



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

SIMULÁTOR HERTZOVA KONTAKTU

HERTZIAN CONTACT APPARATUS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JAKUB MAREK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. MARTIN HARTL, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jakub Marek

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

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

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

Simulátor Hertzova kontaktu

v anglickém jazyce:

Hertzian Contact Apparatus

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem diplomové práce je analýza experimentálního zařízení sloužícího k stanovení velikosti reálné stykové plochy Hertzova kontaktu dvou těles.

Cíle diplomové práce:

Diplomová práce musí obsahovat:

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Formulaci řešeného problému a jeho analýzu
4. Vymezení cílů práce
5. Návrh metodického přístupu k řešení
6. Analýzu a interpretaci získaných údajů
7. Závěr

Forma diplomové práce: průvodní zpráva, technická dokumentace.

Typ práce: analytická

Účel práce: pro V-V a tvůrčí činnost ÚK

Seznam odborné literatury:

Diaconescu, E.; Glovnea, M. Visualization and Measurement of

Contact Area by Reflectivity. *Journal of Tribology*, 2004, vol. 128, pp. 915-917.

Fisher-Crips, A.C. The Hertzian contact surface. *Journal of Materials Science*, 1999, vol. 34, pp.129-137.

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 26.11.2010

L.S.

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

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá konstrukcí experimentální aparatury, která využívá fázově řízenou interferometrii pro studium reálných kontaktů in-situ. Jedná se o inovativní přístup řešení kontaktních úloh, který nebyl doposud v odborné literatuře popsán. Bylo provedeno experimentální měření kontaktní úlohy: ocelová, mosazná koule – skleněný disk. Na základě výsledků provedených experimentů byla nastíněna aplikace fázově řízené interferometrie v oblasti reálných kontaktů.

Klíčová slova: simulátor Hertzova kontaktu, fázově řízená interferometrie, reálný kontakt, standard VLSI

ABSTRACT

This diploma thesis deals with the development of experimental apparatus for measuring real contacts. Phase Shift Interferometry was used for measuring the contact of steel or brass ball and glass plate. The approach which is described in this thesis is a unique. It was demonstrated, that the deformation of contact body is possible to determine. There is some discussion about the final application of this optic profilometry for measuring real contacts.

Key words: Hertzian contact apparatus, Phase Shift Interferometry, real contact, standard VLSI

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MAREK, J. Simulátor Hertzova kontaktu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 68 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně, za použití odborné literatury a pod odborným vedením prof. Ing. Martina Hartla, Ph.D.

.....

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Martinu Hartlovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady. Také bych chtěl poděkovat Ing. Petru Šperkovi za podnětné připomínky a odborné vedení při provádění experimentů.

OBSAH

OBSAH	11
ÚVOD	13
1. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
1.1. Analytické řešení Hertzova kontaktu.....	14
1.2. Analytické řešení reálného kontaktu.....	16
1.2.1. Kontakt nominálně plochých reálných těles.....	18
1.2.2. Kontakt reálné desky s koulí.....	19
1.2.3. Podmínka plasticity.....	20
1.3. Experimentální přístup.....	21
2. FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO ANALÝZA	31
2.1. Formulace řešeného problému.....	31
2.2. Analýza řešeného problému.....	32
3. VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE	33
4. NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ	34
4.1. Experimentální aparatura.....	34
4.1.1. Mechanická část.....	35
4.1.2. Optická část.....	38
4.1.3. Snímací software.....	42
4.2. Experimentální materiál.....	43
4.3. Měřicí metoda.....	45
4.3.1. Fázově řízená interferometrie (PSI).....	45
4.3.2. Phase unwrapping.....	48
4.3.3. Filtrace složek povrchu.....	49
4.3.4. Sesazování snímků.....	50
4.4. Postup měření.....	50
5. ANALÝZA A INTERPRETACE ZÍSKANÝCH ÚDAJŮ	51
5.1. Měření standardu VLSI.....	51
5.2. Měření kontaktu ocel – sklo.....	52
5.3. Měření kontaktu mosaz – sklo.....	52
5.4. Závislost profilu drsnosti na zatížení.....	54
5.5. Závislost R parametrů posuzovaného profilu na zatížení.....	56

5.6. Diskuze.....	58
6. ZÁVĚR	61
7. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	62
8. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN.....	65
9. SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK	66
9.1. Seznam obrázků.....	66
9.2. Seznam tabulek.....	67
10. SEZNAM PŘÍLOH	68

ÚVOD

Snahou celé společnosti je vyrábět stále účinnější stroje s požadovanou životností při co nejnižších energetických náročnostech. Problematiku účinnosti a životnosti strojů řeší především inženýrské činnosti v oblasti tření, opotřebení nebo kontaktní únavy. Společným vstupujícím parametrem těchto úloh je velikost kontaktní oblasti. První analyticky vyřešená kontaktní úloha byla provedena na konci 19. století H. R. Hertzem [1]. Od té doby doznala kontaktní mechanika značného pokroku, a to jak v oblasti teoretické, tak experimentální. Mnohé teoretické modely řeší kontaktní úlohy těles za předpokladu opomenutí jejich textury povrchu. Avšak bylo dokázáno mnohými autory [2, 3, 4], že textura povrchů, která úzce souvisí se zvoleným dokončovacím způsobem obrábění, má obrovský vliv na utváření kontaktních oblastí a tedy i na generování třecích sil. Proto je nezbytné zabývat se kontaktem reálných těles a hledat nové důležité fyzikální zákonitosti.

Experimentální měření jsou jak z hlediska historického, tak z hlediska získaných výsledků významnou metodou pro stanovení velikosti kontaktní oblasti, přičemž experimentální aparatury v posledních třiceti letech dosahují těch nejvyšších přesností. Asi nejvíce experimentů bylo provedeno optickými metodami, které jsou ve většině případů založeny na interferenci světla. Obzvláště vhodné se jeví optické profilometry, které jsou schopny analyzovat vznikající deformace povrchových výstupků. Ačkoliv fázově řízená interferometrie (PSI) spadá také do oblasti optických profilometrů, v rámci rešeršní části se nepodařilo nalézt její aplikaci pro řešení problematiky kontaktů reálných povrchů.

Cílem této diplomové práce je tedy nalézt odpověď na otázku, zdali je fázově řízená interferometrie vhodnou experimentální metodou pro stanovení velikosti reálné kontaktní oblasti, případně pro stanovení jiných důležitých kontaktních parametrů. Cesta ke splnění tohoto cíle spočívá v konstrukci experimentální aparatury, na které budou provedena měření kontaktních úloh těles rozličných materiálů, rozměrů a struktury povrchu. Pořízená data budou porovnána s experimenty, které byly provedeny jinou měřicí metodou.

1. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

1.1. Analytické řešení Hertzova kontaktu

Pochopit princip a chování kontaktu dvou reálných těles je důležité při řešení inženýrských činností v oblasti opotřebení, tření, mazání nebo kontaktní únavě, a to především za účelem zvýšení životnosti a účinnosti strojů nebo mechanismů. Řešení této problematiky není zcela triviální záležitostí a vždy je nutné brát v úvahu velkou škálu důležitých informací, jakými jsou např. struktura povrchu, přítomnost maziva, materiálové charakteristiky, geometrie kontaktních těles aj.

Vůbec první matematický popis problematiky kontaktu těles se datuje k roku 1882, kdy německý fyzik H. R. Hertz shrnuje problematiku suchého statického kontaktu dvou nekonformních hladkých těles, jež se deformují pouze elasticky. Tyto zjednodušující předpoklady a omezení způsobují fakt, že je tato teorie v některých případech neaplikovatelná, případně poskytuje nepřesné výsledky.

Jsou-li v kontaktu dvě elasticky se deformující tělesa zatížená normálovou silou, dojde k vytvoření kontaktní oblasti, jejíž velikost je nelineárně úměrná k zatížení ($A \sim W^{2/3}$). Při řešení inženýrských činností je důležité znát nejen velikost kontaktní oblasti, ale také velikost a distribuci tlaku. V Hertzově typu kontaktu má tlak parabolický charakter a jeho maximální hodnota leží na spojnici středů dotýkajících se těles. Je důležité poznamenat, že mimo kontaktní oblast vzniká tahové napětí, které u křehkých materiálů způsobuje kruhové praskliny [5].

Řešení Hertzova kontaktu je v této diplomové práci, vzhledem k širokému rozsahu teorie, odvozeno pouze pro kontakt dvou koulí odlišných poloměrů a vychází z práce Johnsona [6].

Poloměr kontaktní oblasti je:

$$a = \frac{\pi p_0 R}{2E^*} = \left(\frac{3WR}{4E^*} \right)^{1/3}, \quad (1)$$

kde redukovaný modul pružnosti je:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2}, \quad (2)$$

redukovaný poloměr je:

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

velikost kontaktní oblasti je:

$$A = \pi a^2 = \pi R \delta, \quad (4)$$

velikost kontaktního tlaku p v závislosti na zvoleném poloměru r je:

$$p = p_0 \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

maximální Hertzův tlak je:

$$p_0 = \frac{3W}{2\pi a^2} = \left(\frac{6WE^{*2}}{\pi^3 R^2} \right)^{1/3}, \quad (6)$$

bude-li kontaktní rozhraní ležet v rovině x - y a osa z bude procházet středy polokoulí, potom vznikající normálové a smykové napětí je popsáno těmito třemi rovnicemi:

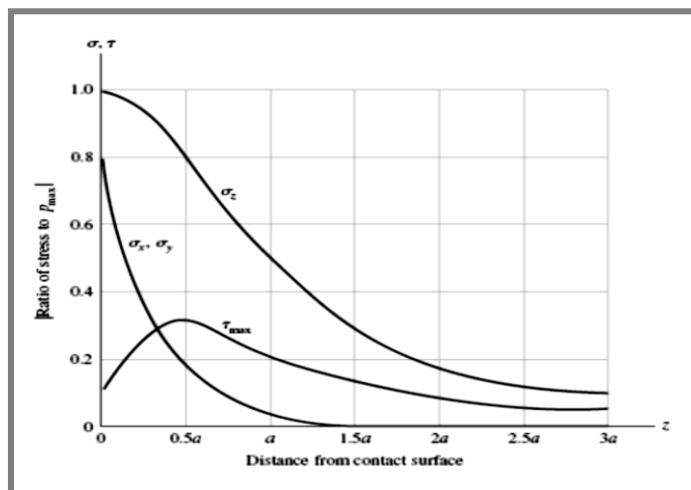
$$\sigma_1 = \sigma_x = \sigma_y = -p_0 \left[\left(1 - \frac{|z|}{a} \tan^{-1} \frac{1}{\left| \frac{z}{a} \right|} \right) (1 + \nu) - \frac{1}{2 \left(1 + \frac{z^2}{a^2} \right)} \right] \quad (7)$$

$$\sigma_3 = \sigma_z = \frac{-p_0}{1 + \frac{z^2}{a^2}}, \quad (8)$$

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}, \quad (9)$$

kde:

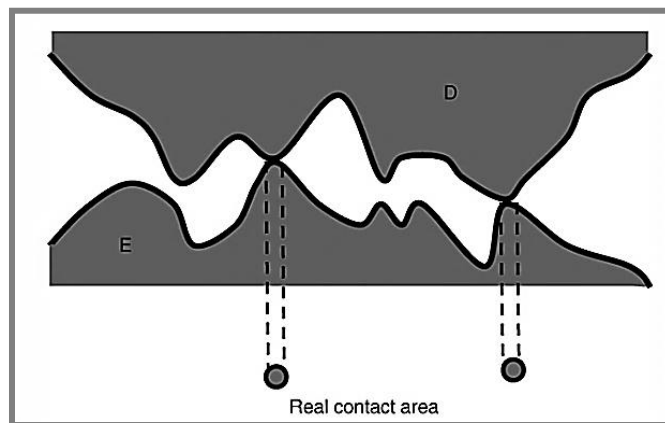
A	m^2	- velikost kontaktní oblasti,
E^*	Pa	- redukovaný modul pružnosti v tahu,
$E_{1,2}$	Pa	- modul pružnosti v tahu tělesa 1 a 2,
R	m	- redukovaný poloměr,
$R_{1,2}$	m	- poloměr tělesa 1 a 2,
W	N	- normálová síla,
a	m	- poloměr kontaktní oblasti,
p_0	Pa	- maximální Hertzův tlak,
δ	m	- přiblížení,
$\sigma_{1,3}$	Pa	- hlavní napětí,
$\sigma_{x,y,z}$	Pa	- normálové napětí,
τ_{max}	Pa	- maximální smykové napětí,
$\nu_{1,2}$		- Poissonovo číslo.



Obr. 1 Průběh napětí při kontaktu dvou koulí [41].

Z obr. 1 je patrné, že maximální smykové napětí vzniká pod povrchem tělesa ve vzdálenosti přibližně $0,48a$. V těchto místech, vlivem kontaktní únavy, vznikají první trhlinky, které se postupně rozrůstají až na povrch tělesa. Mezní stav tohoto porušení se nazývá pitting.

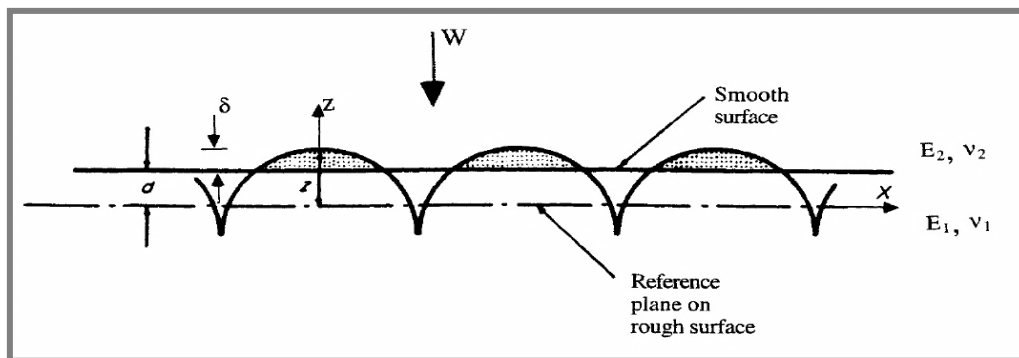
Jak už bylo zmíněno, Hertz odvodil jeho teorii na základě zjednodušujících předpokladů, přičemž jedním z nich je uvažování kontaktu téměř dokonale hladkých těles. Skutečné strojní součásti nejsou dokonale hladké, ale jejich povrch tvoří textura, která vzniká důsledkem strojního opracování nebo jako následek opotřebení. Tato tělesa jsou v odborné literatuře nazývána jako reálná. Jsou-li v kontaktu dvě zatížená reálná tělesa s nedostatečně únosným mazacím filmem nebo bez maziva, jejich kontakt je zprostředkován především na výstupcích povrchových nerovností, jak je schematicky znázorněno na obr. 2. V důsledku vnějšího zatížení dojde k vytvoření několika mikro-kontaktů, které v součtu představují reálnou kontaktní oblast. Tato oblast je pouhým zlomkem nominální plochy, kterou by měla dvě ideálně hladká tělesa při stejných kontaktních podmínkách.



