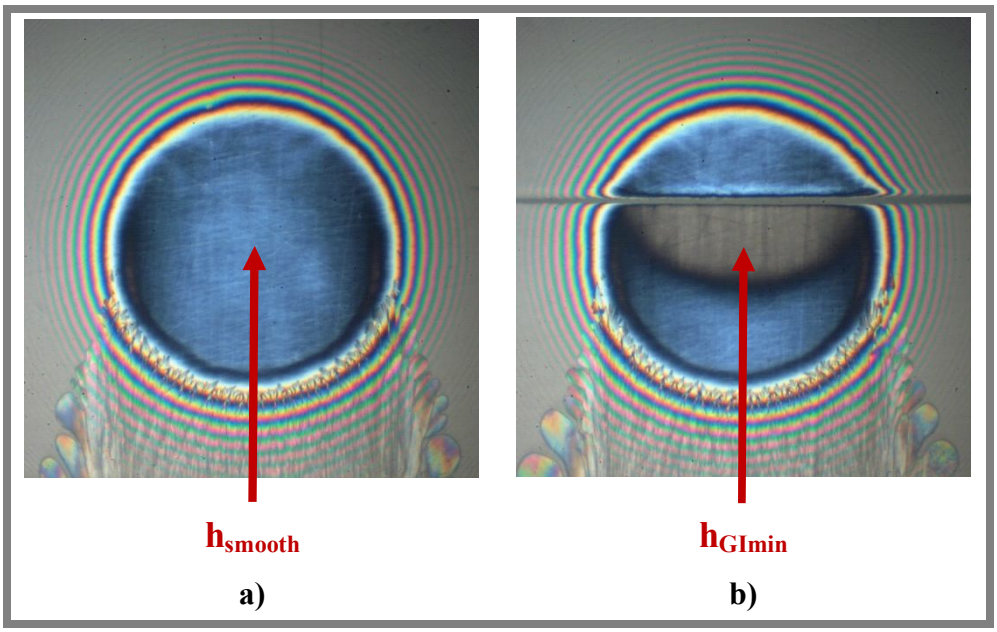
V předchozí kapitole byl popsán jev, který způsobuje průchod rýhy bodovým kontaktem, tedy že průchod rýhy má negativní vliv na tloušťku mazacího filmu. Rýha způsobuje v bodovém kontaktu pokles tloušťky mazacího filmu, přičemž velikost tohoto poklesu je řízena geometrií rýhy [20]. Při stanoveném cíli této diplomové práce, což je vyjádření vlivu geometrie rýhy na chování mazacího filmu v EHD mazaném bodovém kontaktu, bylo nutné zavést parametr, který bude efektivně vyjadřovat jev spojený s ovlivněním tloušťky filmu v kontaktní oblasti. Pro tento účel byl zaveden poměr ovlivnění rýhou neboli „groove influence ratio“ označený jako R_{GI}. Tento poměr bude dán jako podíl minimální tloušťky mazacího filmu, která nastane při průchodu rýhy bodovým kontaktem (obr. 4-2*b*), ku tloušťce mazacího filmu při průchodu hladkého povrchu (obr. 4-2*a*). Poměr ovlivnění rýhou R_{GI} je tudíž dán vztahem:

$$R_{GI} = \frac{h_{GImin}}{h_{smooth}} \tag{5}$$

Kde:

h_{GImin} nm - minimální tloušťka filmu ovlivněná průchodem rýhy

h_{smooth} nm - tloušťka filmu při průchodu hladkého povrchu



Obr. 4-2 Stanovení hodnocených tloušťek mazacího filmu: a) h_{smooth}, b) h_{GImin}

Hodnoty h_{GImin} a h_{smooth} budou měřeny ve středu kontaktní oblasti tak, jak je zobrazeno na obr. 4-2. V závislosti na poměru ovlivnění rýhou R_{GI} se pak budou vyjadřovat vlivy jednotlivých parametrů, které byly v této diplomové práci zkoumány.

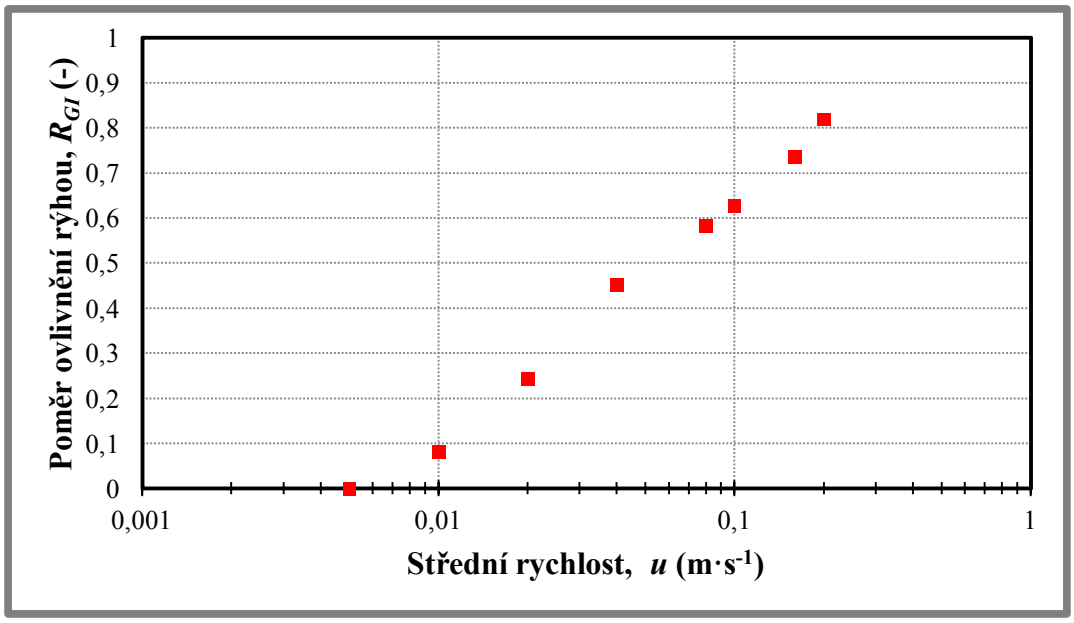
4.2 Vliv rychlosti

Pro experiment, který sloužil k vyjádření vlivu rychlosti na utváření mazacího filmu v EHD mazaném bodovém kontaktu při průchodu povrchu s rýhou, bylo využito rýhy s označením R3, jejíž parametry jsou uvedeny v tab. 3.

Tab. 3 Parametry rýhy s označením R3

Označení rýhy	Šířka W (µm)	Hloubka H (nm)	Úhel α (°)
R3	52	621	1,37

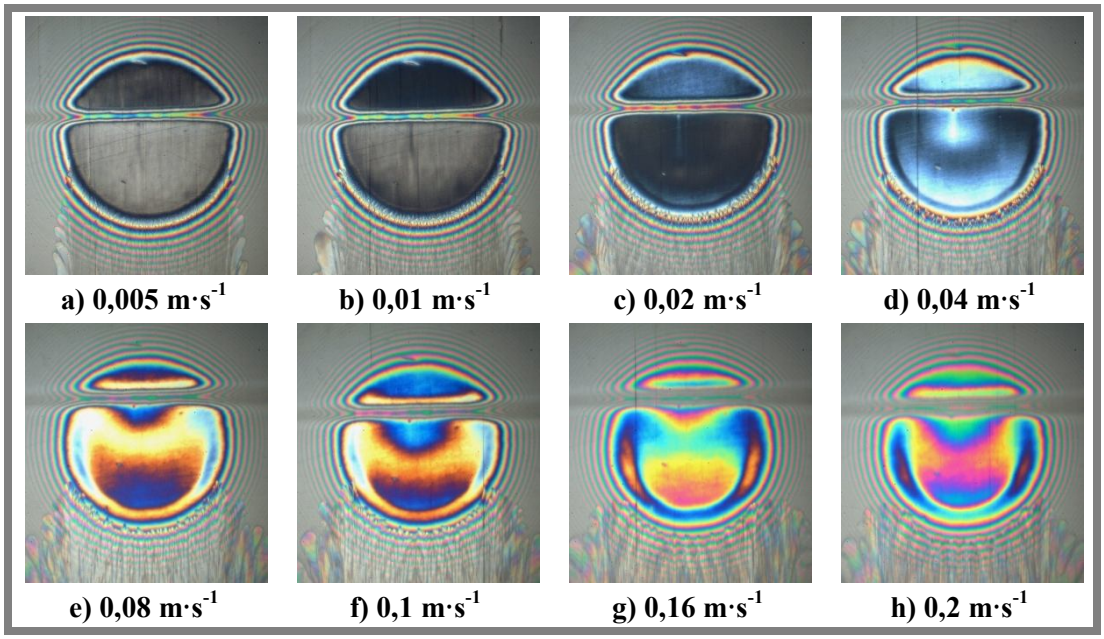
Experiment probíhal při teplotě 24,5 °C a jako mazivo byl použit minerální olej s označením SN650, který má dynamickou viskozitu 0,356 Pa·s (při teplotě 25 °C). Hodnota Hertzova tlaku byla 0,54 GPa a měření probíhala pro hodnotu SRR = 1. Při experimentu proběhlo nejdříve měření třech rychlostí, jejichž vliv na tloušťku filmu byl následně ihned vyhodnocen. Na základě vyhodnocených výsledků pak došlo k přidání dalších rychlostí tak, aby byla vytvořena tzv. „lift-off“ křivka [24]. Tato „lift-off“ křivka vyjadřuje schopnost nerovnosti (rýhy) snižovat ovlivnění tloušťky EHD filmu při určité rychlosti. Výsledky experimentu jsou uvedeny na obr. 4-3, který vyjadřuje závislost poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na střední rychlosti u.



Obr. 4-3 Závislost poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na střední rychlosti u pro rýhu R3

Z tohoto grafu je zřejmé, že rozložení naměřených bodů se shoduje s průběhem logaritmické funkce. Body v tomto grafu se dají proložit přímkou, protože osa x je v logaritmickém měřítku. Dá se tedy konstatovat, že přechod z oblasti velkého ovlivnění tloušťky filmu rýhou do oblasti, kdy vliv rýhy odezní, má logaritmický charakter. Přičemž při malé rychlosti dochází vlivem rýhy k velkému poklesu tloušťky mazacího filmu, který může v extrémních případech vést až ke snížení tloušťky mazacího filmu na hodnotu 0 nm (R_{GI} = 0), a tím pádem k úplnému protržení mazacího filmu vedoucímu k bezprostřednímu kontaktu třecích povrchů. Se zvyšováním střední rychlosti pak dochází ke zmenšování poklesu tloušťky

mazacího filmu způsobeného rýhou, a proto ke zvyšování poměru ovlivnění rýhou R_{GI}, kdy hodnota poměru R_{GI} = 1 vyjadřuje, že rýha nemá žádný vliv na distribuci mazacího filmu v bodovém kontaktu.



Obr. 4-4 Interferogramy s rýhou R3 v bodovém kontaktu při různé střední rychlostí *u*

Na obr. 4-4 jsou pak zobrazeny interferogramy odpovídající jednotlivým rychlostem z grafu na obr. 4-3. Pro rychlost 0,005 m·s^{-1} (obr. 4-4*a*) je vidět, že vliv rýhy je při této rychlosti natolik dominantní, že dojde k úplnému protržení mazacího filmu. Naopak se zvyšující se rychlostí dochází ke stabilizaci tloušťky mazacího filmu za rýhou, kdy pro rychlost 0,2 m·s^{-1} (obr. 4-4*h*) dochází vlivem rýhy k poklesu tloušťky mazacího filmu přibližně na 80% tloušťky mazacího filmu při průchodu hladkého povrchu.

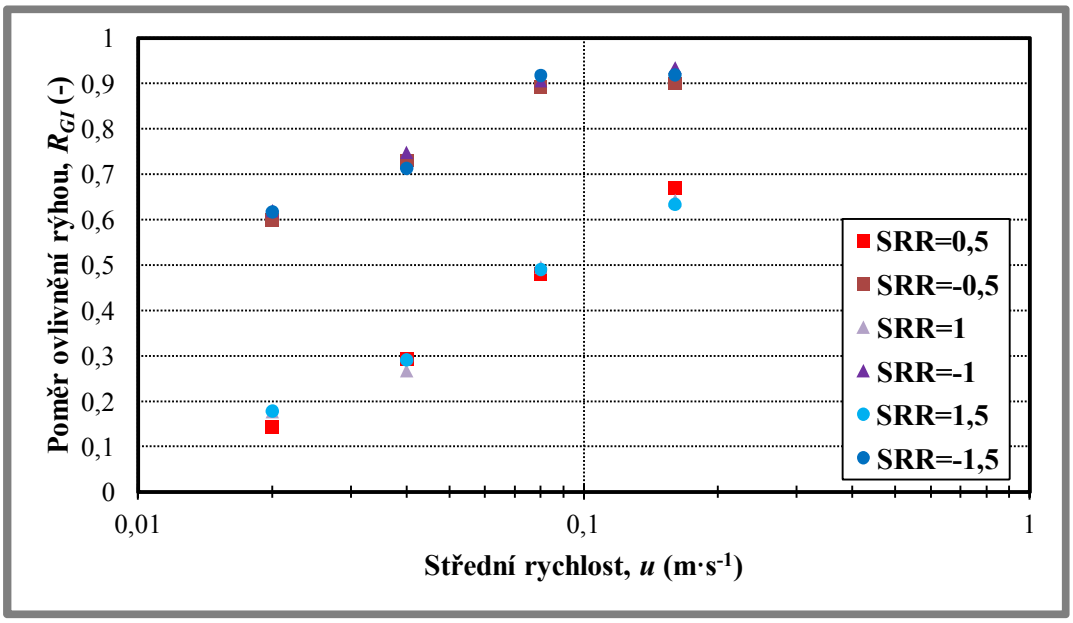
4.3 Vliv prokluzu

Při experimentech zkoumajících vliv prokluzu (poměru *SRR*) na utváření mazacího filmu při průchodu povrchu s rýhou bylo využito rýhy s označením R1, jejíž parametry jsou uvedeny v tab. 4.

Tab. 4 Parametry rýhy s označením R1

Označení rýhy	Šířka *W* (μm)	Hloubka *H* (nm)	Úhel *α* (°)
R1	50	810	1,86

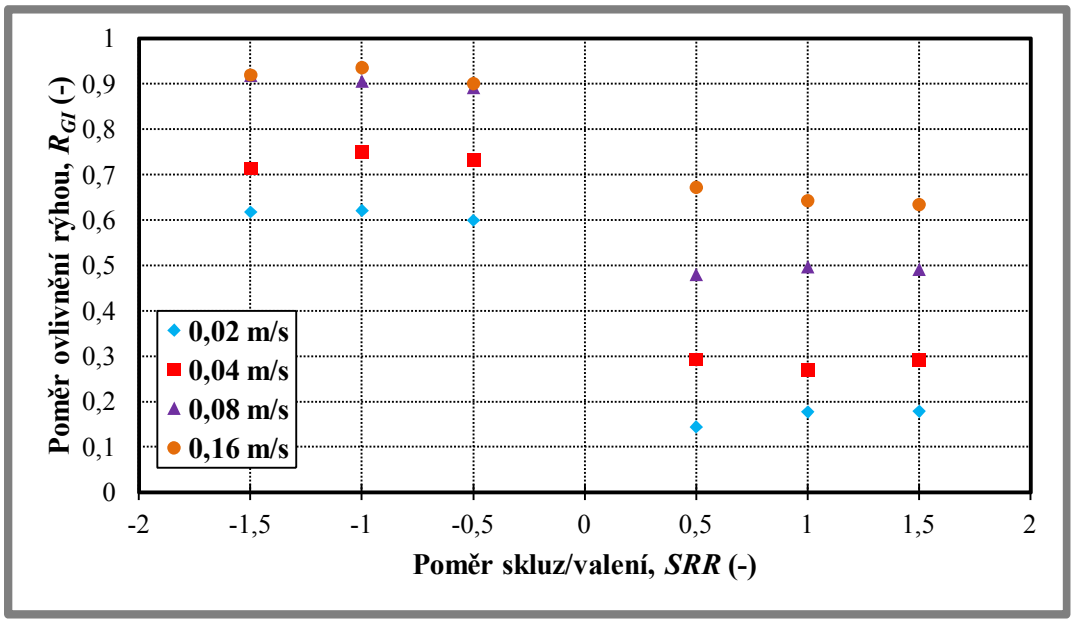
Tyto experimenty byly prováděny s využitím minerálního oleje s označením SN650, který má dynamickou viskozitu 0,356 Pa·s (při teplotě 25 °C). Experimenty probíhaly při teplotě 24,5 °C a při Hertzově tlaku 0,6 GPa. V experimentech docházelo u jednotlivých středních rychlostí ke změnám hodnoty poměru *SRR,* přičemž měřené hodnoty poměru *SRR* byly 0,5; 1; 1,5; -0,5; -1 a -1,5. Z následné analýzy výsledků těchto měření vzešel graf, který je na obr. 4-5. Tento graf vyjadřuje závislost poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na střední rychlosti *u*.



Obr. 4-5 Graf vyjadřující závislost poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na střední rychlosti *u* pro rýhu R1 a různé hodnotu poměru *SRR*

Z tohoto grafu je jasně patrné, že pro kladné hodnoty poměru *SRR* dochází k výrazně většímu ovlivnění (poklesu tloušťky mazacího filmu v kontaktní oblasti) vlivem rýhy než pro záporné hodnoty poměru *SRR*, tedy že u kladných hodnot *SRR* nabývá poměr ovlivnění rýhou R_{GI} nižších hodnot. Což je způsobené rozdílem mezi rychlostí maziva a rychlostí kuličky s rýhou, kdy pro kladnou hodnotu *SRR* je mazivo rychlejší než kulička a pro zápornou hodnotu *SRR* je tomu naopak. Rozdíl mezi rychlostí maziva a rychlostí kuličky dále také určuje, přes kterou hranu rýhy mazivo vytéká, čímž je také určena oblast kontaktu, v které dochází k poklesu tloušťky mazacího filmu vlivem rýhy. Pro zvýraznění tohoto jevu pak byl ještě vytvořen graf na obr. 4-6, který vyjadřuje závislost poměru ovlivnění rýhou R_{GI}

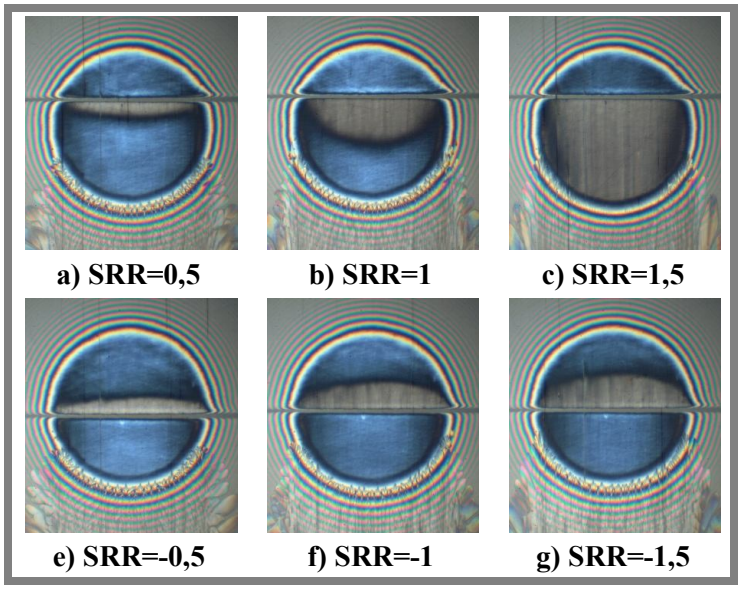
přímo na poměru *SRR* pro 4 různé střední rychlosti *u*. Je z něho patrné, že hodnoty pro kladný prokluz se při dané rychlosti drží přibližně v jedné linii s drobnou odchylkou. To samé se dá říct o záporném prokluzu, přičemž rozdíl v ovlivnění mezi kladným a záporným prokluzem je z tohoto grafu mnohem patrnější.



Obr. 4-6 Graf závislosti poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na poměru *SRR* pro různé střední rychlosti *u*

4.3.1 Délka ovlivněné oblasti

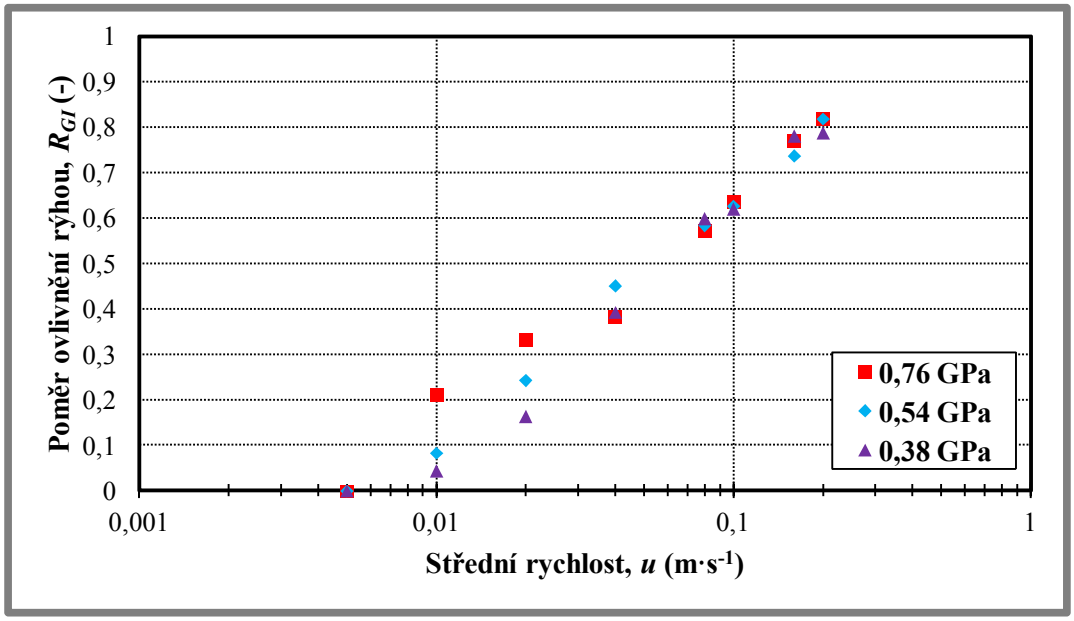
Dále bylo také u experimentů vyjadřujících vliv prokluzu pozorováno, že zvyšující se hodnota poměru *SRR* (jak pro záporný, tak pro kladný *SRR*) vede k tomu, že se zvětšuje oblast kontaktu, která je ovlivněna rýhou. Tento jev je zobrazen na obr. 4-7, kde je pro každou hodnotu *SRR* zobrazen jeden interferogram s rýhou procházející kontaktní oblastí pořízený při střední rychlosti $u = 0{,}02\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$.



Obr. 4-7 Interferogramy odpovídající jednotlivým hodnotám *SRR*

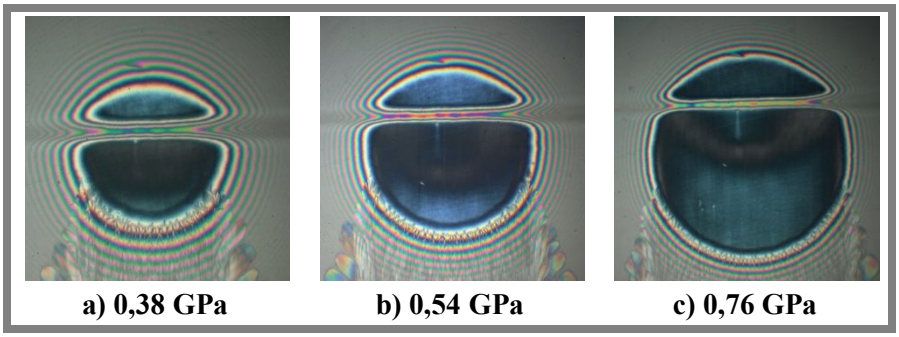
4.4 Vliv zatížení

Pro vyjádření vlivu zatížení byly provedeny experimenty při Hertzově tlaku 0,76 GPa, 0,54 GPa a 0,38 GPa. Měření vždy probíhala při použití stejné rýhy s označením R3 o rozměrech uvedených v tab. 3 (kap. 4.2) a pro stejnou hodnotu poměru *SRR* = 1. Jako mazivo byl vždy použit olej SN650, který má dynamickou viskozitu 0,356 Pa·s (při teplotě 25 °C). Všechny experimenty probíhaly při teplotě 24,5 ± 0,5 °C. Výsledky těchto experimentů jsou uvedeny na obr. 4-8, který zobrazuje graf závislosti poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na střední rychlosti u.