Obr. 2 Kontakt reálných těles je zprostředkován převážně na povrchových výstupcích [42].

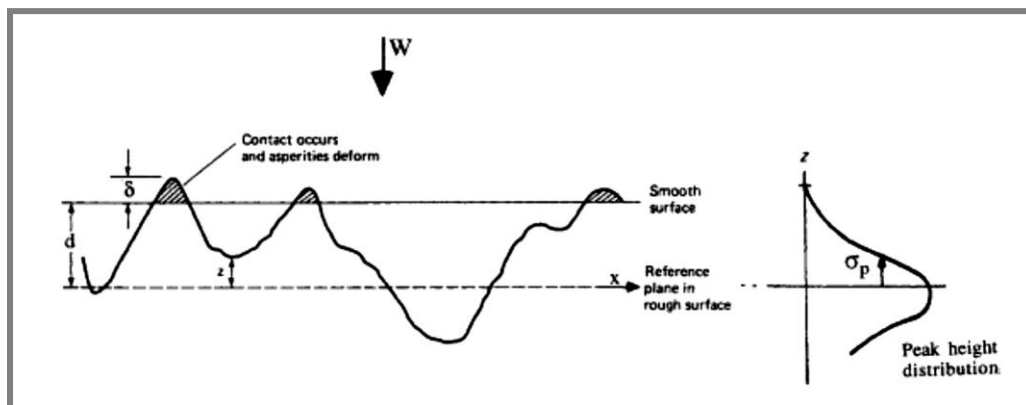
1.2. Analytické řešení reálného kontaktu

Nejjednodušší analytické modely jsou založeny na kontaktu dvou plochých těles, z nichž jedno je opatřeno texturou v podobě souboru polokoulí stejných poloměrů, ležících ve stejné výškové úrovni (obr. 3). Kontaktní úloha je řešena na základě Hertzovy teorie mezi jednotlivými polokoullemi, přičemž reálnou kontaktní oblast tvoří součet jednotlivých vytvořených mikro-kontaktů. Tento přístup je relativně jednoduchý, ale přináší řadu nepřesností, například v podobě nelineární závislosti mezi velikostí kontaktní oblasti a vnějším zatížením, což je v rozporu s provedenými experimenty. Například Uppal a Probert [4] zpozorovali během experimentálního měření kontaktu reálných těles dva zřetelné plastifikační módy. V prvním módu byla zpozorována lineární závislost mezi reálnou kontaktní oblastí a zatěžující silou, přičemž poměr velikosti kontaktní oblasti ke vnějšímu zatížení odpovídal Mallockově tvrdosti. Ta je přibližně rovna polovině Vickersovy tvrdosti. Po překročení mezní hodnoty zatížení došlo k nelineárnímu chování, podobnému, jaké popisuje Hertzova teorie.



Obr. 3 Ukázka nejjednoduššího kontaktního modelu [43].

Mnohem sofistikovanější model reálného kontaktu vytvořili Greenwood a Williamson [3], kteří obdobně jako v prvním případě modelují reálný povrch jako soubor polokoulí stejného poloměru, avšak s Gaussovou distribucí jejich výšek. Nerovnosti se deformují elasticky a na sobě nezávisle. Jejich deformace lze popsat Hertzovou teorií. Tento model vykazuje při nízkých zatíženích téměř lineární závislost mezi velikostí reálné kontaktní oblasti a vnějším zatížením. Autoři také odhalili, že střední velikost mikro-kontaktů je téměř konstantní bez ohledu na velikost působící síly. Lze tedy prohlásit, že nárůst kontaktní oblasti je způsoben především zvýšením počtu aktivních mikro-kontaktů, nikoliv zvětšením jejich plochy. Tento předpoklad potvrzují i experimentální měření [4, 7].



Obr. 4 Ukázka Greenwoodova – Williamsonova kontaktního modelu [43].

Výše uvedené modely předpokládají izotropické vlastnosti povrchů. To znamená, že povrch je tvořen symetrickými geometrickými útvary (polokoule, kužely). Autoři Gibson [8] a McCool [9] vytvořili analytický model pro řešení elastického anizotropního kontaktu. Reálný povrch je pokryt souborem eliptických paraboloidů náhodných výšek a s náhodně orientovanými osami.

Mezi nejpřesnější analytické modely patří ty, jež jsou založené na topografických měřeních. To znamená, že povrchové výstupky jsou rozličných výšek a poloměrů. Reálné povrchy lze popsat dvěma parametry: střední kvadratickou drsností a korelační délkou. Byla zjištěna skutečnost, že drsnost povrchu výrazně závisí na rozlišovací schopnosti použitého profilometru. Majumdar a Bhushan [10] zjistili, že většina strojních povrchů lze charakterizovat fraktální geometrií, která nezávisí na rozlišovací schopnosti aparatury [11].

1.2.1. Kontakt nominálně plochých reálných těles

Následující výpočty jsou vzaty z práce Johnsona [6]. Jsou-li v kontaktu dvě reálná tělesa, lze takovou úlohu převést na kontakt hladkého a reálného tělesa, které má redukovanou průměrnou kvadratickou drsnost:

$$R_{qr} = (R_{q1} + R_{q2})^{1/2}, \quad (10)$$

Greenwoodova – Williamsonova [3] teorie předpokládá, že výšky povrchových výstupků mají Gaussovo rozdělení. Existuje tedy distribuční funkce $F(z)$, která určuje pravděpodobnost výskytu povrchových výstupků na určité výškové hladině z . Počet aktivních výstupků v kontaktu je pak dán rovnicí:

$$n = N \int_d^\infty F(z) dz, \quad (11)$$

při zatížení kontaktu silou dojde k deformaci povrchového výstupku o hodnotu δ , proto lze kontaktní oblast a kontaktní zatížení vyjádřit jako funkci této deformace:

$$A_i = \pi a_i^2 = f(\delta_i), \quad (12)$$

$$W_i = g(\delta_i), \quad (13)$$

přičemž funkce $g(\delta)$ a $f(\delta)$ jsou ovlivněny materiálovými charakteristikami. Pokud se kontaktní úloha pohybuje pouze v elastické oblasti deformace a předpokládá se, že všechny povrchové výstupky mají totožný poloměr zaoblení, pak:

$$f(\delta) = \frac{\pi \delta}{\beta}, \quad (14)$$

$$g(\delta) = \frac{4}{3} E^* \beta^{-1/2} \delta^{3/2}, \quad (15)$$

velikost kontaktní oblasti a zatížení se získá z následujících integrálů, které jsou řešeny numericky:

$$A_{re} = N \int_d^\infty f(\delta) F(z) dz, \quad (16)$$

$$W = N \int_d^\infty g(\delta) F(z) dz, \quad (17)$$

kde:

$F(z)$		- distribuční funkce,
A_{re}	m^2	- velikost reálné kontaktní oblasti,
N		- celkový počet prvků,
W	N	- kontaktní zatížení,
n		- počet aktivních prvků,
β	m	- poloměr zaoblení povrchového výstupku,
δ	m	- deformace povrchového výstupku.

Gaussovu distribuční funkci $F(z)$ pro $z > 0$ lze vyjádřit jako:

$$F(z) = \left(\frac{C}{\sigma_p}\right) \exp\left(-\frac{z}{\sigma_p}\right), \quad (18)$$

po dosazení rovnice 18 do výše uvedených vztahů a po numerické integraci lze získat velmi důležitý vztah, který vyjadřuje poměr mezi reálnou a nominální kontaktní plochou:

$$\frac{A_{re}}{A_0} = \pi^{1/2} (\sigma_p \beta)^{-1/2} \left(\frac{\bar{p}}{E^*}\right), \quad (19)$$

jak je známo z experimentálních měření, mezi velikostí reálné kontaktní oblasti a zatížením platí lineární závislost. Proto by střední efektivní tlak \bar{p}_r měl být konstantní, což potvrzuje tento vztah:

$$\bar{p}_r = 0,56E^* (\sigma_p \beta)^{1/2} \approx 0,39H, \quad (20)$$

kde:

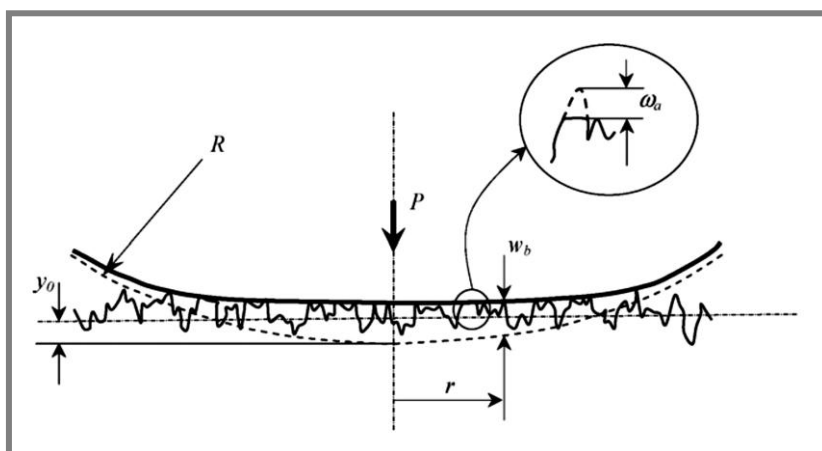
H	Pa	- tvrdost materiálu,
A_0	m ²	- velikost nominální plochy,
\bar{p}_r	Pa	- střední efektivní tlak,
\bar{p}	Pa	- střední nominální tlak,
σ_p		- směrodatná odchylka.

Pro izotropní povrchy, mající Gaussovo rozdělení výšek povrchových nerovností, lze prohlásit, že směrodatná odchylka je přibližně rovna průměrné kvadratické úchylce drsnosti $\sigma_p \sim Rq$.

1.2.2. Kontakt reálné desky s koulí

1.2.2.

Doposud byl probírán pouze kontakt mezi dvěma nominálně plochými reálnými tělesy. V kontaktu koule a desky je nutné řešit jak deformaci povrchových výstupků, tak i deformaci tělesa jako celku.



Obr. 5 kontakt koule s reálnou deskou [6].

Celková elastická deformace $d(r)$ v závislosti na zvoleném poloměru je:

$$d(r) = -y_0 + \frac{r^2}{2R} + \omega_b(r), \quad (21)$$

efektivní tlak na poloměru r je:

$$p(r) = (4\eta_s E^* / 3\beta^{1/2}) \int_d^\infty [z - d(r)]^{3/2} F(z) dz, \quad (22)$$

vzhledem k numerické integraci rovnice 22, stanovili Greenwood a Tripp [12] dva bezrozměrné parametry, které zcela charakterizují reálné povrchy:

$$\alpha = R_q \left(\frac{16RE^{*2}}{9W^2} \right)^{1/3}, \quad (23)$$

$$\mu = \frac{8}{3} \eta_s R_q (2R\beta)^{1/2}, \quad (24)$$

potom maximální efektivní tlak $p(0)$ lze vyjádřit jako:

$$p(0) = p_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{2}{3\alpha^{3/5}}\right) \right], \quad (25)$$

kde:

$d(r)$	m	- celková elastická deformace,
$p(r)$	Pa	- efektivní tlak,
p_0	Pa	- maximální Hertzův tlak,
η_s	m ⁻²	- hustota výstupků,
α		- parametr drsnosti pro Hertzův kontakt,
μ		- parametr stavu povrchu,
$\omega_b(r)$	m	- elastická deformace tělesa jako celku.

1.2.3. Podmínka plasticity

Vzhledem k tomu, že výše uvedené vztahy jsou platné pouze pro případ elastické deformace, je nutné uvést kritérium, kdy se kontakt deformuje ještě elasticky. Například Mikic [13] klasifikuje možné deformační módy kontaktních těles na základě tzv. *indexu plasticity*, který je popsán následující rovnicí:

$$\psi = \frac{E^*}{H} Rq, \quad (26)$$

kde:

E^*	Pa	- redukovaný modul pružnosti,
H	Pa	- tvrdost materiálu,
ψ		- index plasticity.

Platí následující podmínka: je-li hodnota indexu plasticity $\psi < 0,66$, pak se vzniklá deformace bude s největší pravděpodobností pohybovat v elastické oblasti.

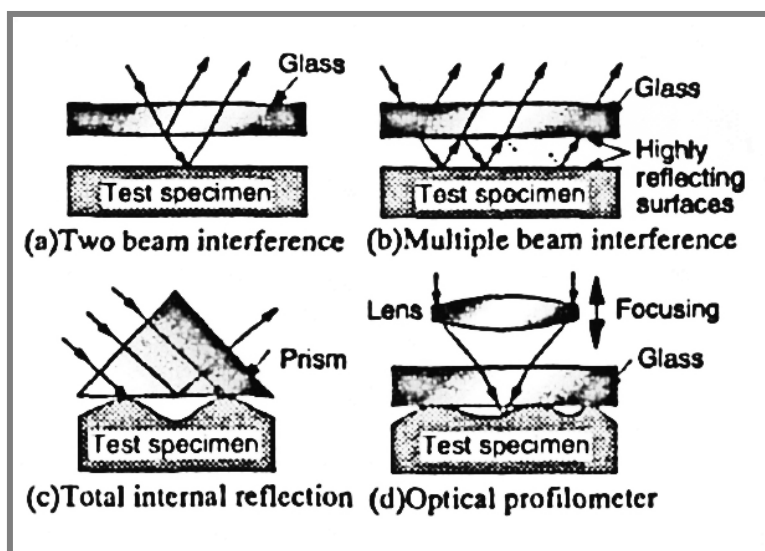
1.3. Experimentální přístup

Jak už bylo řečeno, jedním z možných způsobů hodnocení reálných kontaktů je provedení experimentálního měření. Na základě způsobu stanovení reálné kontaktní oblasti lze experimenty klasifikovat na nepřímé a přímé, kam spadá především optická a rentgenová metoda. Obě tyto metody umožňují sledovat růst a rozložení nově vznikajících mikro-kontaktů s rostoucím zatížením.

Optické metody využívají interferenčního jevu pro bezkontaktní stanovení velikosti reálné kontaktní oblasti. Jejich hlavními nevýhodami jsou především: podmínka použití transparentního tělesa, které se svými mechanickými vlastnostmi liší od reálné strojní součásti a výškově omezená měřitelnost. V dnešní době se obecně lze setkat se čtyřmi způsoby provedení optických experimentálních měření [14]. Patří sem metoda založená na úplném odrazu světelných paprsků, dvou nebo vícesvazková interferometrie nebo použití optického profilometru.