Obr. 4-8 Graf závislosti poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na střední rychlosti u pro různé zatížení

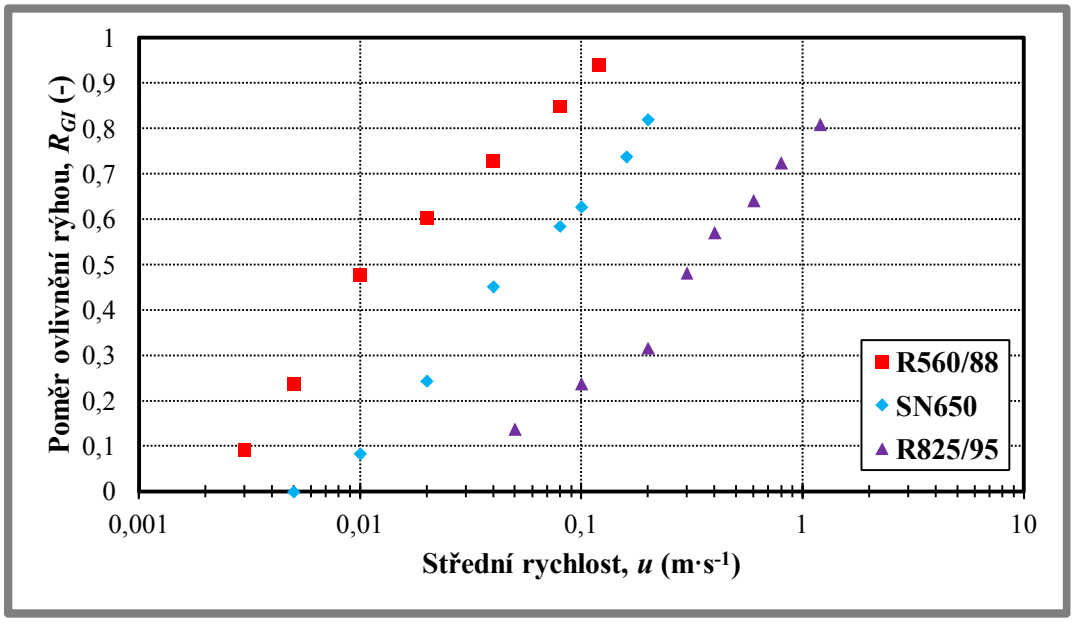
Z grafu je patrné, že výsledky měření pro všechny tyto tři hodnoty Hertzova tlaku se dají opět popsat logaritmickým průběhem. Poměr ovlivnění rýhou R_{GI} se pro jednotlivé střední rychlosti u pro tyto tři hodnoty Hertzova tlaku přibližně shoduje. Větší odchylka naměřených bodů pro tyto tři hodnoty Hertzova tlaku nastává při nižších rychlostech, kdy dochází vlivem rýhy k velkému poklesu tloušťky mazacího filmu v kontaktu. Nicméně se dá konstatovat, že při tomto rozsahu zatížení je vliv rýhy na utváření mazacího filmu v kontaktu přibližně stejný, tedy že změna zatížení kontaktu nemá vliv na tloušťku mazacího filmu při průchodu povrchu s rýhou. Na obr. 4-9 jsou pak zobrazeny interferogramy pro jednotlivé hodnoty Hertzova tlaku, které byly zachyceny při rychlosti 0,02 m·s^{-1}.



Obr. 4-9 Interferogramy odpovídající jednotlivým hodnotám Hertzova tlaku

4.5 Vliv maziva

Pro experimenty sloužící k vyjádření vlivu maziva byly použity tři typy minerálních olejů s označením SN650, R560/88 a R825/92, jejichž dynamická viskozita a index lomu světla jsou uvedeny v tab. 2 (kap. 3.3.1). V experimentech bylo použito rýhy s označením R3 o rozměrech, které jsou v tab. 3 (kap. 4.2). Tato měření probíhala za pokojové teploty 24,5 ± 0,5 °C, při stejné hodnotě Hertzova tlaku 0,54 GPa a pro jednu hodnotu poměru skluz/valení (*SRR* = 1). Výsledky tohoto experimentu jsou uvedeny na obr. 4-10, který vyjadřuje závislost poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na střední rychlosti u.



Obr. 4-10 Graf závislosti poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na střední rychlosti u pro 3 různá maziva

Na základě tohoto grafu se dá říci, že jednotlivé body, které symbolizují dané použité mazivo, se opět dají popsat logaritmickým průběhem. Dále je z grafu vidět, že při snižující se viskozitě maziva je zapotřebí vyšší střední rychlost u k tomu, aby došlo vlivem průchodu rýhy bodovým kontaktem k ovlivnění tloušťky mazacího filmu v kontaktní oblasti na danou hodnotu poměru ovlivnění R_{GI}. Z čehož se dá vyvodit závěr, že modifikací maziva se dá predikovat střední rychlost u, která vede k danému poměru ovlivnění rýhou R_{GI}. Tedy že z praktického hlediska by se dalo při znalosti střední rychlosti v kontaktu strojních součástí předcházet změnou použitého maziva tomu, aby docházelo vlivem rýhy k nežádoucímu průlomu maziva v kontaktní oblasti, které vede k bezprostřednímu styku třecích povrchů.

4.6 Vliv geometrie rýhy

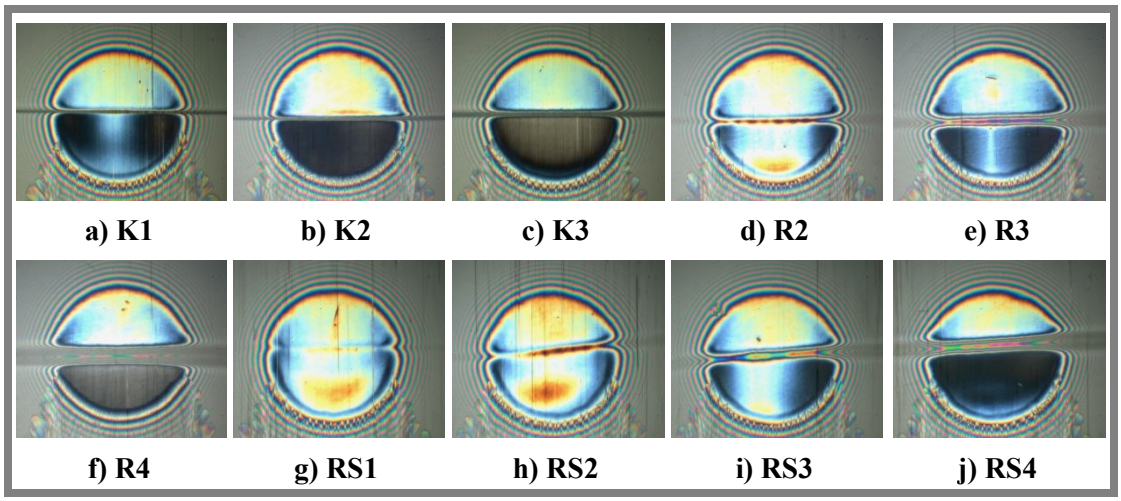
4.6.1 Soubor studovaných rýh

V kap. 3.4.1 již bylo uvedeno, že parametry, které se budou hodnotit u jednotlivých rýh, budou hloubka, šířka a úhel rýhy (obr. 3-5). Pro objasnění vlivu geometrie rýhy na utváření mazacího filmu v EHD mazaném bodovém kontaktu bylo nutné vytvořit určité portfolio rýh, které bude poskytovat dostatečnou rozmanitost jednotlivých zkoumaných parametrů. V kap. 3.4.3 je pak popsáno, že k modifikaci geometrie rýhy byly vybrány tři typy indentorů s označením K, R a RS (obr. 3-8). S těmito indentory následně probíhala testování s cílem zjistit, k jaké modifikaci rýhy dochází změnou přítlačné síly indentoru ke kuličce. Po tomto testování byl vytvořen soubor deseti rýh, s kterými následně probíhaly experimenty na optickém tribometru.

Tab. 5 Soubor studovaných rýh a jejich parametry

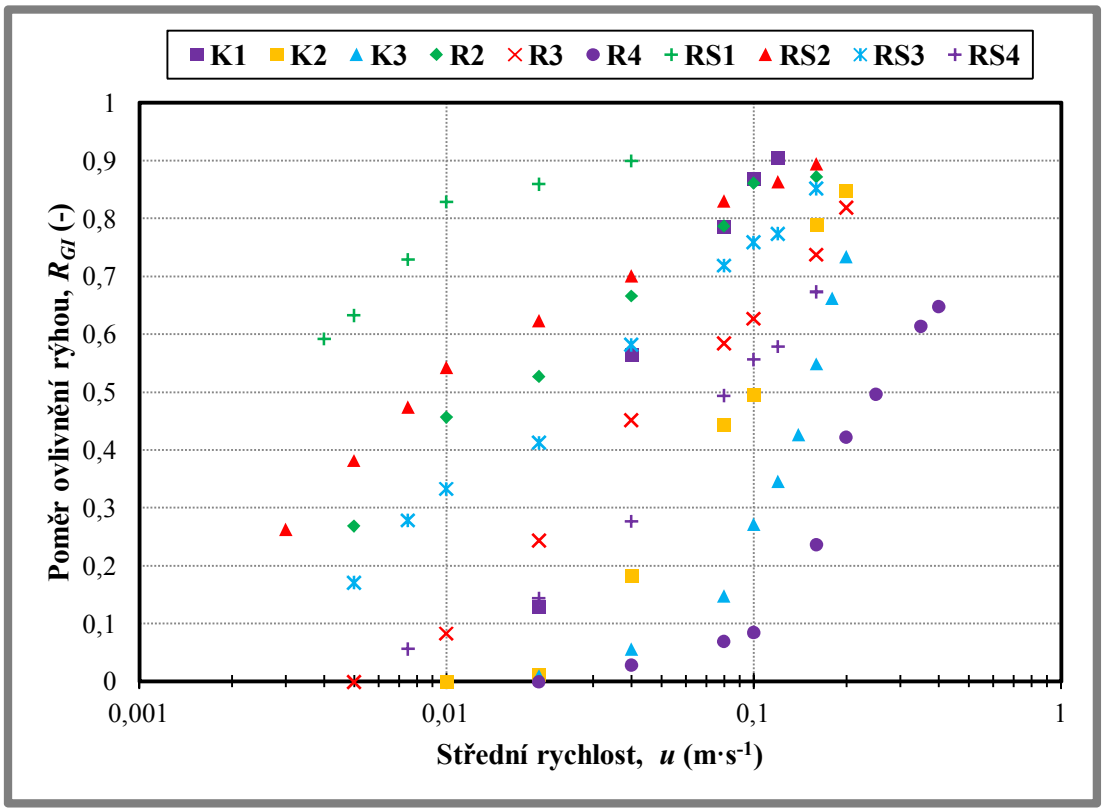
Označení rýhy	Hloubka *H* (nm)	Šířka *W* (µm)	Úhel *α* (°)
K1	825	8	11,65
K2	1142	10	12,87
K3	1789	12	16,6
R2	280	40	0,8
R3	621	52	1,37
R4	1370	63	2,49
RS1	76	31	0,28
RS2	235	42	0,64
RS3	536	49	1,25
RS4	941	56	1,93

Parametry všech těchto vytvořených rýh jsou uvedeny v tab. 5. Rýhy jsou značeny podle zvolené metodiky, která je uvedena v kap. 3.4.3. Se všemi těmito rýhami následně probíhaly experimenty na optickém tribometru při přibližně stejné teplotě 24,5 ± 0,5 °C, stejné hodnotě Hertzově tlaku 0,54 GPa a pro hodnotu poměru *SRR* = 1, -1 a 0. Jako maziva bylo vždy užito minerálního oleje označeného SN650 s dynamickou viskozitou 0,356 Pa·s (při teplotě 25 °C). Během každého experimentu s danou rýhou pak docházelo k modifikaci rychlostí tak, aby byla vytvořena „lift-off“ křivka, přičemž pro získání této křivky byl dodržen vždy stejný postup, který je uveden v kap. 4.2. Všechny vytvořené rýhy jsou pak zobrazeny při průchodu bodovým kontaktem na obr. 4-11, přičemž tyto interferogramy byly zaznamenány vždy pro střední rychlost $u = 0{,}04\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$ a *SRR* = 1.



Obr. 4-11 Interferogramy s jednotlivými rýhami v kontaktní oblasti při stejné střední rychlosti u

Výsledky všech těchto měření s jednotlivými rýhami jsou shrnuty v grafu na obr. 4-12. Tento graf vyjadřuje závislost poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na střední rychlosti u pro hodnotu $SRR = 1$.



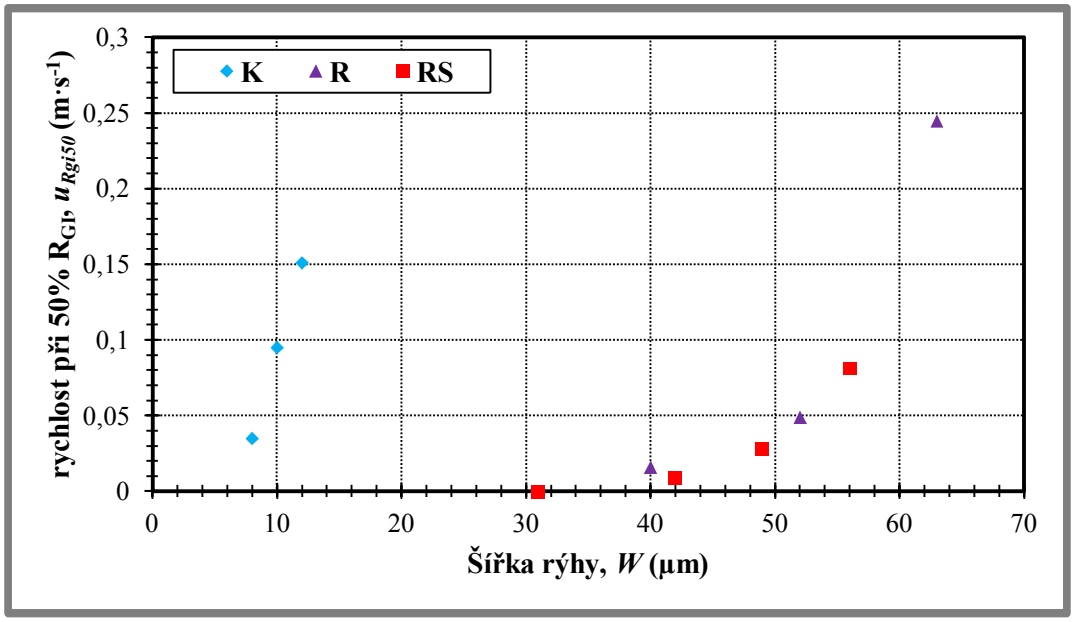
Obr. 4-12 Závislost poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na rychlosti u pro všechny studované rýhy

Z grafu na obr. 4-12 je vidět, že body vyjadřující jednotlivou rýhu se dají opět přibližně proložit logaritmickou křivkou, která se u jednotlivých rýh liší sklonem. Dále se pak dá jednoznačně konstatovat, že vliv geometrie rýhy je evidentní, poněvadž body, které symbolizují danou rýhu, se posouvají v grafu v závislosti na střední rychlosti u. Tudíž že každá rýha potřebuje jinou střední rychlost u k tomu,

aby došlo vlivem rýhy k danému poměru ovlivnění rýhou R_{GI}. Toto je jasně patrné i z interferogramů na obrázku 4-11, které jsou zachyceny pro stejné provozní podmínky, čímž je myšlena stejná rychlost, stejný poměr *SRR*, stejný Hertzův tlak, stejné použité mazivo a přibližně stejná teplota. Na těchto interferogramech je zřetelně vidět, že za stejných podmínek měření je ovlivnění tloušťky mazacího filmu v kontaktní oblasti vlivem rýhy o dané geometrií naprosto odlišné. Graf na obr. 4-12 ale zahrnuje velké množství na sobě závislých hodnot a dají se z něho těžko vyvodit přesnější závěry, jaké mají jednotlivé posuzované parametry geometrie rýhy skutečný vliv na chování mazacího filmu v bodovém kontaktu. Z tohoto důvodu muselo dojít k další parametrizaci. Bylo rozhodnuto, že jednotlivé vlivy geometrie rýhy se budou vyjadřovat v závislosti na střední rychlosti, která vede k poklesu tloušťky mazacího filmu na 50%. Tedy střední rychlosti, která způsobí ovlivnění tloušťky mazacího filmu v kontaktu vlivem rýhy na polovinu tloušťky mazacího filmu při průchodu hladkého povrchu. Tato rychlost bude nazývána rychlost při 50% R_{GI} a bude označována symbolem u_{Rgi50}.

4.6.2 Vliv šířky rýhy

Na obr. 4-13 je zobrazený graf, který vyjadřuje závislost v předešlém odstavci stanovené rychlosti při 50% R_{GI} u_{Rgi50} na šířce rýhy *W*. V tomto grafu jsou barevně odlišeny jednotlivé rýhy podle toho, jakým indentorem byly vyrobeny (K, R a RS). Z grafu je patrné, že pro rýhy vytvořené indentory typu Rockwell (R a RS) je rozložení bodů v grafu přibližně stejné. Pro rýhy vyrobené indentorem typu Knoop (K) je ale rozložení v grafu hodně odlišné, což je způsobené především odlišností těchto rýh, kdy rýhy vyrobené indentorem typu Knoop jsou relativně úzké, oproti rýhám vytvořeným indentory typu Rockwell, ale zároveň jsou poměrně hluboké.

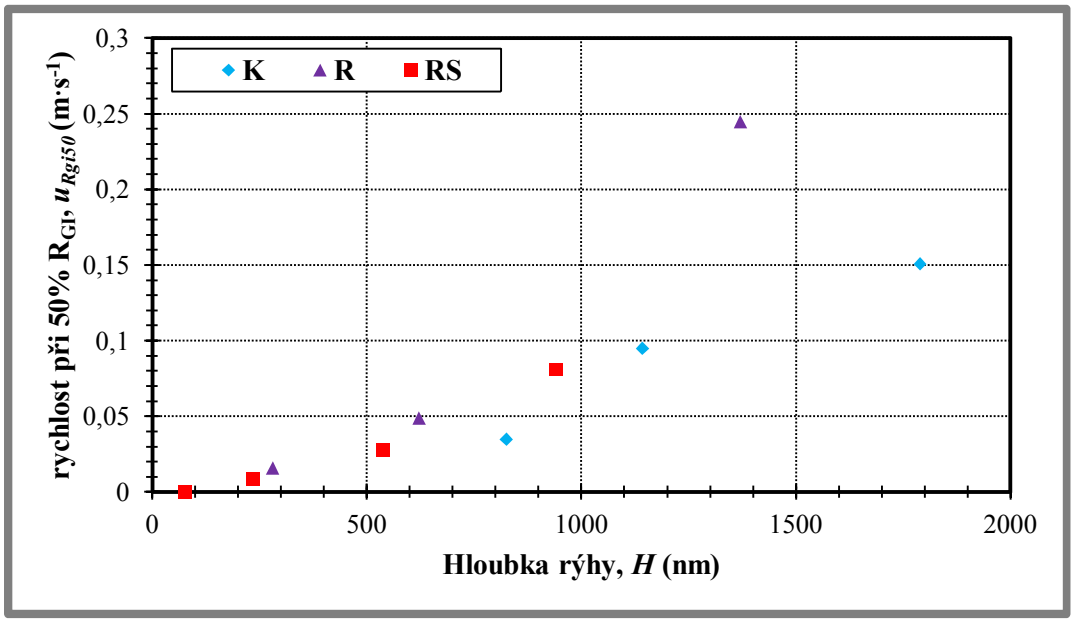


Obr. 4-13 Závislost rychlosti při 50% R_{GI} na šířce rýhy pro rýhy vytvořené indetory Knoop (K) a Rockwell (R a RS), *SRR* = 1

Z grafu se ale dá jasně vyjádřit, že čím více se snižuje šířka rýhy, tím menší je střední rychlost potřebná k ovlivnění mazacího filmu vlivem rýhy na 50% hodnoty při průchodu hladkého povrchu. To znamená, že čím užší je rýha, tím menší představuje riziko pro úplné prolomení mazacího filmu a proto také snižuje pravděpodobnost, že tento průlom mazacího filmu nastane. Na základě tohoto grafu je dále možné tvrdit, že pro rýhu o šířce 31 µm vytvořenou indentorem s označením RS je rychlost potřebná k poklesu tloušťky mazacího filmu na 50% hodnoty při průchodu hladkého povrchu nulová, tedy že rýha těchto parametrů nikdy neovlivní tloušťku mazacího filmu v kontaktu na poloviční hodnotu.

4.6.3 Vliv hloubky rýhy

Graf vyjadřující závislost rychlosti při 50% R_{GI} u_{Rgi50} na hloubce rýhy H je zobrazený na obr. 4-14. V tomto grafu jsou znovu barevně rozlišeny rýhy podle toho, jakým indentorem byly vytvořeny (K, R a RS). Na základě tohoto grafu se dá tvrdit, že pro rýhy vytvořené indetory R a RS je rozložení bodů v grafu přibližně stejné. K odlišnosti, podobně jako u předchozího grafu vyjadřujícího vliv šířky rýhy, opět dochází u rýh vyrobených indentorem s označením K. Odchylka je výraznější zejména u vyšších hloubek rýhy, přičemž se dá říci, že pro tyto vyšší hodnoty hloubky dochází k odlišnému sklonu průběhu bodů. Dá se tvrdit, že tato odchylka je znovu způsobená odlišností těchto rýh, kdy rýhy vyrobené indentorem s označením K mají výrazně nižší šířku.



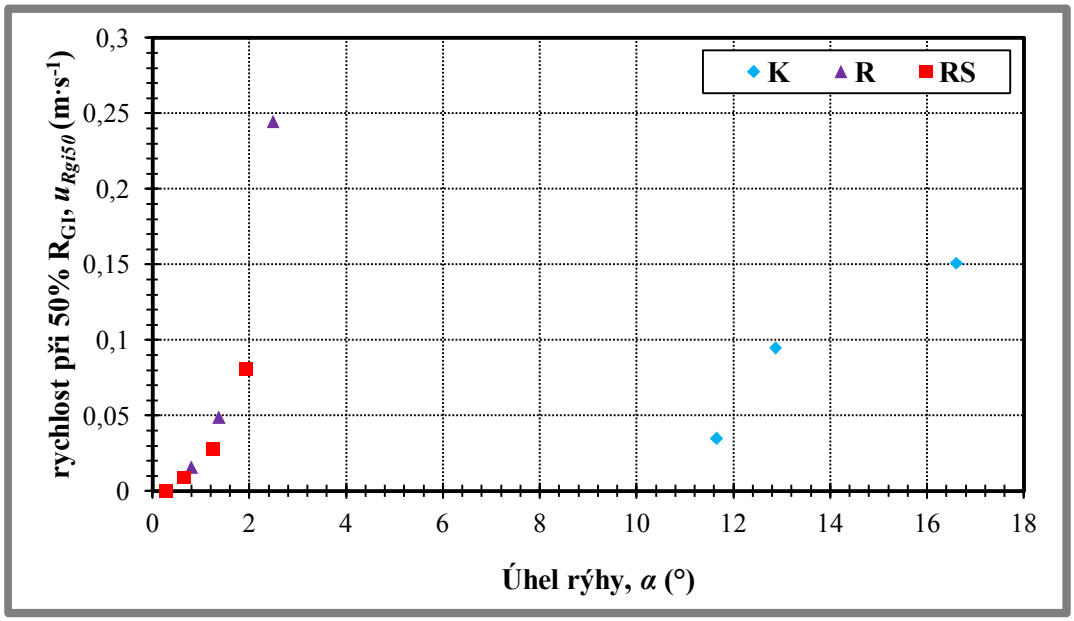
Obr. 4-14 Závislost rychlosti při 50% R_{GI} na hloubce rýhy pro rýhy vytvořené indetory Knoop (K) a Rockwell (R a RS), SRR = 1

Nicméně se dá na základě tohoto grafu vyjádřit podobný trend jako u grafu vyjadřujícího vliv šířky. Tedy že se snižující se hloubkou rýhy je zapotřebí menší střední rychlost, která vede vlivem rýhy k ovlivnění mazacího filmu na 50% hodnoty tloušťky filmu při průchodu hladkého povrchu. Z čehož se dá konstatovat, že snižováním hloubky rýhy se dá předcházet stavu, kdy nastane úplný průlom

mazacího filmu v kontaktní oblasti, který má za následek nežádoucí styk třecích povrchů. Dále se dá z grafu pozorovat, že pro rýhu o hloubce přibližně 100 nm je rychlost potřebná k poklesu tloušťky mazacího filmu na 50% nulová, a proto rýha této hloubky nikdy nevede k poklesu tloušťky mazacího filmu v kontaktní oblasti na poloviční hodnotu. Nutno ovšem podotknout, že tyto výsledky platí pouze pro dané použité mazivo a u dalších maziv se dá očekávat odlišná deformace rýhy v kontaktu, která povede k jinému snížení hloubky rýhy.

4.6.4 Vliv úhlu rýhy

Graf popisující vliv úhlu rýhy na utváření mazacího filmu v bodovém kontaktu je zobrazen na obr. 4-15. Tento graf vyjadřuje závislost rychlosti při 50% R_{GI} u_{Rgi50} na úhlu rýhy α a podobně jako u vlivu šířky a hloubky rýhy jsou na něm barevně rozlišeny rýhy podle toho, jakým indentorem byly vytvořeny (K, R a RS). Na grafu je možné znovu pozorovat podobnost v rozložení bodů pro rýhy vyrobené indentory typu Rockwell (R a RS), ale rozložení bodů náležících rýhám vyrobených indentorem typu Knoop (K) se výrazně liší. Tato odchylka se dá opět vysvětlit výraznou rozdílností v šířce a hloubce těchto rýh.