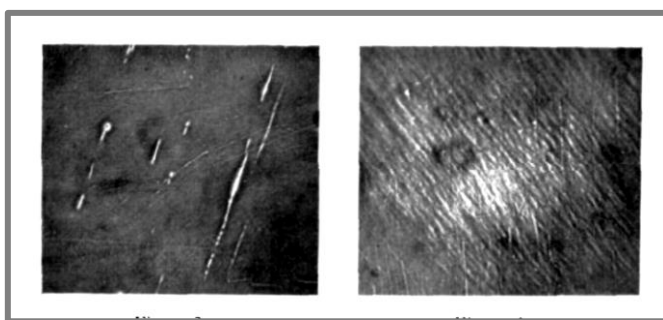
Nepřímé experimentální metody stanovují velikost reálné kontaktní oblasti na základě pomocného parametru, např. elektrického odporu. Používají se především tam, kde optické metody selhávají nebo pro měření fyzikálních zákonitostí, např. vliv velikosti kontaktní oblasti na přenos tepla apod. Do nepřímých experimentálních metod jsou zařazovány především ultrazvuková spektroskopie, metoda určující mezifázový elektrický odpor a metoda založená na aplikování radioaktivních nátěrů. Vzhledem k charakteru diplomové práce budou probírány pouze přímé experimentální metody.

Ačkoliv Hertz odvodil svoji teorii na základě uvažování kontaktu dokonale hladkých těles, už tenkrát vznikla otázka: jak veliký význam má povrchová textura kontaktních těles a s tím související drsnost povrchu na utváření reálné kontaktní oblasti?



Obr. 6 Možné způsoby optického měření [14].

Jedno z prvních experimentálních měření zaměřené na tuto problematiku bylo provedeno Dysonem a Hirstem [2]. Autoři provedli sadu měření na kulových vzorcích o poloměru 4,8 mm, které byly broušeny, leštěny a lapovány. Aby dosáhli dobré ostrosti interferenčních snímků, použili kolorimetrickou interferometrii, kdy na jednu stranu transparentního tělesa nechali nanést tenký kovový povlak. Kontakt postupně zatěžovali závažími o hmotnosti 1,5; 2 a 3 kg. U leštěného povrchu byla reálná kontaktní oblast tvořená jedinou plochou, která se velikostí přibližovala teoretické ploše podle Hertzovy teorie. Naopak u broušeného vzorku byla reálná kontaktní oblast tvořená několika samostatnými oblastmi kopírujícími směr obrábění. Z toho lze vyvodit závěr, že dokončovací operace strojních součástí a s tím spojená drsnost povrchu, má výrazný vliv na utváření reálné kontaktní oblasti.



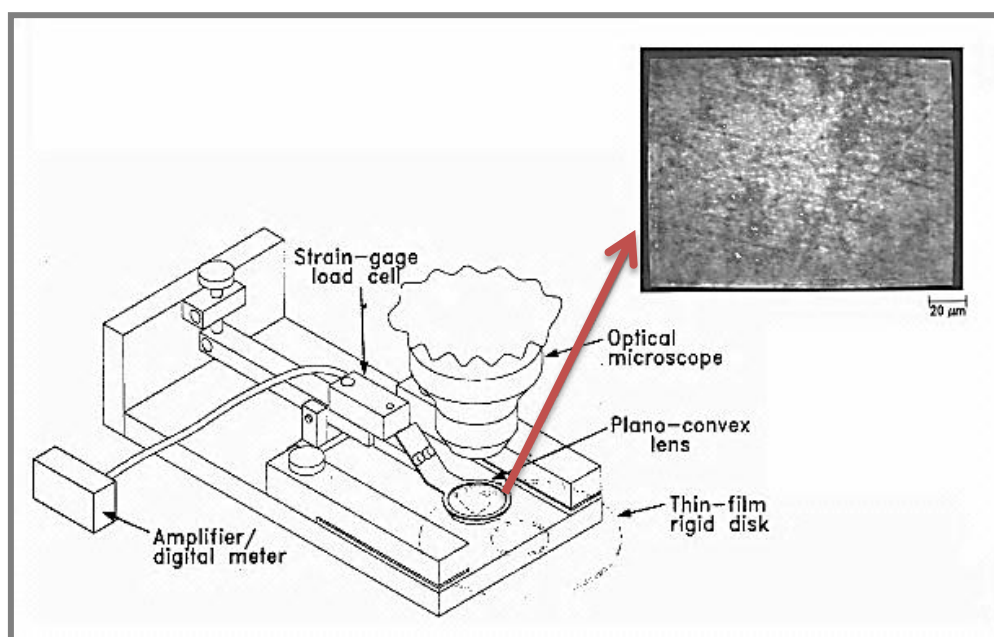
Obr. 7 Ukázka broušeného a lapovaného vzorku (zvětšeno 69x) [2].

Refaie a Halling [15] zkoumali, jaké odchylky vznikají mezi experimentálně zjištěnou a analyticky vypočítanou velikostí reálné kontaktní oblasti. Zatíženou ocelovou kuličku (0,05 až 50 kg) smýkali oproti desce (ocel, měď, mosaz, hliník), na které se vytvořila deformovaná stopa. Šířku této stopy, která odpovídala průměru kontaktní oblasti, měřili optickým mikroskopem. Byla provedena sada měření pro různé hodnoty drsnosti desek a bylo zjištěno, že při nízkém zatížení dochází k významným odchylkám mezi experimentálním a analytickým přístupem. Překvapivě bylo zjištěno, že experimentálně změřená velikost kontaktní oblasti byla větší než velikost vypočítaná Hertzovou teorií. Rozdíl mezi těmito dvěma přístupy vzrůstal především se zvyšující se drsností povrchu. Při vyšších zatíženích, avšak pohybujících se stále v elastické oblasti, byly hodnoty získané oběma přístupy téměř totožné.

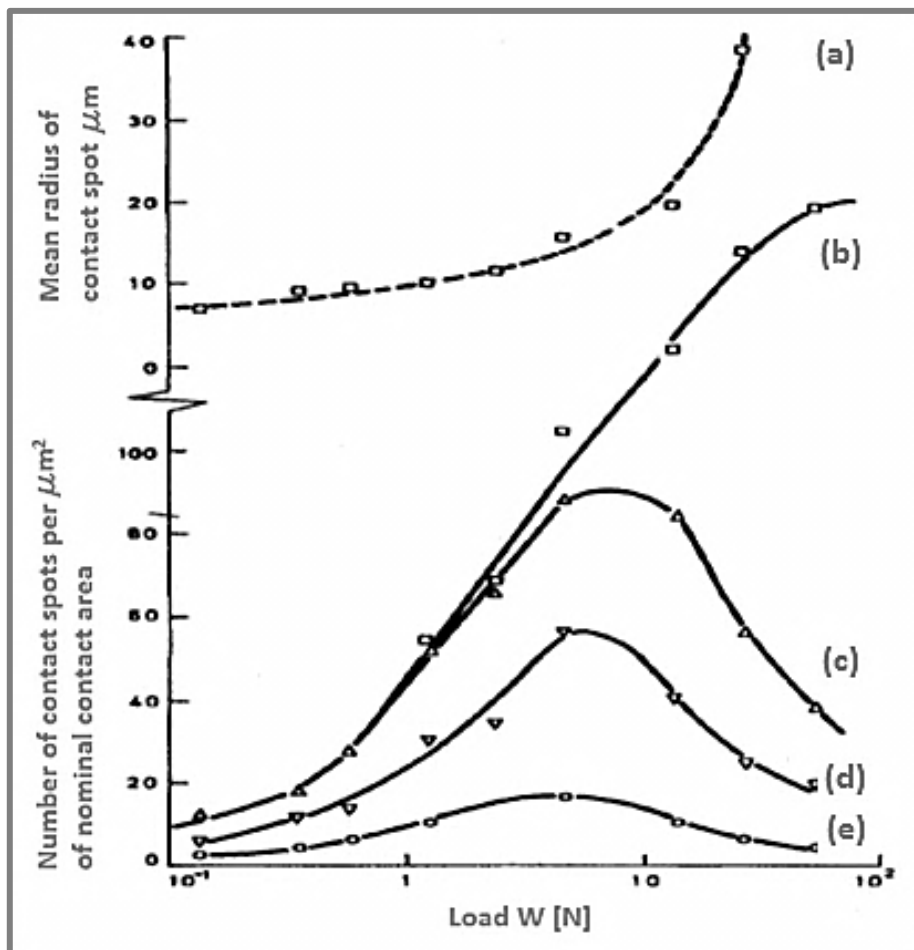
Uppal a Probert [4] studovali pozici nově vznikajících mikro-kontaktů v závislosti na růstu kontaktního zatížení. Reálnou kontaktní oblast pozorovali projekčním mikroskopem Vickers M55 ve spojení s Normaski kontrastním osvětlením. Tato experimentální sestava dosahovala vertikálního rozlišení až 1,5 nm. Nárůst velikosti kontaktní oblasti byl způsoben především zvýšením počtu aktivních mikro-kontaktů, přičemž při vyšším zatížení docházelo k jejich slučování do větších samostatných oblastí. Například při působení síly $W = 0,133$ N došlo k vytvoření pěti mikro-kontaktů, majících kruhový tvar o velikosti 3 až 4 μm v průměru. Střední velikost mikro-kontaktů byla téměř v celém průběhu zatěžování konstantní (obr. 9, křivka a). K nárůstu došlo až po překonání síly o velikosti 10 N. Ovšem s tímto nárůstem souvisí i křivka, která vyjadřuje aktuální

počet mikro-kontaktů (obr. 9, křivka c), jež v tomto místě prudce klesá. Z tohoto chování lze vyvodit, že zřejmě došlo k tak malému přiblížení mikro-kontaktů, že použitá aparatura nebyla schopná tento jev identifikovat. Při tvorbě nových kontaktních míst nebyla zpozorována žádná závislost mezi místem vzniku a zatěžující silou, ale byla zpozorována jistá podoba mezi distribucí kontaktních oblastí a dokončovací operací strojních součástí. Podobné výsledky poskytuje i práce provedená o dvacet let později [7].

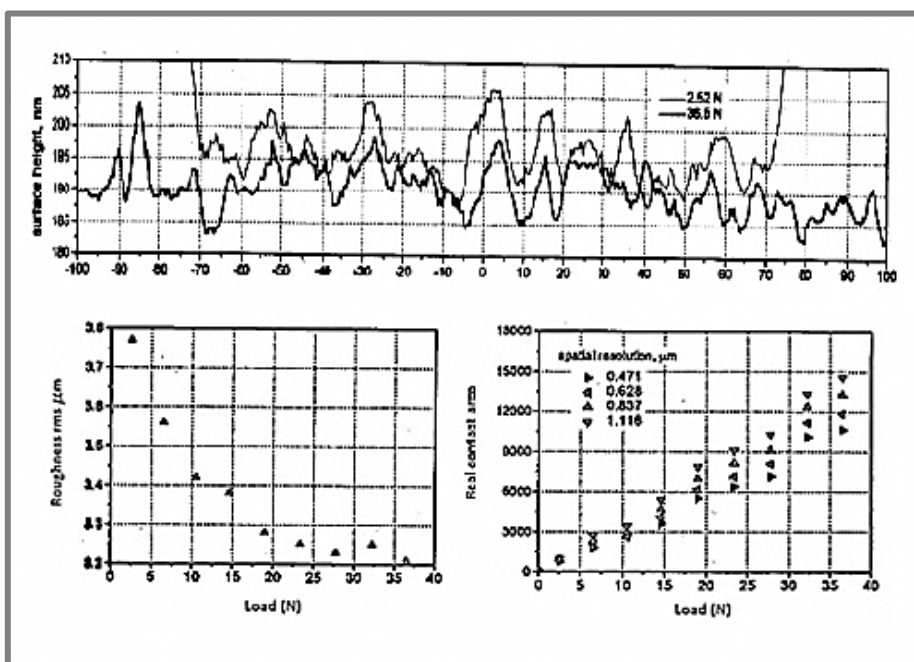
Bhushan a Dugger [16] využili vícesvazkové interferometrie pro stanovení velikosti reálné kontaktní oblasti mezi plankonvexní čočkou s poloměrem zaoblení 562,6 mm a magnetickým paměťovým diskem. Kontaktní zatížení bylo vyvoláno šroubem, který působil na volný konec jednozvrtné páky viz obr. 8. Aby bylo dosaženo vysoké rozlišitelnosti aparatury, byl použit objektiv se 40X zvětšením a polarizované světlo s vlnovou délkou 546 nm. Tato sestava dosahovala prostorového rozlišení 0,2 μm . První měření provedli na nepovlakovaném transparentním tělese, ale vzhledem k nízké odrazivosti povrchu (4 %) nebylo toto měření úspěšné. Zvýšené odrazivosti bylo dosaženo až po nanesení tenké hliníkové vrstvy na obě kontaktní tělesa. Autoři provedli měření jak pro texturovaný, tak i pro hladký paměťový disk. Zjistili, že vícesvazková interferometrie je vhodná především pro měření hladkých paměťových disků, neboť při měření texturovaného disku docházelo k rozptylování světla na hranách povrchových nerovností.



Obr. 8 Experimentální zařízení pro studium reálných kontaktů [16].



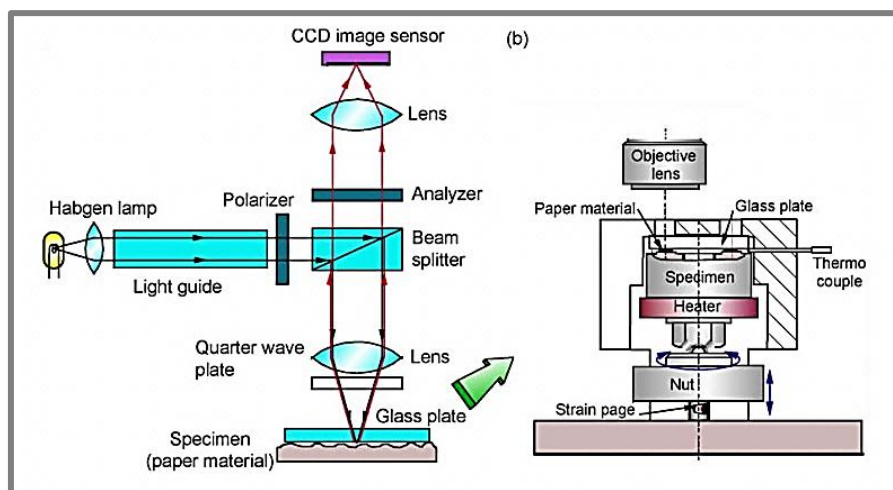
Obr. 9 Chování reálné kontaktní oblasti v závislosti na zatížení: a) střední rádius mikro - kontaktů b) celkový počet vytvořených mikro-kontaktů c) aktuální počet mikro-kontaktů d) počet eliptických mikro-kontaktů e) počet kruhových mikro-kontaktů [4]



Obr. 10 Profily drsnosti při zatížení 2,52 N a 36,5 N [17].