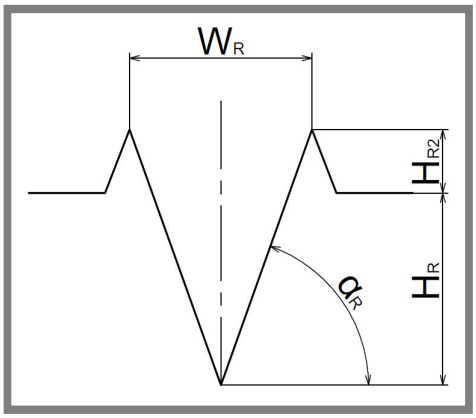


Obr. 4-15 Závislost rychlosti při 50% R_{GI} na úhlu rýhy pro rýhy vytvořené indetory Knoop (K) a Rockwell (R a RS), $SRR = 1$

Z grafu je možné konstatovat, že s přibližováním hodnoty úhlu rýhy směrem k 0 dochází ke snižování střední rychlosti potřebné k poklesu tloušťky mazacího filmu vlivem rýhy na 50%, což je logické, neboť hodnota úhlu rýhy 0 vyjadřuje stav, kdy do kontaktu přichází hladký povrch.

4.6.5 Vliv výstupků vzniklých plastickou deformací

V jednom z experimentů této diplomové práce bylo také zkoumáno, jaký má vliv na utváření mazacího filmu rýha, u které nejsou leštěním (kap. 3.4.2) odstraněny výstupky vzniklé vlivem plastické deformace. K vyjádření tohoto vlivu byla vytvořena rýha s označením R5, jejíž parametry jsou uvedeny v tab. 6. Na této rýze byly hodnoceny její parametry tak, jak je uvedeno na obr. 4-16.



Obr. 4-16 Hodnocení geometrie rýhy s výstupky

Úhel rýhy s výstupky je pak vyjádřen následujícím vztahem:

$$\tan \alpha_R = \frac{2(H_R + H_{R2})}{W} \tag{5}$$

Kde:

α_R	°	- úhel rýhy s výstupky
W_R	µm	- šířka rýhy s výstupky
H_R	µm	- hloubka rýhy s výstupky
H_{R2}	µm	- výška výstupků

Tab. 6 Parametry rýhy s označením R5

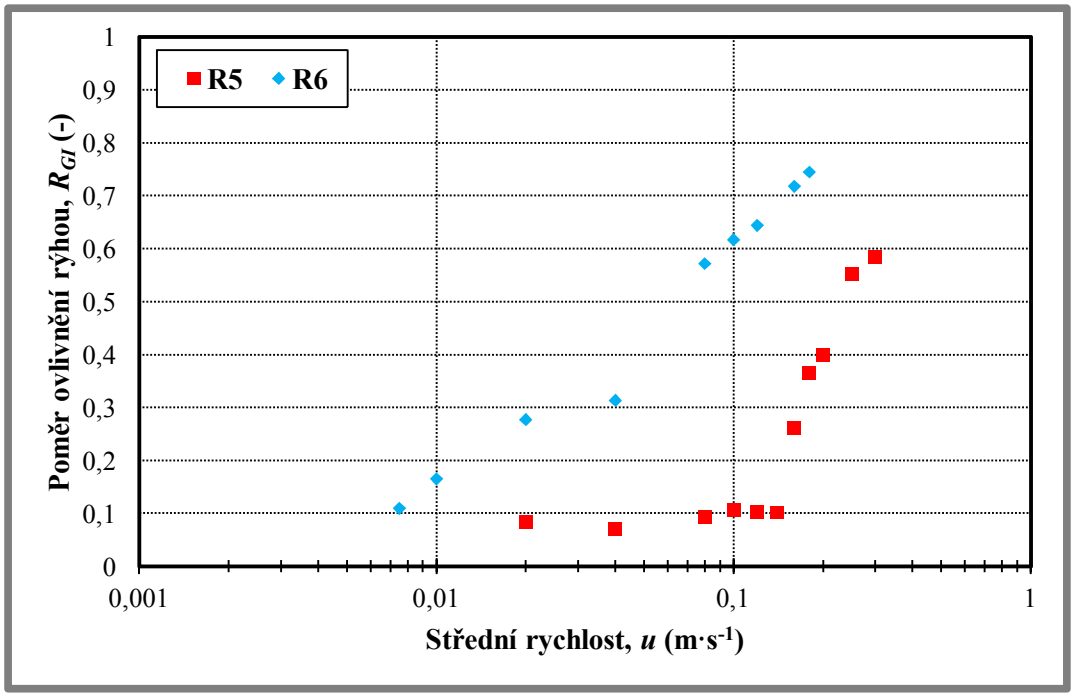
Označení rýhy	W_R (µm)	H_R (nm)	H_{R2} (nm)	α_R (°)
R5	54	932	272	2,55°

S touto rýhou bylo následně provedeno měření na optickém tribometru. Po měření na optickém tribometru byla tato rýha leštěna pro odstranění výstupků. Tato rýha vzniklá leštěním rýhy s výstupky (R5) byla označena jako R6. Parametry rýhy R6 jsou uvedeny v tab. 7.

Tab. 7 Parametry rýhy s označením R6

Označení rýhy	W (µm)	H (nm)	α (°)
R6	53	632	1,37°

Experimenty s oběma těmito rýhami probíhaly za teploty 25 °C a při zatížení 0,54 GPa. Jako maziva bylo užito minerálního oleje s označením SN650 o dynamické viskozitě 0,356 Pa·s (při teplotě 25 °C). Výsledky těchto dvou experimentů jsou pro hodnotu poměru *SRR* = 1 vyneseny v grafu na obr. 4-17. Tento graf vyjadřuje závislost poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na střední rychlosti *u*.



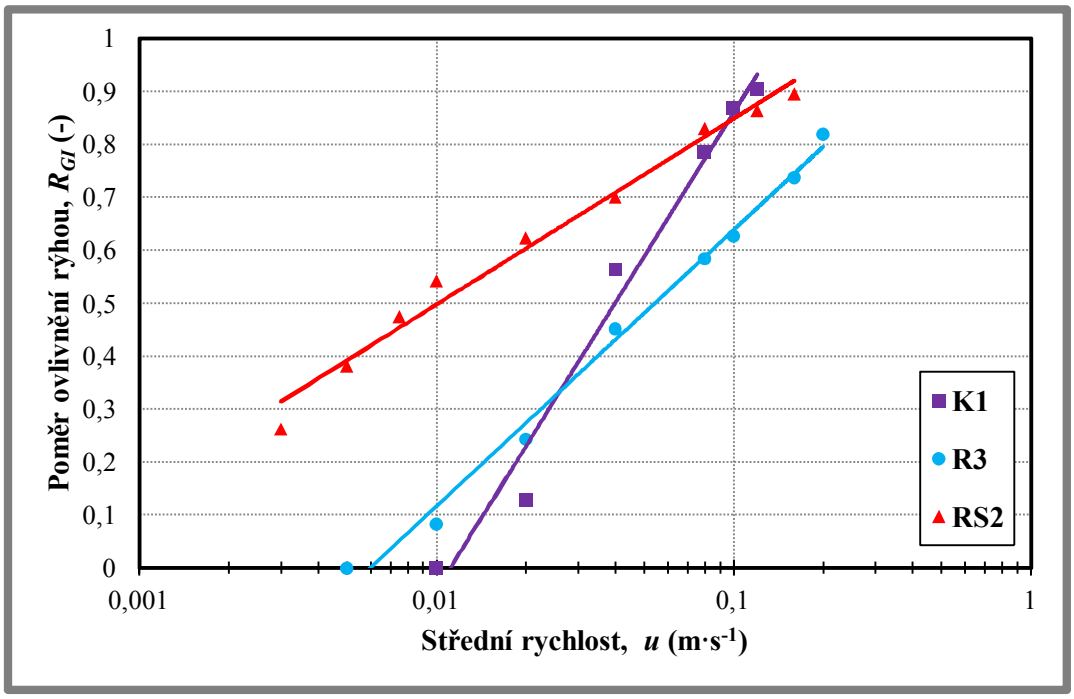
Obr. 4-17 Závislost poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na střední rychlosti *u* pro rýhy R5 a R6

Z tohoto grafu je zřetelně vidět, že vliv přítomnosti výstupků (vzniklých při výrobě rýhy vlivem plastické deformace) na utváření mazacího filmu je znatelný. U rýhy s výstupky, která je označena jako R5, je vidět, že při nižších rychlostech se tloušťka mazacího filmu dlouhodobě držela přibližně na hodnotě R_{GI} = 0,1, což vyjadřuje stav, kdy je tloušťka mazacího filmu ovlivněná vlivem rýhy na 10% vzhledem k hodnotě tloušťky mazacího filmu při průchodu hladkého povrchu. Po tomto přibližně konstantním průběhu pak u rýhy s výstupky (R5) nastává přechod k menšímu ovlivnění tloušťky mazacího filmu vlivem rýhy, přičemž tento přechod je viditelně strmější než u rýhy bez výstupků (R6). Celkově se dá konstatovat, že přítomnost výstupků vzniklých plastickou deformací má za následek celkový posun bodů v grafu směrem doprava k vyšším rychlostem, tedy že rýhy, které nemají odstraněné výstupky, potřebují k menšímu ovlivnění tloušťky mazací vrstvy vyšší rychlost než rýhy s odstraněnými výstupky.

5 DISKUZE

5.1 Vliv rychlosti

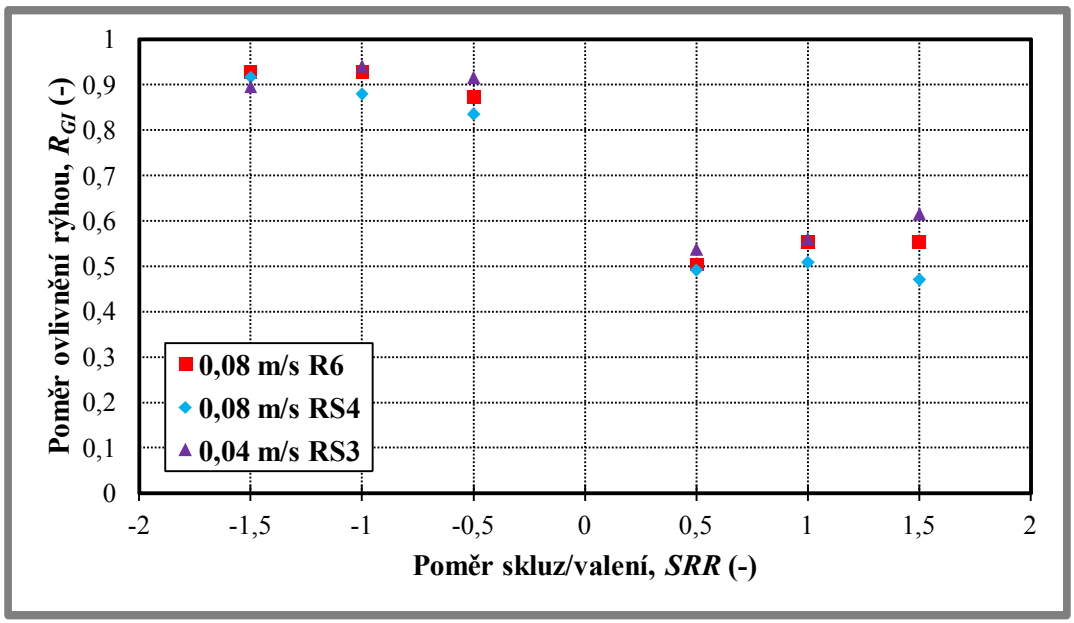
Na základě experimentů provedených v této diplomové práci se dá říci, že při změnách střední rychlosti byly vlivem rýhy procházející kontaktní oblastí pozorovány stejné efekty, které již byly popsány v pracích Kanety [20] a Hartla [22]. Tudíž že při nízkých rychlostech dochází vlivem průchodu rýhy kontaktní oblastí k většímu ovlivnění tloušťky mazacího filmu, které může vést až k úplnému průlomu mazacího filmu a poklesu tloušťky filmu na nulu. Naopak pokud rychlost roste, tak vliv rýhy na tloušťku mazacího filmu není tak značný a efekt poklesu tloušťky filmu vlivem rýhy postupně zaniká. V této diplomové práci pak bylo zjištěno, že tento přechod z oblasti velkého poklesu tloušťky filmu do oblasti, kdy již tloušťka filmu vlivem rýhy není tak ovlivněná, se dá poměrně dobře popsat logaritmickou křivkou. Existence tohoto logaritmického přechodu byla několikrát ověřena pro rýhy odlišných geometrií. K hodnocení jednotlivých vlivů geometrie posuzovaných v této diplomové práci pak byl vybrán parametr u_{Rgi50}, což je střední rychlost, při které dojde vlivem rýhy o dané geometrii k poklesu tloušťky mazacího filmu v kontaktu na poloviční hodnotu vzhledem k tloušťce filmu při průchodu hladkého povrchu. Na základě vyhodnocených dat se dá konstatovat, že v práci popsaný logaritmický přechod do oblasti menšího ovlivnění mazacího filmu rýhou měl pro jednotlivé rýhy odlišnou strmost. Z hlediska dalšího možného pokroku v této problematice by se do budoucna dalo prověřit, zda by se tato odlišná strmost logaritmického přechodu nedala nějak popsat nebo parametrizovat. Tato odlišnost ve strmosti přechodu z oblasti většího ovlivnění rýhou do oblasti menšího ovlivnění rýhou je pro 3 různé rýhy jasně patrná z grafu na obr. 5-1, který vyjadřuje závislost poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na střední rychlosti u.