Křupka a kol. [17] použili kolorimetrickou interferometrii pro stanovení deformace povrchových výstupků v kontaktu reálné koule se skleněným diskem potaženým tenkou vrstvou chromu a oxidu křemičitého. Do kontaktního rozhraní vpravili imerzní¹ kapalinu, aby zamezili vzniku dalšího optického rozhraní. Při působení vnějšího zatížení přes pákový mechanismus experimentálního zařízení došlo k interakci povrchových výstupků s vrstvou oxidu křemičitého a následné deformaci této vrstvy a povrchových výstupků. Na obr. 10 je zobrazen profilový řez kontaktního tělesa pro dvě různá zatížení. Jejich vzájemné posunutí je způsobeno právě deformací vrstvy oxidu křemičitého. Lze si všimnout drobné elastické deformace povrchových výstupků, kterou potvrzuje i graf, který vyjadřuje vztah mezi průměrnou kvadratickou úchylkou drsnosti (Rq) a zatížením. Se zvyšujícím se zatížením Rq exponenciálně klesá.

Eguchi a Yamamoto se v článku [18] zabývali konstrukcí experimentální aparatury (obr. 11) pro studium reálných kontaktů, která pracuje na principu interference světla. Experimentální zařízení složili ze stereomikroskopu, CCD kamery a zdroje polarizovaného bílého světla, které bylo s mikroskopem spojeno pomocí optického vlákna. Prvotní experimenty na tomto zařízení byly zaměřené na stanovení přesnosti, s jakou experimentální aparatura pracuje. Na tři vyleštěné ocelové koule byl položen skleněný disk, přičemž jeho hmotnost vytvářela kontaktní zatížení. Velikost kontaktní oblasti byla stanovena metodou prahování, která se v odborné literatuře nazývá také jako threshold method.² Změřený poloměr kontaktní oblasti byl porovnán s teoretickou hodnotou podle Hertzovy teorie. Byla zjištěna vysoká citlivost na volbu prahové hodnoty. Ačkoliv šlo o jednoduchou a relativně levnou experimentální aparaturu, bylo dosaženo velmi přesných výsledků.



Obr. 11 Schéma experimentálního zařízení [18].

¹ Kapalina, mající podobný nebo stejný index lomu jako má transparentní těleso.

² Metoda stanovení velikosti kontaktní oblasti, pracující na principu stanovení hraniční hodnoty intenzity, která interferogram rozděljuje na kontaktní a nekontaktní oblast. Pro vyšší názornost jsou obrázky zobrazovány v binární formě.

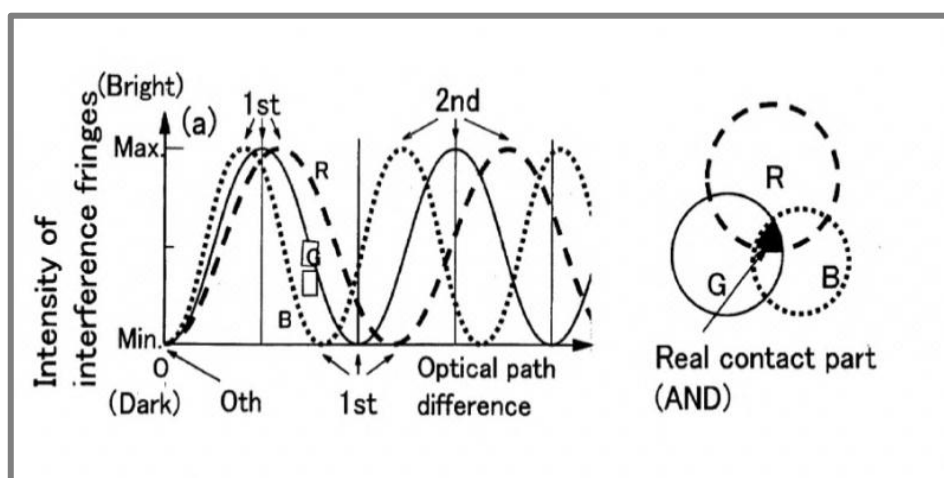
Ovšem hlavním cílem autorů bylo aplikovat tuto experimentální aparaturu pro měření kontaktu mezi dvěma nominálně plochými reálnými tělesy. V kontaktu reálné desky a safírového skla došlo ke komplikaci měření v podobě nerovnoměrně osvětlené kontaktní oblasti. Musela se provést kompenzace podle následující rovnice:

$$I = I_0 - I_{AV} + 100, \quad (27)$$

kde:

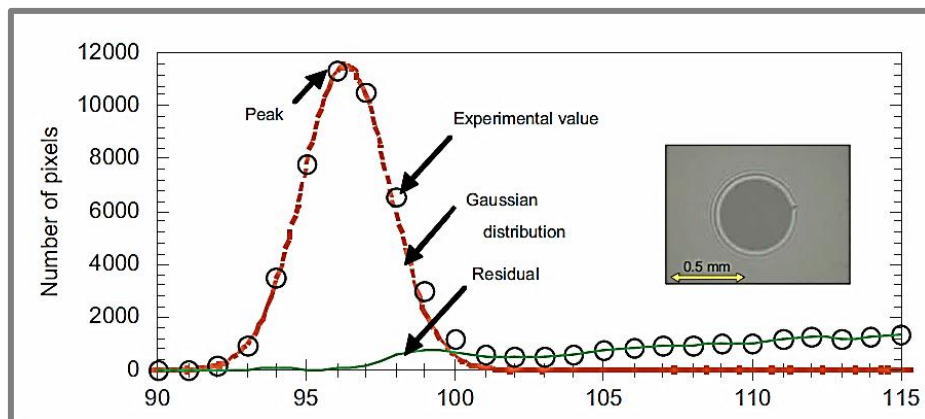
- I lx - intenzita,
- I_0 lx - intenzita originálu,
- I_{AV} lx - průměrná intenzita.

Průměrná intenzita I_{AV} se získá, vytvoří-li se na původním interferogramu kruh o poloměru $r = 50$ pixelů a hodnoty intenzit, které spadají do tohoto kruhu, se zprůměrují. Vzhledem k tomu, že stanovení přesné prahové hodnoty pro kontakt dvou nominálně plochých těles není triviální záležitostí, byla velikost kontaktní oblasti stanovena sofistikovanějším nástrojem a tím je RGB-AND algoritmus (obr. 12). Tento algoritmus je založen na fyzikálním principu, že intenzita světla je v kontaktní oblasti nezávislá na vlnové délce. Jedná se tedy o softwarovou aplikaci, která vzájemně porovnává soubor interferogramů, které byly pořízeny v červeném R, zeleném G a modrém B světle. Oblasti se stejnou hodnotou intenzity světla představují reálnou kontaktní oblast.



Obr. 12 RGB-AND princip [18].

Další možný způsob stanovení velikosti kontaktní oblasti představili Eguchi a Yamamoto o několik let později ve svém experimentu, který se zabýval chováním reálné kontaktní oblasti v počátcích tření [19]. Velikost reálné kontaktní oblasti stanovili na základě Gaussovy distribuční funkce. Z hodnoty intenzity pořízeného interferogramu byla, za použití rovnice 28, vypočtena distribuční funkce. Reálná kontaktní oblast potom odpovídá dvojnásobku plochy pod grafem na straně nižší intenzity. Na obr. 13 je to oblast mezi hodnotou intenzity 90 až 97.



Obr. 13 Gaussova distribuční funkce [19].

Gaussova distribuční funkce $P(I)$ je ve tvaru:

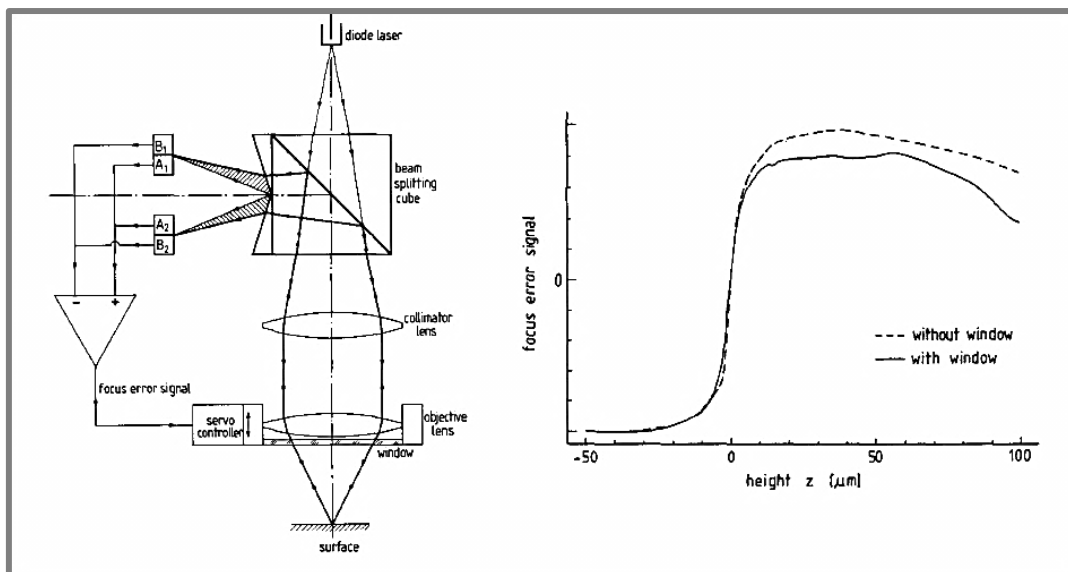
$$P(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(I - I_m)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (28)$$

kde:

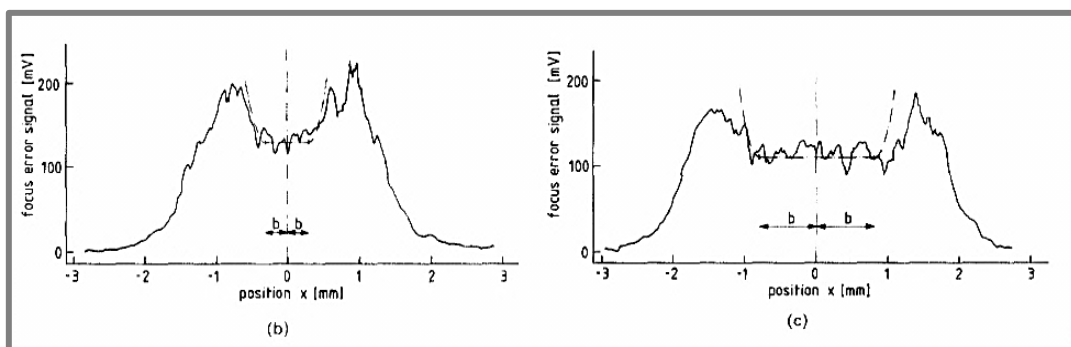
- I_m I_x - průměrná intenzita,
- $P(I)$ - distribuční funkce,
- σ - směrodatná odchylka.

Visscher a Struik se v článcích [20] a [21] zabývali možnostmi použití laserového profilometru FED³(metoda detekující správné zaostření pozorovaného objektu) pro studium kontaktu polymerního materiálu ($E = 45$ MPa, $R_q = 0,66$ μm) v kombinaci se skleněnou deskou o tloušťce 1,2 mm. Profilometry založené na principu FED jsou složeny z optického mikroskopu, který je doplněn o soustavu vhodně seřazených fotodiod (obr. 15). Zdrojem světla, jak už napovídá samotný název, je laserový paprsek o vlnové délce $\lambda = 820$ nm. Je-li laserový paprsek zaostřen na povrch tělesa, na vnější i vnitřní diodový pár dopadá stejné množství světla. Pokud se povrch tělesa nachází ve vyšší nebo nižší poloze než je původně zaostřeno, na vnější diodový pár dopadne větší resp. menší množství světla. Diody jsou spojené s řídicí jednotkou mikroskopu, která přesnými servomotory ovládá ohniskovou vzdálenost objektivu. Po naskenování celého povrchu dojde k vytvoření 3D mapy. O tom, že přítomnost transparentního tělesa neovlivňuje získané výsledky, svědčí obr. 14. Byly provedeny dvě měření: jedno bez transparentního tělesa a druhé s transparentním tělesem, avšak bez působení vnějšího kontaktního zatížení. Při porovnání s ostatními optickými experimentálními metodami, má laserový profilometr FED výhodu především v možnosti měření povrchů s nízkou odrazivostí. Dají se tak měřit elastomerová těsnění, jejichž textura výrazně ovlivňuje těsnící schopnosti. Profil drsnosti kontaktního tělesa při dvou zatíženích ($W = 2$ N, $W = 40$ N) je zobrazen na obr. 15.

³ FED = Focus Error Detection.

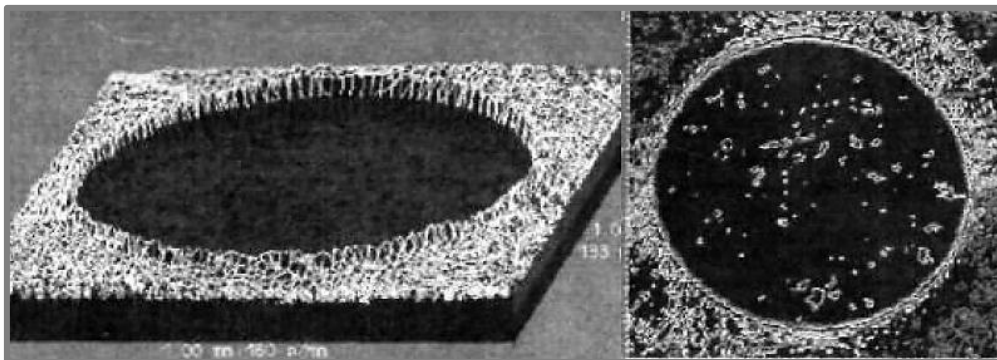


Obr. 14 Experimentální zařízení a nezávislost měření skrze transparentní těleso [20].

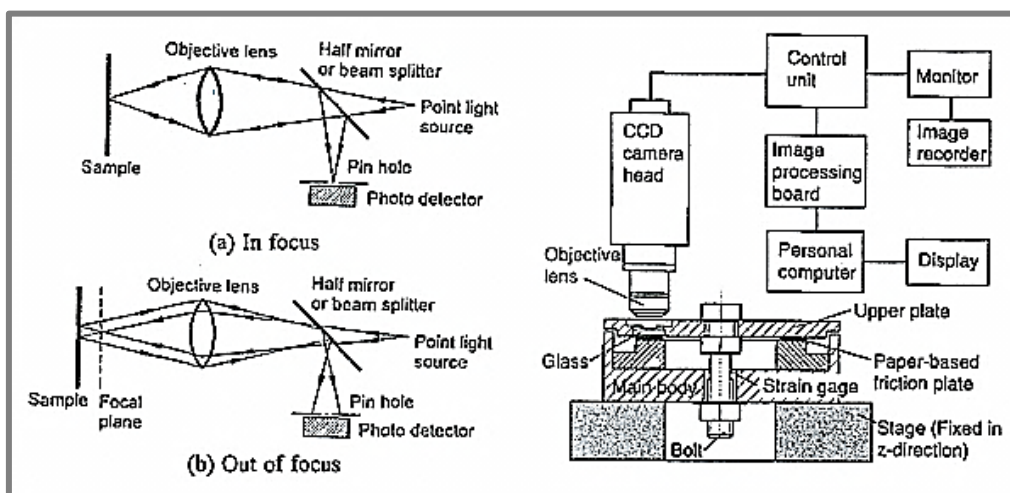


Obr. 15 Profil polymerního materiálu při dvou zatíženích [21].

Laserového profilometru, založeného na základě měření intenzity odraženého světla, použili ve svém experimentu Diaconescu a Glovnea [22]. Měřili kontaktní úlohu lapované ocelové koule o průměru 16 mm a safírového skla o tloušťce 3 mm. K jejich experimentu zvolili komerčně prodáváný laserový profilometr UBM 14, který je vybaven laserovým snímačem s vlnovou délkou $\lambda = 760$ nm, stolem s mikro-posuvem (X, Y) a kontaktní jednotkou, která mezi zmíněnými tělesy vyvozuje zatížení. Jeho velikost odpovídala hmotnosti závaží, které bylo umístěno na okraj dvojzvrtné páky. Experiment byl proveden při zatíženích 0,1; 40; 194; 292; 826 a 1560 N. Dlouhá pracovní vzdálenost optického laserového snímače umožnila pozorovat povrch kontaktního tělesa přes safírové sklo. Bylo tedy možné porovnávat texturu povrchu před samotným kontaktem a při kontaktu. Protože jsou hodnoty výšek povrchových nerovností zaznamenávány do matice, je možné jednoduchým algoritmem vykreslit 3D mapu, která reprezentuje změřenou texturu povrchu. Na obr. 16 je zobrazena tato 3D mapa, kde vytvořený výškový schod označuje hranici kontaktní oblasti. Při pohledu na konturu jsou vidět malé ostrůvky, které v tomto případě reprezentují reálnou kontaktní oblast. Tato metoda, jak se ukázalo, je možným způsobem vyšetřování kontaktu reálných těles.



Obr. 16 Vizualizace kontaktní úlohy při $F_N = 1560 \text{ N}$ [22].

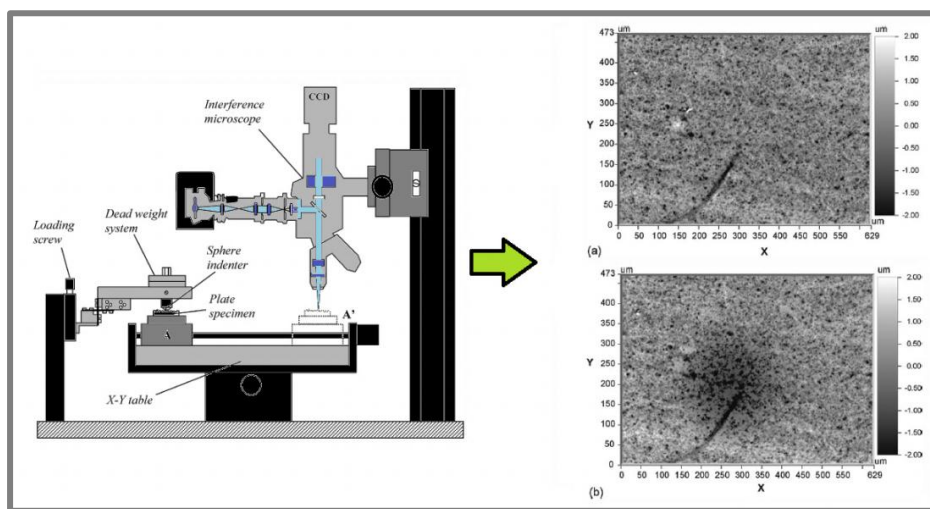


Obr. 17 Princip konfokálního skenovacího profilometru [14].

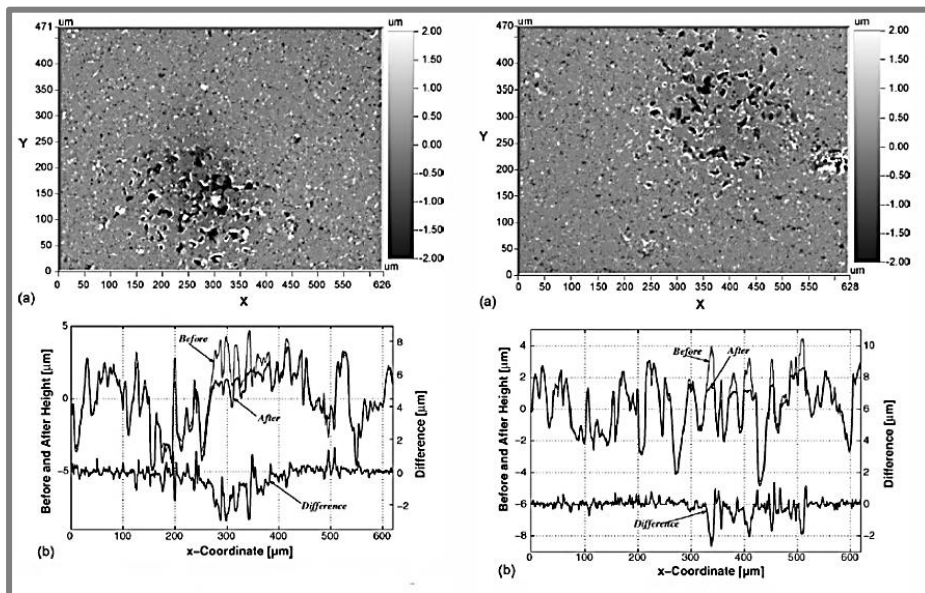
Dalším možným způsobem měření reálných kontaktních úloh je použití konfokálního laserového skenovacího profilometru. Eguchi a kol. [14] použili tuto optickou experimentální metodu pro studium kontaktního chování kompozitního materiálu se skleněným diskem. Princip konfokálního skenovacího zařízení je zobrazen na obr. 17. Jak lze vidět, skládá se ze soustavy vhodně řazených optických čoček, bodového zdroje světla a bodového foto – citlivého detektoru. Tento systém umožňuje zaznamenávat pouze přesně zaostřené bodové objekty. Získají se tak interferogramy vysokého kontrastu.

Také Cross a McBride použili ve svých pracích [23] a [24] konfokálního laserového skenovacího profilometru. Jednalo se o zařízení XYRIS 4000LT, které bylo vybavené laserovou hlavou s vlnovou délkou $\lambda = 650 \text{ nm}$ s možností pohybu ve všech třech osách. Autoři měřili velikosti kontaktních oblastí kulových těles, které byly vyrobeny z kompozitních materiálů, určených především pro přenos elektrického proudu. Kontaktní zatížení bylo vyvozeno pružinou, přičemž jeho velikost se pohybovala v rozsahu 0 až 1 N. Tak nízké síly jsou typické pro MEMS zařízení nebo elektrické spínače. Při takto nízkých zatíženích je stanovení velikosti kontaktní oblasti složitější, neboť dochází pouze k malým elastickým deformacím. Reálnou kontaktní oblast stanovili pomocí softwarové aplikace [44], která zpracovává data histogramu.

Výše uvedené experimenty se pohybovaly pouze v oblasti elastické deformace. Jamami a Schipper [25] provedli experiment na speciálně upraveném zařízení (obr. 18), které se skládalo z optického mikroskopu, jednotky vyvozující mezi tělesy kontakt a pohyblivého stolu ovládaného přesnými krokovými motory. Kontaktní zatížení bylo vyvoláno závažími, která byla umístěna nad polokulovitým hladkým kontaktním tělesem ($R_a = 0,01 \mu\text{m}$). Tímto způsobem lze vyvinout maximální normálové zatížení až 300 N. Princip experimentálního měření spočívá v porovnání interferenčních snímků, pořízených před a po deformaci. Bylo provedeno několik na sobě nezávislých měření na hliníkových a měděných vzorcích rozlišných drsností. Bylo vyzorováno, že pohybuje-li se poměr mezi maximálním efektivním tlakem a tvrdostí do 60%, tak dochází především k plastifikaci povrchových výstupků.



Obr. 18 Experimentální zařízení [25].



Obr. 19 2D výškové mapy hliníkových těles a jejich profily drsnosti ($W = 4 \text{ N}$), průměrná kvadratická úchylka drsnosti levého $R_q = 2,1 \mu\text{m}$ a pravého tělesa $R_q = 2,2 \mu\text{m}$ [25].

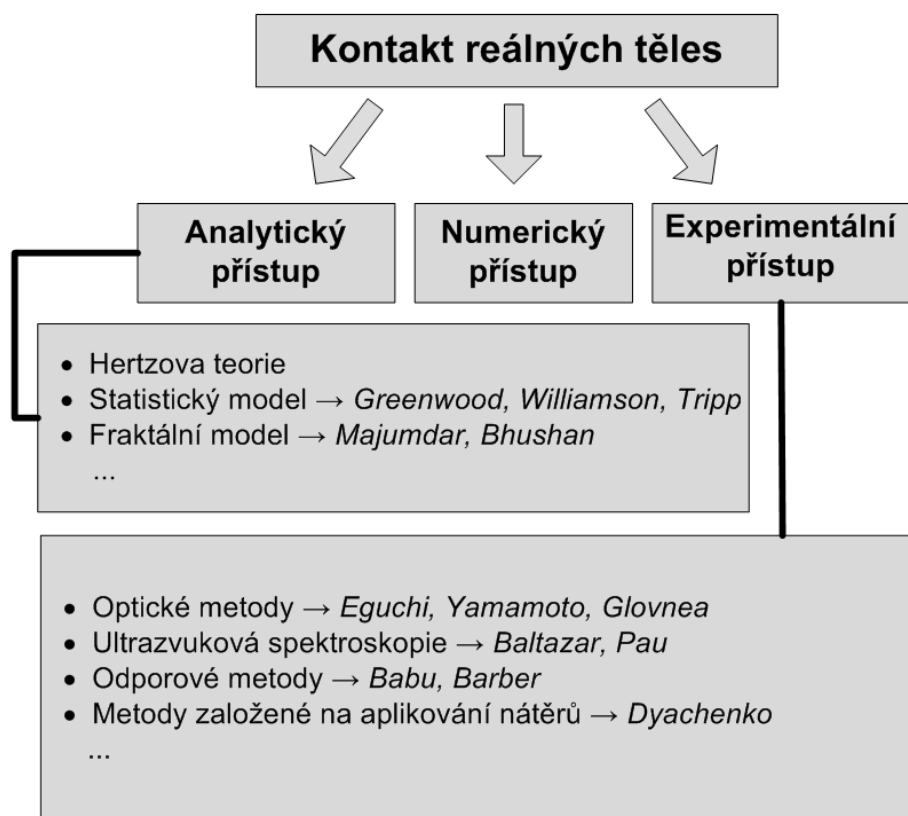
2. FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO ANALÝZA

2.

2.1. Formulace řešeného problému

2.1.

Z rešerše této diplomové práce vyplývá, že kontaktní úlohy reálných těles lze hodnotit několika odlišnými přístupy. Jedná se především o analytický výpočet, numerickou simulaci nebo experimentální měření [26]. Vhodný způsob hodnocení kontaktu je volen především z hlediska deformačního chování těles. Ačkoliv mají teoretické modely bohatý historický základ a v dnešní době dosahují těch nejvyšších přesností, existují případy, kdy je provedení experimentálního měření jedinou možnou cestou ke správnému stanovení kontaktních parametrů. Objektem zájmu je především stanovení velikosti kontaktní oblasti, která je nepostradatelným vstupujícím parametrem při řešení opotřebení, tření, kontaktní únavě aj.

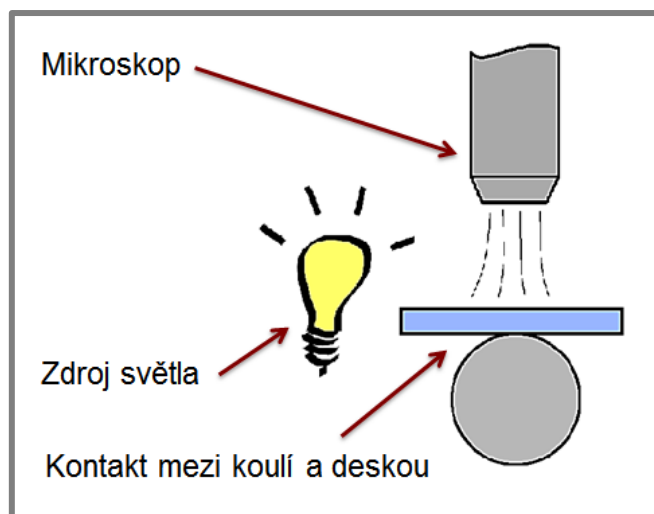


Obr. 20 Možnosti řešení reálného kontaktu.

Tato diplomová práce je nepřímým pokračováním provedené bakalářské práce, jejímž cílem byla konstrukce simulátoru Hertzova kontaktu. Jedná se o experimentální zařízení, které zprostředkovává mezi tělesy kontakt s možností variabilního nastavení zatížení. Bylo zkonstruováno především pro ověřování parametrů kontaktních úloh, které byly stanoveny ať už numerickou simulací nebo analytickým výpočtem. Při konstrukci simulátoru se vycházelo ze zařízení, která jsou prezentována v odborných článcích (např. [22, 18]) nebo jsou prodávána jako komerční výrobek [45, 46].

2.2. Analýza řešeného problému

Úkolem této diplomové práce je tedy doplnit zkonstruovaný simulátor vhodnou měřicí metodu a provést sadu experimentálních měření kontaktu reálných těles. Reálné kontaktní úlohy jsou na Ústavu konstruování na Vysokém učení technickém v Brně řešeny především pomocí kolorimetrické interferometrie [17]. Původní koncepce tedy měla být založena na této interferometrické metodě, avšak v průběhu řešení této problematiky se ukázalo, že velmi inovativním a efektivním způsobem řešení kontaktních úloh je použití optických profilometrů. Ačkoliv je fázově řízená interferometrie jedna z profilometrických metod, doposud nebyla aplikována pro řešení kontaktních úloh in-situ.



Obr. 21 Schéma experimentálního zařízení.

Vzniká zde tedy prostor pro vývoj zcela inovativního experimentálního zařízení pro řešení reálných kontaktů, které bude sestaveno ze simulátoru Hertzova kontaktu a aparatury, určené pro měření struktury povrchu fázově řízenou interferometrií.

3. VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

3.