Obr. 5-1 Závislost poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na střední rychlosti u pro rýhy K1, R3 a RS2

5.2 Vliv prokluzu

U experimentů sloužících k vyjádření vlivu prokluzu byly pozorovány stejné jevy, které již byly popsány Kanetou [19, 20]. Tedy že je patrný vliv kladné a záporné hodnoty prokluzu, kdy pro kladný prokluz nastává ovlivnění mazacího filmu v oblasti před rýhou, naopak u záporného prokluzu se oblast poklesu tloušťky filmu nachází za rýhou. Stejně tak jako v pracích Kanety bylo při experimentech dokázáno, že se zvyšující se hodnotou prokluzu roste délka oblasti ovlivněná rýhou, jak pro záporný prokluz, tak pro kladný prokluz. V této diplomové práci bylo navíc v jednom z experimentů sledováno, jestli vlivem odlišné hodnoty prokluzu dochází ke změnám nejenom v délce ovlivněné oblasti, ale i v hodnotě rýhou ovlivněné tloušťky filmu při daných hodnotách prokluzu. Tento experiment ukázal, že pro kladný i pro záporný prokluz se ovlivněná tloušťka filmu udržuje na přibližně stejné hodnotě (obr. 4-6). Z hlediska časové náročnosti všech provedených měření a z důvodu primárního cíle této diplomové práce (vliv geometrie), nebyl u každé rýhy zkoumán vliv prokluzu, tedy při měření nebyly u každé rýhy při každé rychlosti měřeny všechny hodnoty poměru *SRR* (0,5; -0,5; 1; -1; 1,5 a -1,5) tak, jak tomu bylo při měření popsaném v kap. 4.3. Při několika experimentech ale byla u jedné rychlosti proměřena i závislost na poměru *SRR*, přičemž tato rychlost byla přibližně hodnoty střední rychlosti u_{Rgi50} (pro kladný poměr *SRR*). Výsledky těchto experimentů jsou zobrazeny na obr. 5-2, který vyjadřuje závislost poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na poměru *SRR*.



Obr. 5-2 Závislost poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na poměru *SRR* pro rýhy R6, RS4 a RS3

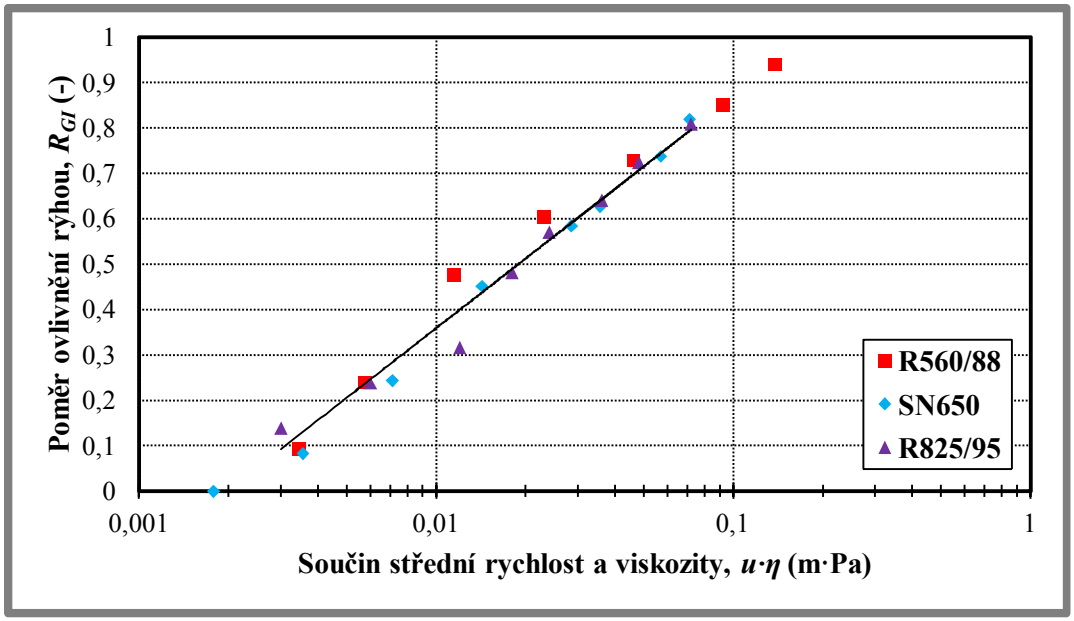
Z tohoto grafu je patrné, že pro jednotlivé rýhy se hodnota poměru R_{GI} drží přibližně v jedné linii pro kladné i záporné hodnoty poměru *SRR,* přičemž tato linie nastává při nižší hodnotě R_{GI} opět pro kladný poměr *SRR*. Z tohoto se dá konstatovat, že pro určitý typ rýh (R a RS) je vliv *SRR* stejný. Na základě naměřených dat se dá vyjádřit, že rýhy s označením R a RS jsou si svojí geometrií dosti podobné a vedly k podobným výsledkům. Dá se ale očekávat, že jiný typ rýh by mohl vést k jinému vlivu *SRR*. Což vymezuje další možnosti, kterými by se dalo na tuto problematiku navázat.

5.3 Vliv zatížení

V této práci byly provedeny experimenty pro vyjádření vlivu zatížení, přičemž rozsah kontaktních tlaků při těchto experimentech byl přibližně 0,4 až 0,8 GPa. Na základě výsledků těchto experimentů se dá konstatovat, že změna zatížení nemá výrazný vliv na utváření mazacího filmu v kontaktní oblasti při průchodu rýhy. Větší odchylka byla pozorována při nižších rychlostech, kdy dochází k většímu ovlivnění tloušťky mazacího filmu vlivem rýhy. Dá se říci, že pro oblast hodnoty poměru R_{GI} přibližně 0,1 až 0,3 byla pozorována větší odchylka mezi jednotlivými zatíženími. Následný přechod do oblasti menšího ovlivnění tloušťky mazacího filmu vlivem rýhy (R_{GI} = 0,4 až 0,9) se pro jednotlivá zatížení přibližně shodoval. Při konfiguraci skleněný disk a ocelová kulička a při užití tohoto tribometru je rozsah zatížení použitý při těchto experimentech maximální možný. Možností, jak přejít do vyšších kontaktních tlaků (až 1,2 GPa), by bylo využít safírového disku. Ovšem zde by již musel být posuzován další faktor ovlivnění, a to změna mechanických vlastností použité kontaktní dvojice. Což je ale také další směr, kam by se práce pokračující v této problematice mohly vést. Užití safírového disku nebo výroba rýhy na jiném materiálu s odlišnými mechanickými vlastnostmi by umožnila studovat, jaký je vliv elasticity materiálu. Tímto by se dalo posuzovat, zda při odlišných mechanických vlastnostech použité kontaktní dvojice dochází vlivem rýhy ke stejným, nebo naopak hodně odlišným jevům.

5.4 Vliv maziva

V kap. 4.5 byly popsány výsledky experimentů, které se zabývaly vyjádřením vlivu maziva. Na obr. 4-10 (kap. 4.5) je zobrazen graf, který vyjadřuje závislost poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na střední rychlosti u. Z výsledků těchto měření a na základě tohoto grafu se dá konstatovat, že při snižující se viskozitě maziva je zapotřebí vyšší střední rychlost u k tomu, aby došlo vlivem průchodu rýhy bodovým kontaktem k ovlivnění tloušťky mazacího filmu v kontaktní oblasti na danou hodnotu poměru ovlivnění R_{GI}.



Obr. 5-3 Závislost poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na součinu střední rychlosti u a viskozity η

V této kapitole je na obr. 5-3 zobrazen graf, který vyjadřuje závislost poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na součinu střední rychlosti u a dynamické viskozity maziva η. Z tohoto grafu je patrné, že pro tyto 3 použité minerální oleje má zvyšování rychlosti a viskozity stejný účinek na samotný mazací proces. Dá se tudíž tvrdit, že navyšování rychlosti a viskozity je ekvivalentní. Ekvivalence rychlosti a viskozity figuruje i v bezrozměrném parametru rychlosti U, který se využívá u Hamrock a Dowsonovi [6] predikční formule. Do tohoto bezrozměrného parametru rychlosti U zasahuje i vliv elasticity materiálu a redukovaného poloměru křivosti. Proto se dá z hlediska dalšího možného výzkumu v této oblasti navrhnout, že by se přechodem na jinou konfiguraci kontaktní dvojice (změnou mechanických vlastností materiálu) mohlo porovnat, zda vliv rýhy na utváření mazacího filmu vede ke stejným výsledkům i při odlišné elasticitě materiálu, kdy se dají očekávat rozdílné deformace rýhy v kontaktu.

Dále se dá na základě provedených experimentů tvrdit, že tyto výsledky dobře popisují vliv viskozity maziva, ale nevyjadřují vliv tlakově-viskózního koeficientu. Jelikož se při experimentech využilo velice podobných minerálních olejů ze skupiny 1, u kterých lze očekávat, že mají přibližně stejný tlakově-viskózní koeficient (20 až 25 GPa), tak skutečná role tlakově-viskózního koeficientu by se musela dále kvalifikovat. Dá se navrhnout použití jiných maziv (např. glycerol, polyalfaolefin) nebo provést měření při jiných teplotách, kdy tlakově-viskózní koeficient se vzrůstající teplotou klesá.

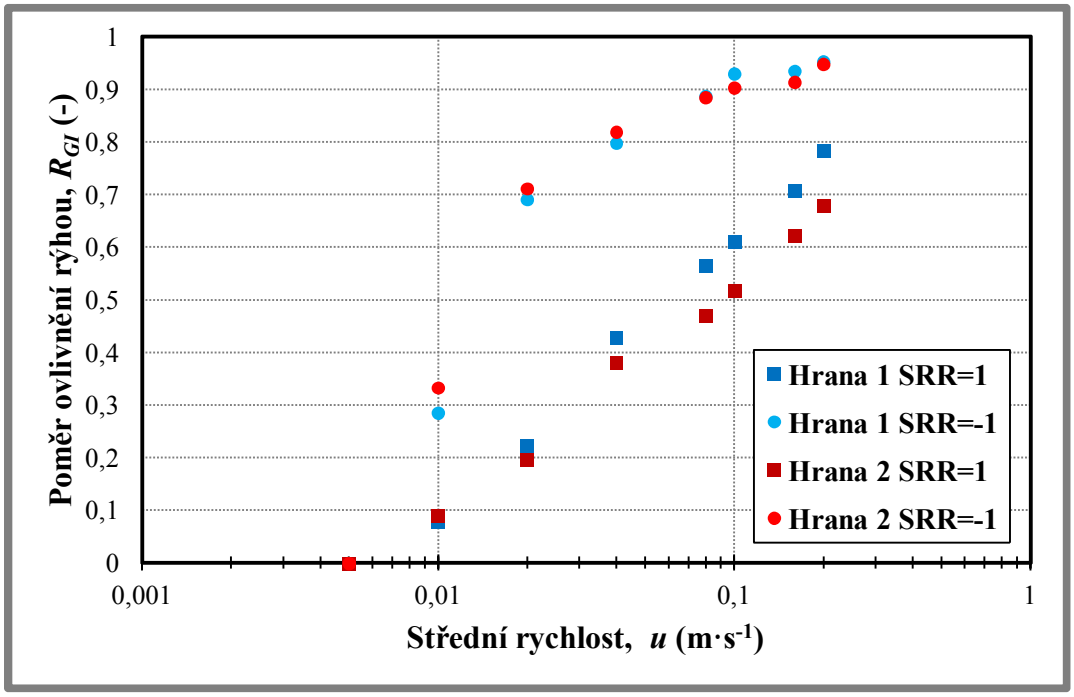
5.5 Vliv geometrie rýhy

Kaneta na základě experimentů se třemi různými rýhami provedených ve své práci [20] vyvodil závěr, že výtok bokem rýhy způsobující pokles tloušťky filmu v kontaktu je řízený geometrií rýhy. V rámci této diplomové práce byl za použití třech různých indentorů (označení K, R a RS) vytvořen a zmapován soubor rýh, které pokrývají rozsah šířek přibližně 10 až 60 µm a rozsah hloubek 100 až 1800 nm. S tímto souborem rýh byly následně provedeny experimenty vždy při stejných pracovních podmínkách, pouze s proměnou střední rychlostí, která se měnila tak, aby došlo k vytvoření „lift-off“ křivky. Na základě všech těchto měření pak bylo prokázáno, že přechod z oblasti velkého ovlivnění rýhou do oblasti menšího ovlivnění se dá u všech studovaných rýh dobře popsat logaritmickým průběhem. Následně byl vybrán jako hodnotící parametr střed tohoto přechodu, tedy rychlost u_{Rgi50}, což je střední rychlost, při které dojde vlivem rýhy o dané geometrii k poklesu tloušťky mazacího filmu v kontaktu na poloviční hodnotu vzhledem k tloušťce filmu při průchodu hladkého povrchu. Čímž se následně dalo posuzovat, která geometrie rýhy je při dané rychlosti tak eminentní, že vede k poklesu tloušťky mazacího filmu na poloviční hodnotu. Na základě výsledků této diplomové práce se tudíž dá stanovit, která rýha s danou geometrií pro pokrytý rozsah hloubek a šířek může způsobovat riziko výrazného poklesu tloušťky filmu v kontaktu vedoucímu až k nežádoucímu styku třecích povrchů. Lze zmínit určité rezervy nebo také podněty pro další studium, poněvadž jak je patrné z grafů na obr. 4-13 a 4-14, tak pro rýhy vytvořené indentory s označením R a RS je rozložení bodů v grafu přibližně stejného průběhu, zatímco rozložení bodů zastupující rýhy vytvořené indentorem s označením K je výrazně odlišné. Tento rozdíl je způsobený poměrem hloubky a šířky rýhy, kdy rýhy vytvořené indentory R a RS mají tento poměr přibližně stejný, naopak u rýh