Hlavním cílem této diplomové práce je aplikace optického profilometru využívajícího fázově řízené interferometrie pro studium reálných kontaktů, a to konkrétně pro stanovení velikosti kontaktní oblasti nebo jiných důležitých kontaktních parametrů. Tento cíl je možné rozdělit do několika samostatných částí:

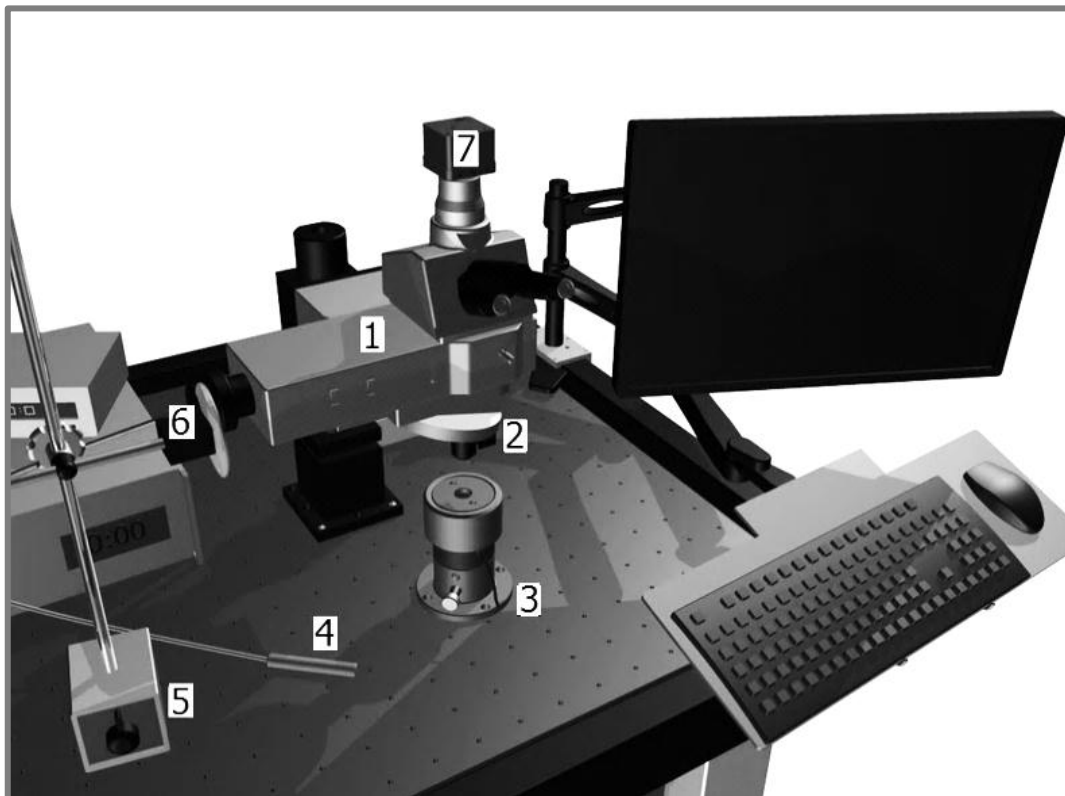
- Konstrukce a výroba experimentální aparatury.
- Provedení experimentálního měření, které by ověřilo použitelnost fázově řízené interferometrie pro řešení kontaktních úloh.
- Provedení měření kontaktu strojních součástí.
- Analýza a interpretace změřených dat.
- Stanovení vhodné aplikace fázově řízené interferometrie v oblasti reálných kontaktů.

4. NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ

4.1. Experimentální aparatura

Experimentální zařízení, určené pro studium reálných kontaktů a pracující na principu interference světla, bývá ve většině případů složené ze dvou hlavních částí: mechanické a optické. Mechanická část má za úkol zprostředkovat kontakt mezi tělesy a vytvořit dostatečně velké zatížení, které musí být snadno změřitelné. Úkolem optické části je vytvořenou kontaktní oblast zvětšit a zaznamenat s dostatečně vysokým rozlišením ať už na fotocitlivý film nebo čip kamery.

Na obr. 22 je zobrazena experimentální aparatura. Je složena ze sedmi hlavních prvků. Základem zařízení je optický mikroskop, ke kterému je připojena CMOS kamera a interferenční objektiv s piezoelektrickým posuvem, který je ovládán řídicí jednotkou. Jako zdroj koherentního světla byla použita laserová dioda s vlnovou délkou 662 nm, která je s mikroskopem propojena optickým vláknem. Vzhledem k vyskytující se koherenční zrnitosti, která vzniká při použití vysoce koherentního světla, musela být aparatura doplněna o rotující matnici neboli skleněný disk z jedné strany zmatněný. Kontaktní tělesa jsou uložena v simulátoru Hertzova kontaktu, který mezi nimi zprostředkovává kontaktní zatížení, jehož velikost je měřena tenzometrickým tlakovým snímačem. Aby během měření nedocházelo k chybám způsobených okolními vibracemi, jsou veškeré prvky umístěny na pneumaticky odpruženém stole. K pořízení interferenčních snímků byl použit software, který byl vytvořen v rámci diplomové práce autora [27].

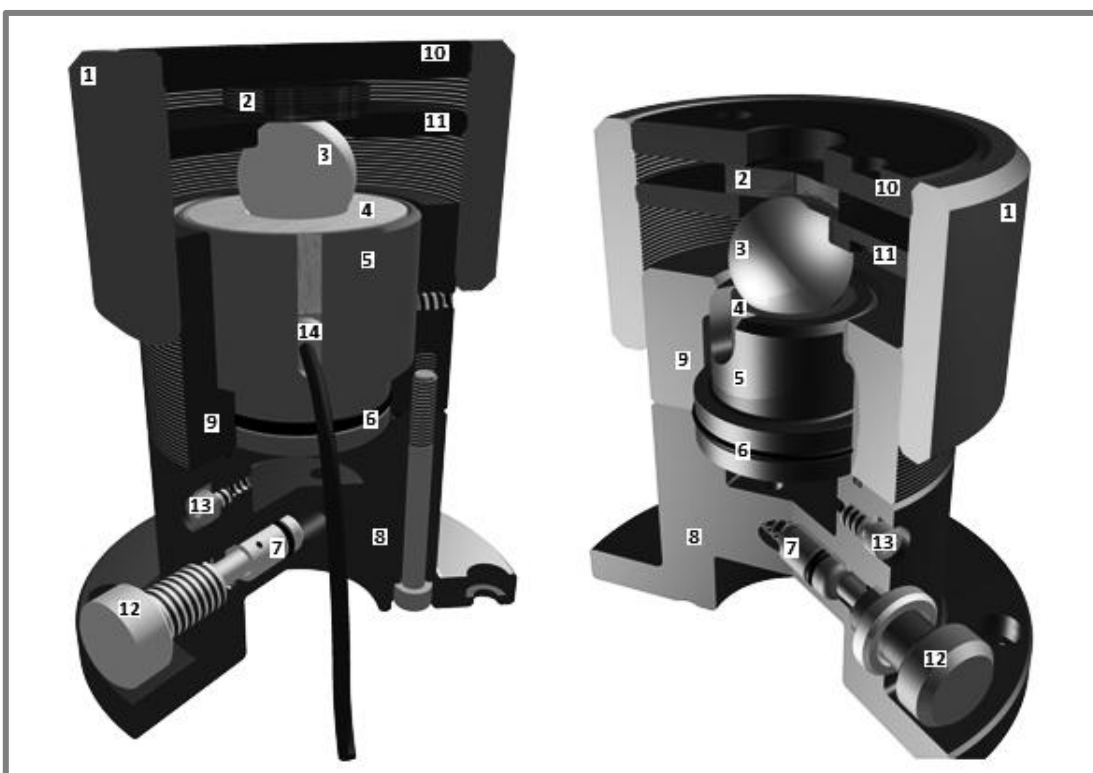


Obr. 22 Pohled na experimentální stanici: 1) Optický mikroskop 2) interferenční objektiv 3) simulátor Hertzova kontaktu 4) laserová dioda 5) magnetický držák 6) rotující matnice 7) CMOS kamera.

4.1.1. Mechanická část

Mechanickou část experimentální aparatury tvoří jediný mechanismus, a tím je simulátor Hertzova kontaktu, jehož konstrukce byla vytvořena v rámci bakalářské práce [28]. Byla inspirována zařízeními, která jsou prezentována v odborných článcích, kde ve většině případů je kontakt mezi tělesy realizován pohybem pístu spolu s kontaktním tělesem vůči pevně uloženému transparentnímu disku.

Vzhledem k výskytu provozních problémů a absence přesného měření kontaktního zatížení, byly provedeny významné konstrukční úpravy. Aby mohl být aplikován tlakový tenzometrický snímač (14) v pracovním pístu (5), muselo dojít k jeho rozšíření. Další úprava spočívala v konstrukci pevného, avšak otočného spojení ovládacího šroubu (12) s tlakovým pístem (7), neboť ve staré konfiguraci, která je zobrazena na obr. 23 vpravo, docházelo ke špatnému vracení tlakového pístu při snižování kontaktního zatížení.

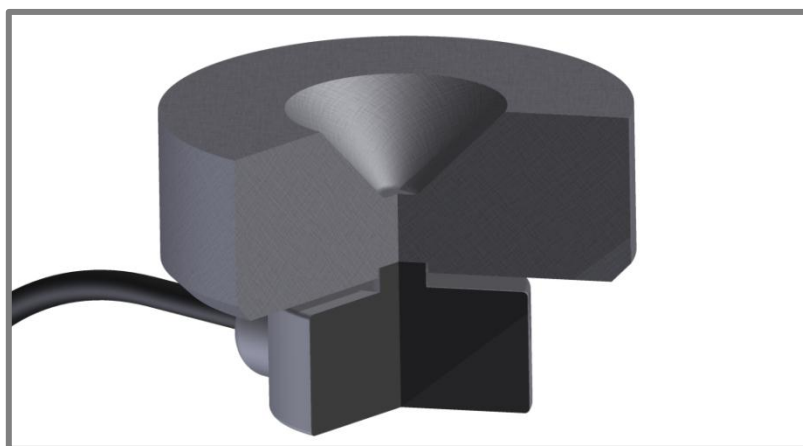


Obr. 23 Schéma nové (vlevo) a staré (vpravo) koncepce simulátoru Hertzova kontaktu: 1) matice, 2) sklo, 3) koule, 4) vložka kuliček, 5) pracovní píst, 6) o-kroužek, 7) tlakový píst, 8) příruba, 9) válec, 10) zajišťovací podložka, 11) opěrná podložka, 12) ovládací šroub, 13) odvzdušňovací šroub, 14) tlakový snímač.

Základní charakteristiky simulátoru:

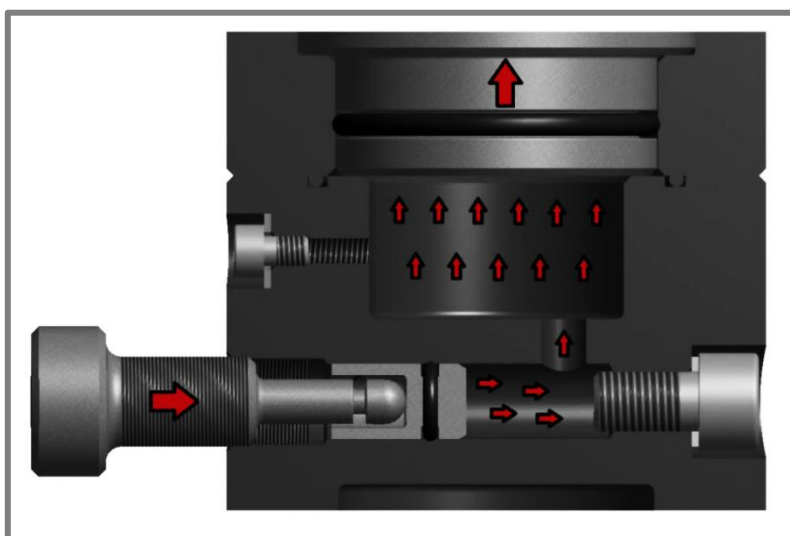
hmotnost:	9 kg,
max. výsuv pracovního pístu:	0,5 mm,
maximální šířka:	120 mm,
maximální výška:	165 mm,
objem provozní kapaliny:	20 cm ³ .

Zařízení je založeno na hydraulickém způsobu zatěžování, jehož předností je především schopnost dosahovat vysokých kontaktních sil komfortním způsobem. Základní těleso, ve kterém je realizován hydraulický systém se skládá z ovládací příruby (8) a válce (9), k němuž je pomocí závitu M72x1-6H/6g připevněna matice (1). V této matici je svěrným spojem pomocí dvou podložek (10, 11) připevněno transparentní těleso (2). Druhé kontaktní těleso, jímž je koule (3), je uloženo ve vložce (4), která je s vůlí zasazena do vyfrézovaného vybrání pracovního pístu a která působí na tlakový tenzometrický snímač (14) C9B od výrobce HBM [47]. Tento způsob uložení kontaktních těles vykazuje dobrou tuhost a variabilitu co se týče rozměrů. Aby bylo zajištěno souososti tlakového snímače a vložky, bylo na její spodní straně vytvořeno vnitřní osazení, do kterého přijde zasadit čep snímače.



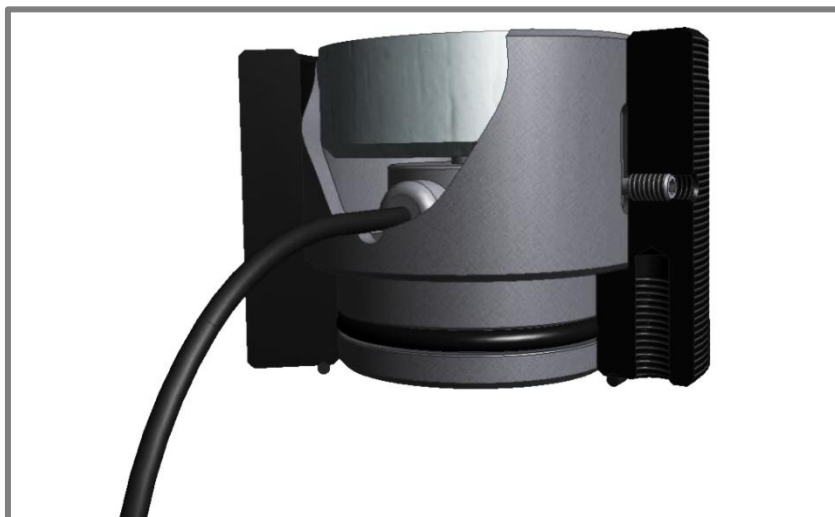
Obr. 24 Vystředění tlakového snímače vůči vložce kouli.

Princip hydraulického systému je znázorněn na obr. 25. Pohybem ovládacího šroubu dochází k pohybu tlakového pístu a v důsledku nestlačitelnosti kapaliny také k výsuvu pracovního pístu. Závislost mezi kontaktním zatížením a vysunutím pracovního pístu je především ovlivněna mechanickými charakteristikami materiálu těles. Obecně platí, čím vyšší modul pružnosti v tahu tělesa, tím menší výsuv pracovního pístu je potřeba pro vyvolání stanovené síly a naopak.



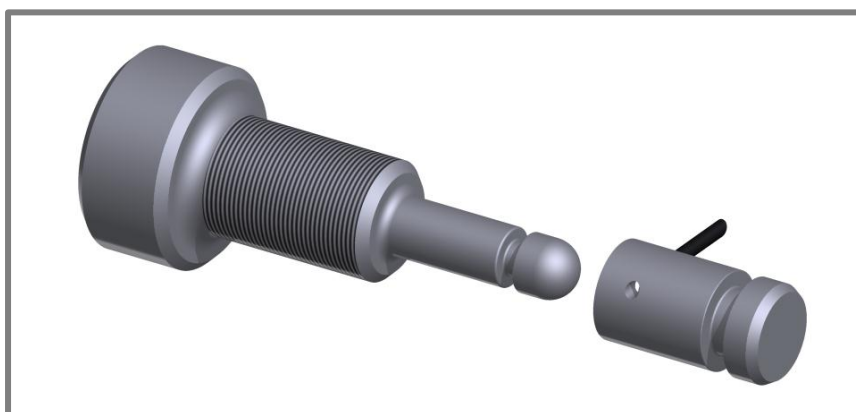
Obr. 25 Hydraulické schéma simulátoru.