vytvořených indentorem K se tento poměr podstatně odlišuje, neboť jsou značně úzké, ale naopak výrazně hluboké. Námětem pro následující práce může tedy být pokus o další modifikaci tvaru rýhy. Což by bylo možné zajistit použitím dalších indentorů, které by umožňovaly výrobu rýhy s odlišnou proporcionalitou hloubky a šířky.

5.5.1 Vliv nesymetričnosti rýhy

Je nutné konstatovat, že při většině experimentů provedených v rámci této diplomové práce se využívala vždy pouze jedna hrana rýhy, tudíž že rýha vstupovala do kontaktní oblasti vždy stejnou hranou. Poněvadž vlivem tvorby rýhy a jejím následným leštěním se dá předpokládat, že hrany rýhy nebudou vždy dokonale symetrické, proto byl proveden i jeden experiment, při kterém došlo k záměně hrany vstupující do kontaktní oblasti. Realizace změny vstupní hrany rýhy proběhla pomocí záměny znaménka otáček u pohonů kuličky a disku. Účelem tohoto měření bylo tedy potvrdit, nebo naopak vyvrátit, zda nesymetričnost rýhy má významný vliv na rozložení tloušťky mazacího filmu při průchodu povrchu s rýhou. Experiment byl proveden s rýhou s označením R3. Parametry této rýhy jsou uvedeny v tab. 5. Jako mazivo byl použit olej s označením SN650. Experiment probíhal při Hertzově tlaku 0,54 GPa a hodnotách poměru *SRR* = 1 a -1. Výsledky experimentu jsou zobrazeny na obr. 5-4, který vyjadřuje závislost poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na střední rychlosti *u*. V tomto grafu jsou rozlišeny jednotlivé hrany rýhy červenou a modrou barvou. Hodnoty poměru *SRR* jsou odlišeny odstínem barvy respektující danou hranu.



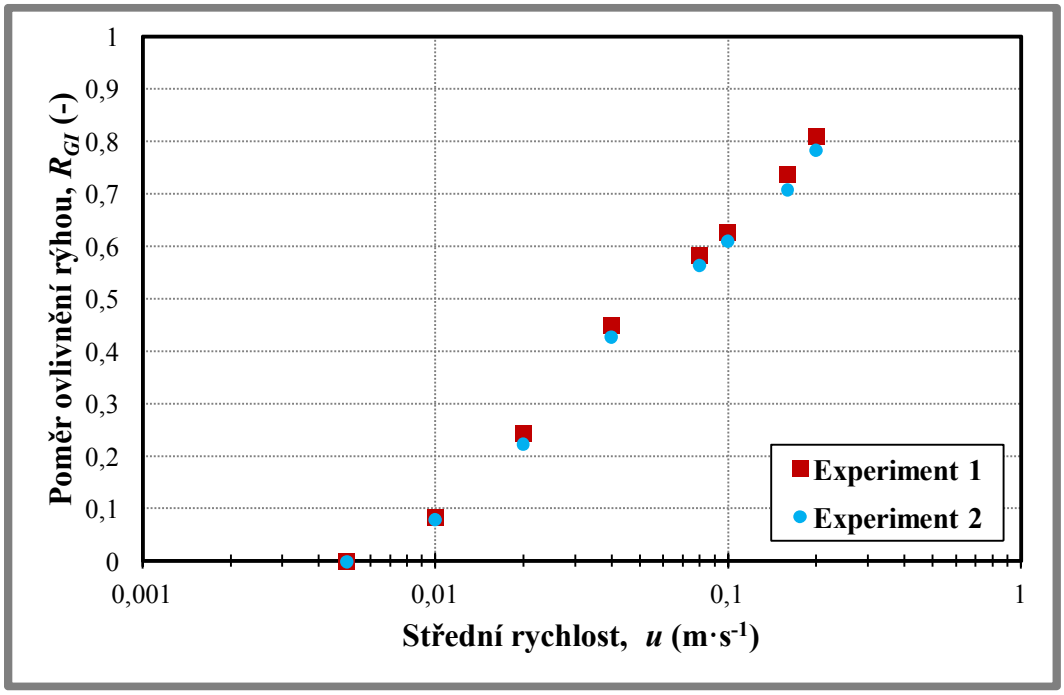
Obr. 5-4 Závislost poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na střední rychlosti *u* pro rýhu R3 a pro odlišnou hranu vstupující do kontaktu

Z grafu na obr. 5-4 je možné pozorovat, že hodnoty poměru ovlivnění rýhou R_{GI} při dané rychlosti se pro obě hrany rýhy liší. Větší odchylka mezi jednotlivými

hranami rýhy nastává pro kladnou hodnotu poměru *SRR*. Na základě výsledků tohoto experimentu se dá konstatovat, že při záměně hrany rýhy, která vstupuje jako první do kontaktní oblasti, dochází k odlišnému ovlivnění tloušťky mazacího filmu v kontaktu. Je tedy zřejmé, že hrany rýhy s označením R3 nejsou dokonale symetrické a jejich nesymetričnost vede k rozdílnému ovlivnění tloušťky filmu v kontaktu.

5.6 Opakovatelnost měření

Jelikož primárním cílem této práce bylo kvantitativně popsat vliv geometrie rýhy, tedy provést experimenty s větším souborem rýh o různé geometrii, bylo provedeno mnoho experimentů, které ovšem nebyly vícekrát opakovány. Proto by se dalo namítnout, jestli je opakovatelnost těchto experimentů dobrá, zda daná rýha povede při opětovném experimentu za stejných podmínek k totožným efektům. Na základě předchozích faktů bylo proto znovu provedeno jedno měření s rýhou s označením R3 (tab. 5) za stejných podmínek, které jsou uvedeny v kap. 4.2. Výsledky tohoto měření jsou zobrazeny v grafu na obr. 5-5, který vyjadřuje závislost poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na střední rychlosti u.



Obr. 5-5 Závislost poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na střední rychlosti u pro rýhu R3 a pro dva různé experimenty

Z tohoto grafu je vidět, že jednotlivé body vyznačující daný experiment se přibližně shodují. K větším odchylkám mezi jednotlivými experimenty dochází při vyšších rychlostech. Maximální rozdíl poměru ovlivnění rýhou R_{GI} nastává při střední rychlostí u = 0,2 m·s^{-1}, přičemž tento rozdíl je přibližně roven hodnotě poměru R_{GI} = 0,03. Vzhledem k tomu se dá konstatovat, že maximální odchylka těchto dvou měření byla přibližně 3%.

6 ZÁVĚR

V rámci této diplomové práce byla provedena řada experimentálních měření, která měla za úkol studovat vliv povrchových rýh na utváření mazacího filmu v EHD mazaném bodovém kontaktu. Experimentální měření se zaměřovala na vyjádření vlivu geometrie rýhy, maziva, zatížení, střední rychlosti a prokluzu. K hodnocení vlivu rýhy na tloušťku mazacího filmu v kontaktní oblasti byl nově stanoven poměr R_{GI} (poměr ovlivnění rýhou) a následně se hodnota tohoto parametru studovala v závislosti na proměnných podmínkách. Poměr R_{GI} efektivně vyjadřuje jev, který je spojený s průchodem rýhy bodovým kontaktem. V této práci pak bylo popsáno, že zvyšováním střední rychlosti dochází ke zvyšování poměru R_{GI}, tudíž že zvyšující se rychlostí dochází k menšímu ovlivnění kontaktní oblasti vlivem rýhy. Přičemž bylo pomocí několika experimentů s různými rýhami dokázáno, že tato závislost se dá popsat logaritmickou křivkou. Na základě tohoto se dá konstatovat, že přechod z oblasti velkého ovlivnění mazacího filmu vlivem rýhy (v limitních případech až úplný průlom mazacího filmu) do oblasti, kdy vliv rýhy v kontaktu není natolik dominantní, má logaritmický průběh. Základním parametrem byl v této diplomové práci zvolen střed již zmiňovaného logaritmického přechodu, což je střední rychlost označená jako u_{Rgi50}. Tedy střední rychlost, která vede k poklesu tloušťky filmu vlivem rýhy na poloviční hodnotu tloušťky filmu na hladkém povrchu. Vlivy jednotlivých parametrů geometrie rýhy pak byly hodnoceny v závislosti na této střední rychlosti. Na základě výsledků této diplomové práce se dá konstatovat:

- Změna kontaktního tlaku (0,38 až 0,76 GPa) nemá podstatný vliv na distribuci tloušťky filmu v kontaktu při průchodu povrchu s rýhou.
- Pro zkoumanou skupinu minerálních olejů bylo možné popsat jejich chování při průchodu rýhy bodovým kontaktem součinem střední rychlosti a viskozity, takže efekt viskozity je plně ekvivalentní k efektu rychlosti.
- Pro pokrytý rozsah šířek (8 až 63 µm) a hloubek (76 až 1789 nm) rýh byla pro každou rýhu stanovena střední rychlost, která vede k poklesu tloušťky mazacího filmu vlivem rýhy na poloviční hodnotu tloušťky mazacího filmu na hladkém povrchu.

Tato diplomová práce experimentálně zkoumala vlivy poměrně velkého množství parametrů a byly v ní vyvozeny podstatné závěry, které jsou prvním krokem k objasnění problematiky vlivu povrchových rýh na utváření mazacího filmu v EHD mazaném bodovém kontaktu. V práci je vysloveno i několik námětů, kterými by se další výzkum v této oblasti mohl směřovat.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] STACHOWIAK, G. a A. BATCHELOR. *Engineering tribology*. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005, xxiv, 801 s. ISBN 07-506- 7836-4.

[2] SHIEGLEY, J. E., C. R. MISCHKE a R. G. BUDYNAS. *Konstruování strojů a strojních součástí.* 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2010, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.

[3] HARTL, M. *Studium a měření velmi tenkých mazacích filmů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2002. 104 s. Habilitační práce.

[4] SOTRES, J. a T. ARNEBRANT. Experimental investigations of biological lubricant at the nanoscale: The cases of synovial joints and the oral cavity. *Lubricants.* 2013, vol. 1, issue 4, s. 102-131. ISSN 2075-4442.

[5] DOWSON, D. a G. R. HIGGINSON. A numerical solution to the elasto-hydrodynamic problem. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences.* 1959, vol. 1, issue 1, s. 6-15. ISSN 2289-4659.

[6] DOWSON, D. a B. J. HAMROCK. Isothermal elastohydrodynamic lubrication of point contacts. III – Fully flooded results. *ASME Trans Journal of Lubrication Technology.* 1977, vol. 99, issue 2, s. 264-275. ISSN 0022-2305.

[7] DAMIENS, B. et. al. Starved lubrication of eliptical EHD contacts. *ASME Journal of Tribology,* 2004, vol. 126, issue 1, s. 105-111. ISSN 0742-4787.

[8] ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ. *Tření, mazání, opotřebení.* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování, [cit. 2015-02-04]. Dostupné z: http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/5CK/prednasky/prednaska4.pdf

[9] ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ. *Tribologické aspekty kontaktních povrchů.* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování, [cit. 2015-02-04]. Dostupné z: http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/prednaska2.pdf

[10] MAINSAH, E., J. GREENWOOD a D. CHETWYND. *Metrology and properties of engineering surfaces.* Boston: Kluwer Academic Publishers, 2001, 449 s. ISBN 0-412-80640-1.