Jak pracovní, tak tlakový píst je na styčných plochách utěsněn o-kroužkem. Tento způsob utěsnění byl volen především z hlediska jednoduchosti konstrukce, téměř nulové rychlosti pohybu pístů a nízkého provozního tlaku oleje. Pracovní píst zajištěn je proti pootočení zajištěn pomocí stavěcího šroubu (obr. 26).



Obr. 26 Pracovní píst je proti pootočení zajištěn stavěcím šroubem.

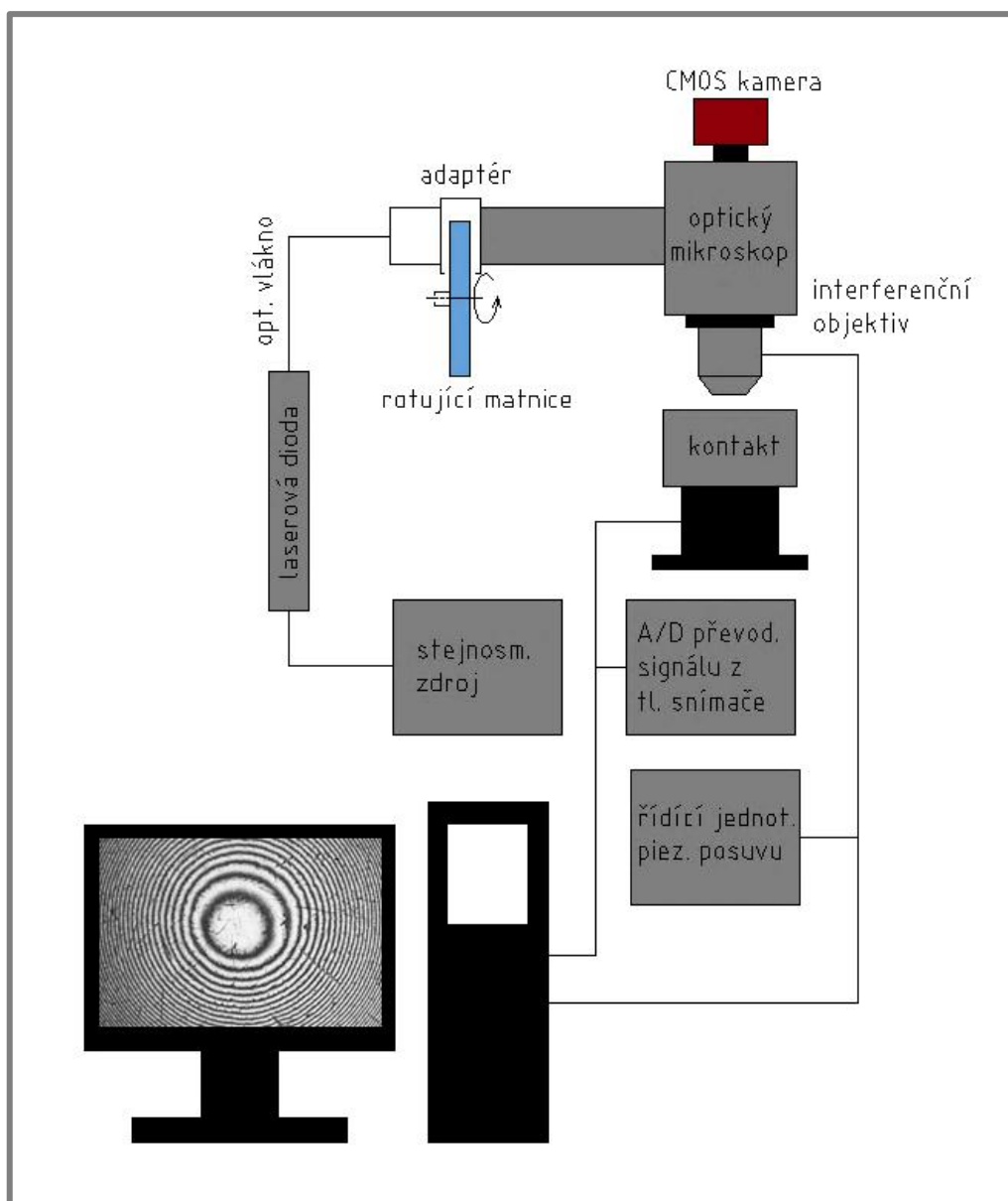
Jak už bylo řečeno, v původní koncepci simulátoru Hertzova kontaktu docházelo ke špatnému vracení tlakového pístu při odlehčování kontaktního zatížení. Bylo tedy navrženo pevné, avšak otočné spojení ovládacího šroubu s tlakovým pístem. Tohoto spojení bylo docíleno tak, že se v tlakovém pístu vyfrézovalo vybrání a zároveň byla na jeho povrchu vyvrtána průchozí díra pro zajišťovací kolík. Na osazení ovládacího šroubu byla vytvořena obvodová drážka. Tlakový píst se nasune na osazení šroubu a proti vypadnutí se pojistí zajišťovacím kolíkem (obr. 27). Aby byla pokryta možná nesouosost vedení tlakového pístu a vnitřního závitu ovládací příruby M12x0,5-6H, jejich uložení je provedeno s velmi vysokou vůlí. Tato vůle nemá vliv na funkci spoje.



Obr. 27 Spojení ovládacího šroubu a tlakového pístu.

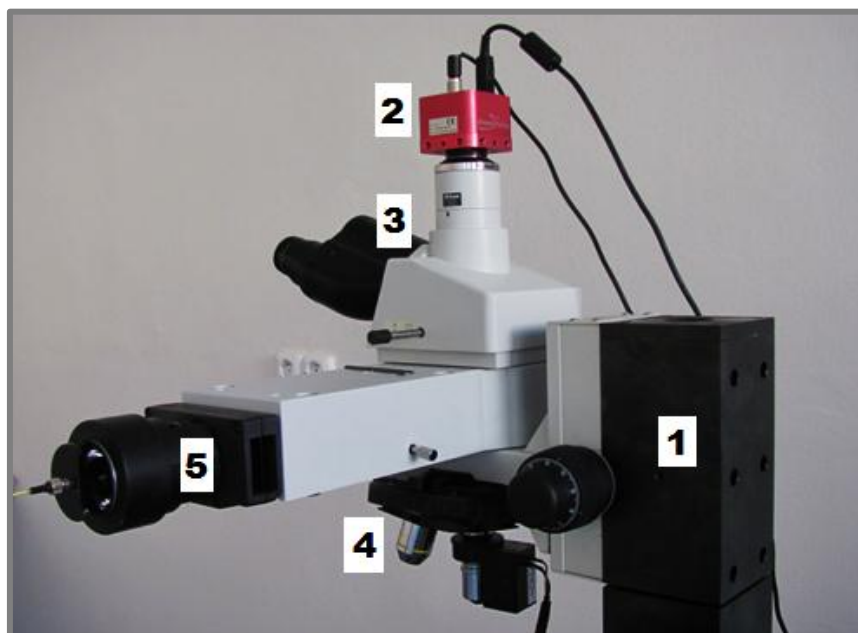
4.1.2. Optická část

Schéma optické části experimentální aparatury je zobrazeno na obr. 28. Hlavním prvkem je optický mikroskop Nikon Eclipse LV150, ke kterému je připojena CMOS monochromatická kamera a Mirau interferenční objektiv s piezoelektrickým posuvem, který je ovládán řídicí jednotkou. Zdrojem monochromatického vysoce koherentního světla byla použita laserová dioda s vlnovou délkou 662 nm a průrazným napětím 5 V, která je s mikroskopem spojena optickým vláknem. Vzhledem k vyskytující se koherenční zrnitosti, která vzniká při použití vysoce koherentního zdroje světla, musela být osvětlovací soustava doplněna o rotující matnici, která vlivem rotace zmatněného disku rozbíjí prostorovou koherenci.



Obr. 28 Schéma optické části experimentální aparatury.

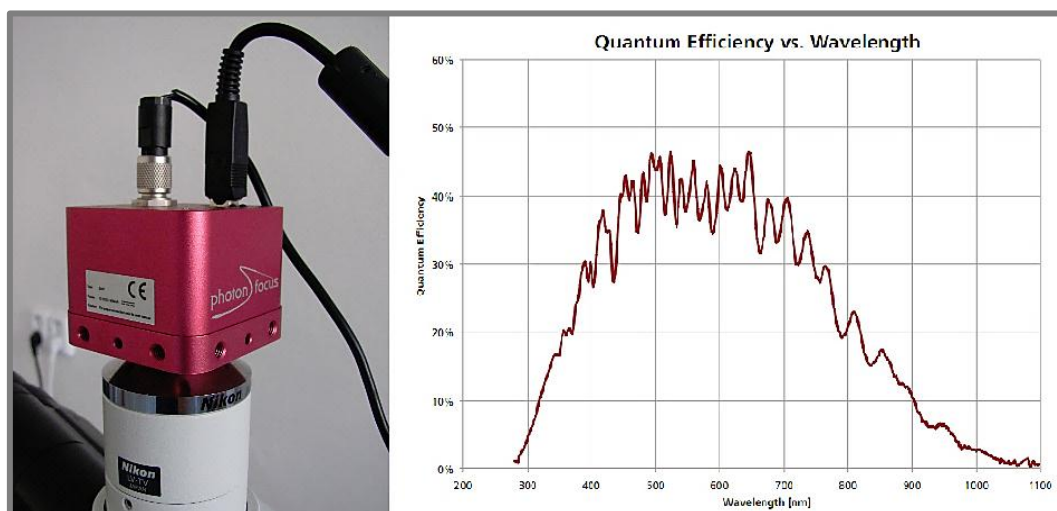
Optický mikroskop Nikon Eclipse LV150



Obr. 29 Optický mikroskop Nikon Eclipse LV150 -1) stojan 2) CMOS kamera 3) hlava mikroskopu s okuláry 4) Karusel pro objektivy 5) adaptér pro připojení optického vlákna.

Kamera Photonfocus

Jedná se o monochromatickou kameru, jejíž obchodní označení je DS1-D1024 SERIES. Je vybavena CMOS čipem s rozlišením 1024 x 1024 pixelů, přičemž velikost jednoho pixelu je 10,6 x 10,6 μm . Umožňuje snímat obraz v osmi nebo deseti bitové hloubce obrazu.



Obr. 30 CMOS kamera Photonfocus a její spektrální charakteristika.

Mirau interferenční objektiv s piezoelektrickým posuvem

Mirau interferenční objektiv se principiálně neliší od Michaelsonova interferenčního objektivu [29], jediným rozdílem je jeho konstrukce, kdy referenční povrch je umístěn do středů paprsků (obr. 31). Pohyb referenčního zrcátka je ovládán skrze řídicí jednotku piezoelektrického posuvu, která je propojena s PC.

Parametry použitého objektivu:

- přiblížení: 20X,
- pracovní vzdálenost: 4,7 mm,
- numerická apertura: 0,4.



Obr. 31 Mirau interferenční objektiv s piezoelektrickým posuvem [27].

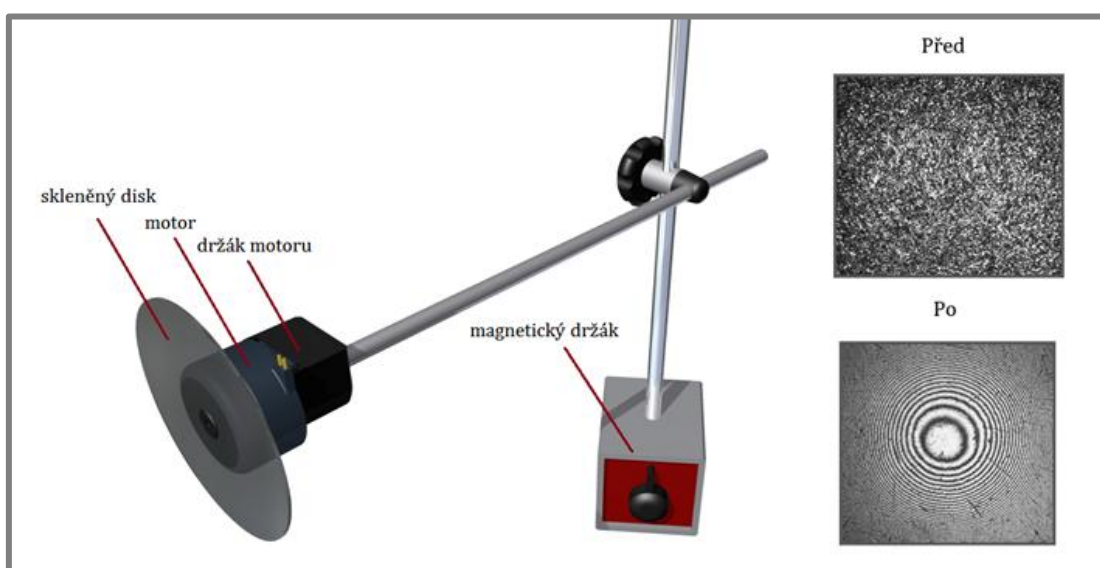


Obr. 32 Řídicí jednotka piezoelektrického posuvu: Physik instrumente E-501 [27].

Rotující matnice

Dalším důležitým prvkem experimentální aparatury je rotující matnice, která má za úkol především potlačit vznikající koherenční zrnitost. Jedná se o skleněný disk, který je z jedné strany zmatněn pískováním, a který vlivem rotace rozbíjí prostorovou koherenci. Velmi důležitá je jeho homogenita.

Matnice je složena z magnetického stojanu, držáku motoru, stejnosměrného motoru s napětovým rozsahem 0 až 20 V, samotné matnice a příruby. Protože byl motor původně určený pro chlazení PC sestav, musela se provést jeho konstrukční úprava. Konkrétně: na místo chladících lopatek byla vyrobena příruba pro připevnění disku, která je s motorem spojena montážním tmelem. Vzhledem k obtížně vyrobitelným tvarům držáku motoru a příruby, byla pro jejich výrobu zvolena technologie Rapid Prototyping .



Obr. 33 Rotující matnice.

Koherenční zrnitost

Koherenční zrnitost je velmi známý optický jev, který se vyskytuje při dopadu vysoce koherentního světla na drsný odrazný povrch nebo při jeho průchodu prostředím s nehomogenním rozložením indexu lomu [30]. Jedná se o důsledek interference světelných vln o stejné frekvenci, avšak s odlišnou amplitudou a fází [48]. Koherenční zrnitost, také označována jako speckle, se projevuje vytvořením tmavých a světlých skvrn na pozorovaném objektu. V tomto případě se jedná o parazitní chování, neboť zkresluje pozorovaný objekt. Naopak v řadě inženýrských činností je tohoto jevu využíváno např. pro měření rotace tělesa [31], deformace tělesa [32] aj.