[11] GUANGTENG, G. Mapping of Surface Features in the Thin Film Lubrication Regime, In: D. Dowson, M. Priest, C.M. Taylor, P. Ehret, T.H.C. Childs, G. Dalmaz, Y. Berthier, L. Flamand, J.-M. Georges and A.A. Lubrecht, Editor(s), *Tribology Series*, Elsevier. 1999, vol. 36, s. 175-183. ISSN 0167-8922, ISBN 9780444502674.

[12] FÉLIX-QUIÑONEZ, A. et. al. 2003. New Experimental Results of a Single Ridge Passing Through an EHL Conjunction. *Journal of Tribology*. 2003, vol. 125, issue 2, s. 189-200. ISSN 0742-4787.

[13] FELIX-QUINONEZ, A., P. EHRET a J. L. SUMMERS. Numerical analysis of experimental observations of a single transverse ridge passing

through an elastohydrodynamic lubrication point contact under rolling/sliding conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2004, vol. 218, issue 2, s. 109-123. ISSN 1350-6501.

[14] KANETA, M. et. al. Optical Interferometric Observations of the Effects of a Bump on Point Contact EHL. *ASME, Journal of Tribology*. 1997, vol. 114, issue 4, s. 101-109. ISSN 0742-4787.

[15] MOURIER, L. et. al. Transient increase of film thickness in micro-textured EHL contacts. *Tribology International*. 2006, vol. 39, issue 12, s. 1745-1756. ISSN 0301-679X.

[16] KŘUPKA, I. a M. HARTL. The effect of surface texturing on thin EHD lubrication films. *Tribology International*. 2007, vol. 40, issue 7, s. 1100-1110. ISSN 0301-679X.

[17] WEDEVEN, D. L. a C. CUSANO. Elastohydrodynamic film thickness measurements of artificially produced surface dents and grooves. *ASLE Transactions.*1979, vol. 22, issue 4, s. 369-381. ISSN 1040-2004.

[18] CUSANO, C. a L. D. WEDEVEN. Elastohydrodynamic film thickness measurements of artificially produced nonsmooth surface. *ASLE Transactions.*1981, vol. 24, issue 1, s. 1-14. ISSN 1040-2004.

[19] KANETA, M. Effects of surface roughness in elastohydrodynamic lubrication. *JSME international journal. Ser. 3, Vibration, control engineering, engineering for industry.* 1992, vol. 35, issue 4, s. 535-546. ISSN 0914-8825.

[20] KANETA, M. a H. NISHIKAWA. Local reduction in thickness of point contact ehl films caused by a tranversly oriented moving groove and its recovery. *ASME, Journal of Tribology*. 1994, vol. 116, issue 3, s. 635-639. ISSN 0742-4787.

[21] OMASTA, M. *Studium utváření elastohydrodynamických mazacích filmů u hypoidních převodů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 97 s. Vedoucí dizertační práce prof. Ing. Ivan Křupka, Ph.D.

[22] HARTL, M. et. al. Experimental study of lubricant film thickness behavior in the vicinity of real asperities passing through lubricated contact. *Tribology Transactions.* 2004, vol. 47, issue 3, s. 376-385. ISSN 1040-2004.

[23] ALI, F. et. al. Experimental and numerical investigation on the behavior of transverse limited microgrooves in EHL point contacts. *Tribology International*. 2015, vol. 84, s. 81-89. ISSN 0301-679X.

[24] ŠPERKA, P. *In-situ studium změny topografie třecích povrchů v elastohydrodynamickém kontaktu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 143 s. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

[25] RADA PRO VÝZKUM, VÝVOJ A INOVACE. *Definice druhů výsledků výzkumu, experimentálního vývoje a inovací.* [online]. Praha: Rada pro výzkum, vývoj a inovace, © 2013 [cit. 2015-02-20]. Dostupné z: http://www.vyzkum.cz/FrontClanek.aspx?idsekce=29415

[26] SEDLAČÍK, J. *Progresivní zařízení pro tvorbu mikrovtisků.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 61 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

[27] BRUKER. *3D Industrial optical microscopy – ContourGT-X.* [online]. Bruker: ©2015, [cit. 2015-03-15]. Dostupné z: https://www.bruker.com/products/surface-analysis/3d-industrial-optical-microscopy/contourgt-x/overview.html

[28] ŠPERKA, P. *3D optický profilometr pro mapování inženýrských povrchů.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. 83 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

[29] ZIMMERMAN, M. *Chování EHD mazacího filmu při náhlých změnách rychlosti a zatížení.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 107 s. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

[30] ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ. *Software pro vyhodnocování chromatických interferogramů kolorimentrickou interferometrií.* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování, [cit. 2015-03-20]. Dostupné z: http://uk.fme.vutbr.cz/www_uk/texty/vyzkum_tribologie/vybaveni

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

8.1 Seznam použitých zkratek

EHD - elastohydrodynamické
FSI - Fakulta strojního inženýrství
PSI - Phase Shifting Interferometry
ÚK - Ústav konstruování
VSI - Vertical Scanning Interferometry
VUT - Vysoké učení technické v Brně
μEHD - mikroelastohydrodynamické

8.2 Seznam použitých symbolů

E' [GPa] - redukovaný modul pružnosti
E_B [GPa] - modul pružnosti oceli
E_D [GPa] - modul pružnosti skla
h_{GImin} [nm] - minimální tloušťka filmu ovlivněná průchodem rýhy
h_{min} [μm] - minimální tloušťka filmu
h_{smooth} [nm] - tloušťka filmu při průchodu hladkého povrchu
H [μm] - hloubka rýhy
H_R [μm] - hloubka rýhy s výstupky
H_{R2} [μm] - výška výstupků
R [mm] - poloměr kuličky
R_{GI} - poměr ovlivnění rýhou („*groove influence ratio*“)
Rq_a [μm] - průměrná kvadratická úchylka profilu tělesa a
Rq_b [μm] - průměrná kvadratická úchylka profilu tělesa b
R_{red} [μm] - redukovaná kvadratická úchylka třecích povrchů
SRR - poměr skluz/valení („*slipe to roll ratio*“)
u [m·s^{-1}] - střední rychlost
u_B [m·s^{-1}] - rychlost kuličky
u_D [m·s^{-1}] - rychlost disku
u_{Rgi50} [m·s^{-1}] - střední rychlost při 50% R_{GI}
U - bezrozměrný parametr rychlosti
W [μm] - šířka rýhy
W_R [μm] - šířka rýhy s výstupky
α [°] - úhel rýhy
α_R [°] - úhel rýhy s výstupky
Λ - parametr mazání
μ_B - Poissonův poměr oceli
μ_D - Poissonův poměr skla
η [Pa·s] - dynamická viskozita maziva (při 25 °C)
η_0 [Pa·s] - viskozita za atmosférického tlaku

9 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1-1 Povrch strojních součástí [10] **13**
Obr. 1-2 Stribeckova křivka [8] **15**
Obr. 1-3 Závislost součinitele tření na parametru mazání [9] **16**
Obr. 1-4 Mezné mazání [4] **16**
Obr. 1-5 Smíšené mazání [9] **17**
Obr. 1-6 EHD mazání [9] **17**
Obr. 1-7 Hydrodynamické mazání [9] **17**
Obr. 1-8 Kontakt nekonformních těles [3] **18**
Obr. 1-9 Povrchové nerovnosti: a) výstupek, b) dent, c) rýha [24] **19**
Obr. 1-10 Simulátor kontaktu typu ball on disc [17] **20**
Obr. 1-11 Interferogram s rýhou orientovanou vzhledem k toku maziva: a) kolmo b) rovnoběžně [17] **20**
Obr. 1-12 Interferogram s rýhami orientovanými vzhledem k toku maziva: a) kolmo b) rovnoběžně [17] **21**
Obr. 1-13 Experimentální aparatura [19] **22**
Obr. 1-14 Průchod rýhy bodovým kontaktem: a) *SRR* = 1,5, b) *SRR* = -1,5 [19] **23**
Obr. 1-15 Profily zkoumaných rýh: a) typ A, b) typ B. c) typ C [20] **23**
Obr. 1-16 Průchod rýhy typu B kontaktem při $U = 9 \cdot 10^{-12}$ a pro *SRR*: a) 1,5, b) 0, c) -1,5 [20] **24**
Obr. 1-17 Interferogramy s rýhou typu B v kontaktní oblasti pro *SRR*: a) 0,5, b) 1, c) -0,5, d) 1 [20] **25**
Obr. 1-18 Průchod rýhy typu B kontaktní oblastí při $U = 4 \cdot 10^{-11}$ a pro *SRR*: a) 1,5, b) 0, c) -1,5 [20] **25**
Obr. 1-19 Rýha na reálném povrchu: a) topografie, b) v kontaktní oblasti [22] **26**
Obr. 1-20 Optický tribometr typu ball on disc [22] **26**
Obr. 1-21 Profil studované rýhy [23] **27**
Obr. 1-22 Interferogram při průchodu: a) hladkého povrchu, b) povrchu s rýhou [23] **27**
Obr. 3-1 Zařízení pro tvorbu mikrotextur [26] **30**
Obr. 3-2 Optický profilometr firmy Bruker [27] **31**
Obr. 3-3 Optický tribometr typu ball on disc dostupný na ÚK **32**
Obr. 3-4 Prostředí softwaru Achiles [30] **33**
Obr. 3-5 Hodnocení geometrie rýhy **34**
Obr. 3-6 Profil rýhy s výstupky **34**
Obr. 3-7 Leštící souprava **35**
Obr. 3-8 Použité indentory: a) Rockwell R, b) Rockwell RS, c) Knoop K **36**
Obr. 4-1 Průchod rýhy EHD mazaným bodovým kontaktem pro *SRR*: a-e) 1, f-j) -1 **37**
Obr. 4-2 Stanovení hodnocených tloušťek mazacího filmu: a) h_{smooth}, b) h_{GImin} **38**
Obr. 4-3 Závislost poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na střední rychlosti u pro rýhu R3 **39**
Obr. 4-4 Interferogramy s rýhou R3 v bodovém kontaktu při různé střední rychlostí u **40**
Obr. 4-5 Graf vyjadřující závislost poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na střední rychlosti u pro rýhu R1 a různé hodnotu poměru *SRR* **41**
Obr. 4-6 Graf závislosti poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na poměru *SRR* pro různé střední rychlosti u **42**
Obr. 4-7 Interferogramy odpovídající jednotlivým hodnotám *SRR* **42**

Obr. 4-8 Graf závislosti poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na střední rychlosti u pro různé zatížení **43**
Obr. 4-9 Interferogramy odpovídající jednotlivým hodnotám Hertzova tlaku **43**
Obr. 4-10 Graf závislosti poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na střední rychlosti u pro 3 různá maziva **44**
Obr. 4-11 Interferogramy s jednotlivými rýhami v kontaktní oblasti při stejné střední rychlosti u **46**
Obr. 4-12 Závislost poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na rychlosti u pro všechny studované rýhy **46**
Obr. 4-13 Závislost rychlosti při 50% R_{GI} na šířce rýhy pro rýhy vytvořené indetory Knoop (K) a Rockwell (R a RS), $SRR = 1$ **47**
Obr. 4-14 Závislost rychlosti při 50% R_{GI} na hloubce rýhy pro rýhy vytvořené indetory Knoop (K) a Rockwell (R a RS), $SRR = 1$ **48**
Obr. 4-15 Závislost rychlosti při 50% R_{GI} na úhlu rýhy pro rýhy vytvořené indetory Knoop (K) a Rockwell (R a RS), $SRR = 1$ **49**
Obr. 4-16 Hodnocení geometrie rýhy s výstupky **50**
Obr. 4-17 Závislost poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na střední rychlosti u pro rýhy R5 a R6 **51**
Obr. 5-1 Závislost poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na střední rychlosti u pro rýhy K1, R3 a RS2 **52**
Obr. 5-2 Závislost poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na poměru SRR pro rýhy R6, RS4 a RS3 **53**
Obr. 5-3 Závislost poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na součinu střední rychlosti u a viskozity η **54**
Obr. 5-4 Závislost poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na střední rychlosti u pro rýhu R3 a pro odlišnou hranu vstupující do kontaktu **56**
Obr. 5-5 Závislost poměru ovlivnění rýhou R_{GI} na střední rychlosti u pro rýhu R3 a pro dva různé experimenty **57**

10 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Mechanické vlastnosti kontaktní dvojice [24] **32**
Tab. 2 Parametry použitých maziv **33**
Tab. 3 Parametry rýhy s označením R3 **39**
Tab. 4 Parametry rýhy s označením R1 **41**
Tab. 5 Soubor studovaných rýh a jejich parametry **45**
Tab. 6 Parametry rýhy s označením R5 **50**
Tab. 7 Parametry rýhy s označením R6 **50**