Možné způsoby redukce koherenční zrnitosti jsou:

- rotující matnicí,
- osvětlením objektu z rozličných úhlů,
- digitální filtrací [33].

4.1.3. Snímací software

Jedná se o softwarovou aplikaci, která vznikla v rámci diplomové práce autora [27], který se zabýval aplikací fázově řízené interferometrie pro měření struktury povrchů strojních součástí. Program je napsán v programu C++ a slouží především pro nasnímání souboru interferogramů. Prostředí aplikace se skládá z hlavního okna, kde je zobrazen náhled kamery a postranní lišty, kam se zadávají vstupní parametry. Jedná se především o hodnotu vlnové délky použitého světla, počtu snímků, ze kterých je prováděno průměrování a počet zprůměrovaných snímků. Schopnost souběžného průměrování snímaných interferogramů vznikla až během aplikace fázově řízené interferometrie pro měření reálných kontaktů, a to především za účelem potlačení vlivů, vznikajících v důsledku nerovnoměrnosti v matnici. Průměrování je velmi výhodné taky pro potlačení vlivů, vznikajících vibracemi.

Postup při získávání interferogramů je následující: nasnímá se řada snímků, které se zprůměrují, přičemž výsledný obraz je uložen do zadaného souboru. Poté dojde k posuvu referenčního zrcátka o předem stanovenou hodnotu (dle zvoleného algoritmu) a cyklus se opakuje až do doby, kdy je získán dostatečný počet snímků pro stanovení mapy fází a následně mapy výšek povrchových výstupků.

4.2. Experimentální materiál

Jako kontaktní tělesa byly použity komerčně prodávané koule a skleněný disk BK7. Jednalo se o ocelovou kouli s průměrem 25,4 mm a mosaznou kouli o průměru 19,05 mm. Povrchy kontaktních těles nebyly upravovány (např. leštění). Použitý skleněný disk o průměru 30 mm a tloušťce 3 mm lze považovat za opticky hladký. Experimentální měření probíhala v intervalu zatížení 0 až 30 N. Materiálové charakteristiky použitých kontaktních těles a jejich R parametry jsou shrnuty v tabulce 1.

Tabulka 1 Přehled mechanických charakteristik materiálů.

	Sklo BK7	Chromová ocel	Mosaz
Průměr	∞	25,4 mm	19,05 mm
Modul pružnosti v tahu	82 000 MPa	210 000 MPa	110 000 MPa
Poissonovo číslo	0,206	0,30	0,36
Mez kluzu	-	441 MPa	210 MPa
Mezní zatížení	-	75 N	7 N
Místo iniciace plastické def.	-	-0,11 mm	-0,05 mm
R_a	~ 0 nm	7 nm	50 nm
R_q	~ 0 nm	9 nm	63 nm

Při kontaktu těles je nutné stanovit mezní zatížení, při kterém se těleso deformuje ještě elasticky. Vznik plastické deformace je úzce spjat se smykovým napětím, jehož maximální hodnota se nachází přibližně $0,48a$ pod povrchem. Existuje řada kritérií pro hodnocení vzniku plastické deformace, přičemž v této diplomové práci bylo používáno Tresca kritérium [5]:

$$\text{Max} \left\{ \frac{1}{2} |\sigma_1 - \sigma_2|, \frac{1}{2} |\sigma_2 - \sigma_3|, \frac{1}{2} |\sigma_3 - \sigma_1| \right\} = \frac{Re}{2}, \quad (29)$$

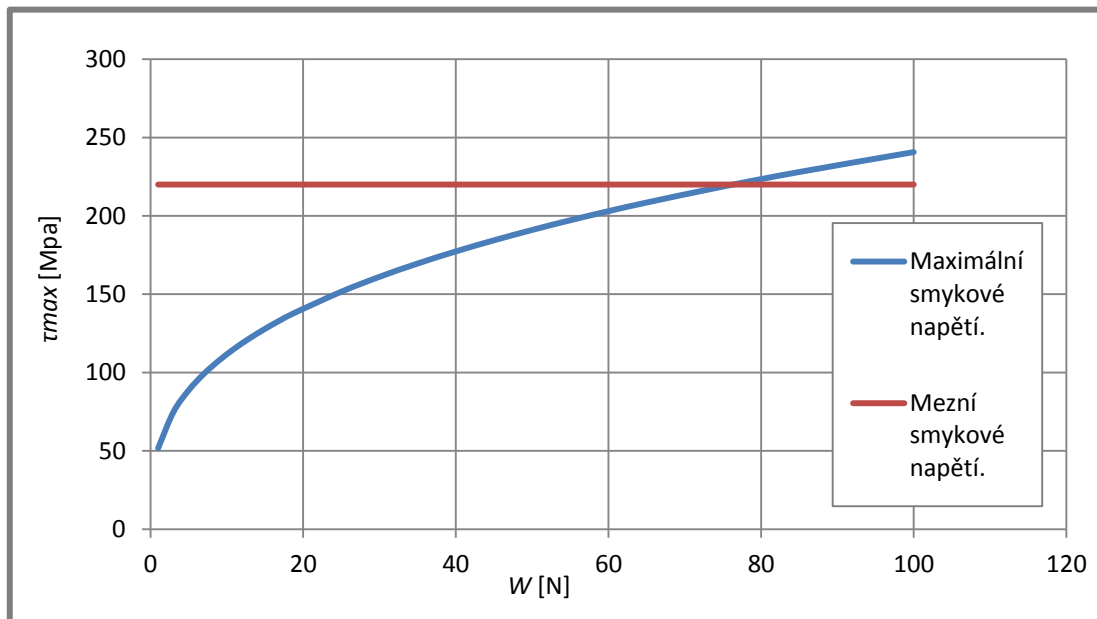
počátek vzniku plastické deformace lze pro kovové materiály vyjádřit poměrem mezi maximálním kontaktním tlakem a mezí kluzu:

$$\frac{p_0}{Re} = 1,6 \quad (30)$$

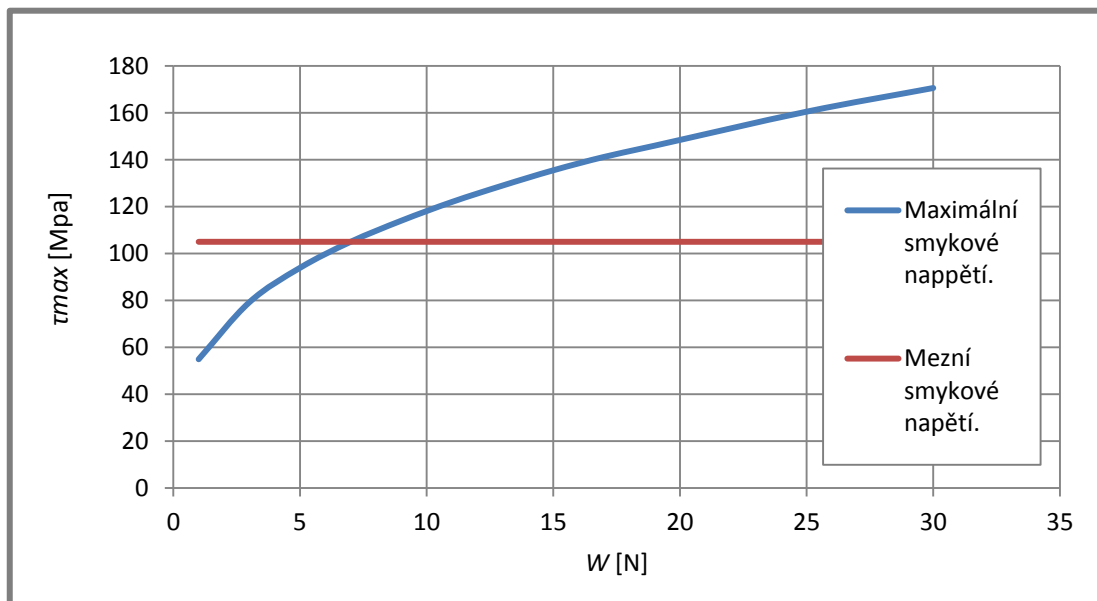
kde:

- p_0 Pa - maximální Hertzův tlak,
- Re Pa - mez kluzu v tahu,
- $\sigma_{1,2,3}$ Pa - hlavní normálová napětí.

Následující grafy vyjadřují průběh maximálního smykového napětí pro kontaktní tělesa, jež jsou uvedeny v tabulce 1. Červená přímka ohraničuje elastickou oblast dle rovnice 43.



Obr. 34 Závislost mezi kontaktním zatížením a smykovým napětím pro ocelové kontaktní těleso.



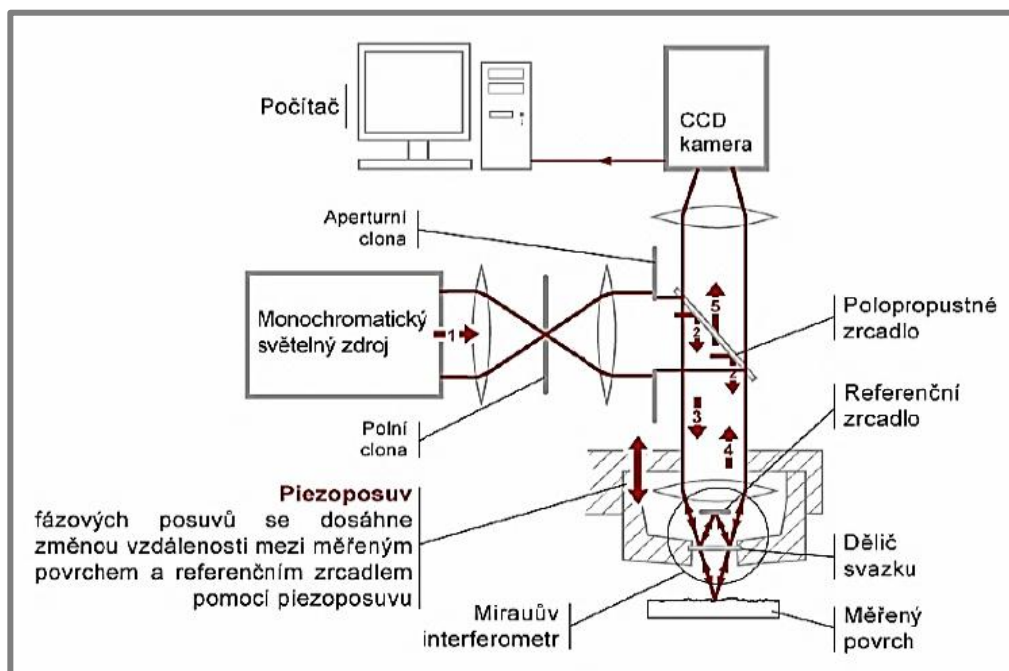
Obr. 35 Závislost mezi kontaktním zatížením a smykovým napětím pro mosazné kontaktní těleso.

4.3. Měřicí metoda

4.3.1. Fázově řízená interferometrie (PSI)

Fázově řízená interferometrie je optická profilometrická metoda, která stanovuje strukturu měřeného povrchu na základě souboru pořízených interferogramů, které mají mezi sebou známý fázový posun. Aplikace této interferometrické metody pro studium reálných kontaktů nebyla doposud v literatuře popsána.

Princip fázově řízené interferometrie je znázorněn na obr. 36. Monochromatický koherentní paprsek světla prochází soustavou čoček a clon až k polopropustnému zrcadlu, kde se odráží k děliči svazku. Zde se rozděluje na dvě nezávislé větve. Jedna část paprsku pokračuje k měřenému vzorku, zatímco druhá část putuje k referenčnímu zrcátku, které je v interferenčním objektivu pohyblivě uloženo a ovládáno přesným piezoelektrickým posuvem. Od měřeného povrchu a od referenčního zrcátka se paprsky odrážejí zpět k děliči svazku, kde spolu interferují. Vzniklá interference se zaznamenává na fotocitlivý čip kamery, přičemž výšky jednotlivých povrchových výstupků jsou zde zakódovány v podobě intenzit. Aby bylo možné strukturu povrchu dostatečně přesně vykreslit, musí se pořídit více snímků, které mají mezi sebou známý fázový posun.



Obr. 36 Princip fázově řízené interferometrie [27].

Charakteristické parametry PSI:

- vertikální rozlišitelnost 1 – 0,05 nm,
- horizontální rozlišitelnost 0,25 – 1 μm ,
- maximální vertikální skok 130 – 160 nm,
- délka měření 1 – 60 s.

Fyzikální podstata metody

Jak už bylo řečeno, základ této interferometrické metody spočívá v pořízení interferogramů, které mají mezi sebou známý fázový posuv. Na základě algoritmů, které jsou v této kapitole popsány se z pořízených interferogramů stanoví mapa fází, která je následně přepočtena na mapu výšek povrchových výstupků. Teoretiky by pro stanovení struktury měřeného povrchu měly postačovat tři interferogramy, avšak z hlediska vyskytujících se chyb při měření je v praxi používáno především více snímkových algoritmů.

Fyzikální princip fázově řízené interferometrie je zde popsán pro tři snímkový algoritmus. Následující odvození vychází z [27, 34]. Základem je obecná rovnice dvousvazkové interferometrie, kterou lze vyjádřit jako:

$$I(x, y) = I' + I'' \cos[\phi(x, y) + \varphi], \quad (31)$$

kde:

$I(x, y)$	lx	- intenzita v bodě x, y ,
I', I''	lx	- intenzita jednotlivých ramen interferometru,
$\phi(x, y)$		- fáze v bodě x, y ,
φ		- fázový posuv.

Jsou změřeny tři interferogramy, které mají mezi sebou známý fázový posun:

$$\varphi_1 = \frac{\pi}{4}, \quad \varphi_2 = \frac{3\pi}{4}, \quad \varphi_3 = \frac{5\pi}{4},$$

jejich intenzity lze vyjádřit jako:

$$I_1(x, y) = I' + I'' \cos \left[\phi(x, y) + \frac{\pi}{4} \right], \quad (32)$$

$$I_2(x, y) = I' + I'' \cos \left[\phi(x, y) + \frac{3\pi}{4} \right], \quad (33)$$

$$I_3(x, y) = I' + I'' \cos \left[\phi(x, y) + \frac{5\pi}{4} \right], \quad (34)$$

$I', I'', \phi(x, y)$ jsou neznámými parametry. Řešením soustavy těchto rovnic se získá vztah pro mapu fází $\phi(x, y)$:

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{I_3(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_2(x, y)} \right), \quad (35)$$

přepočet mapy fází na mapu výšek povrchových výstupků je dán rovnicí:

$$h(x, y) = \frac{\lambda}{4\pi} \phi(x, y), \quad (36)$$

kde:

λ	m	- vlnová délka použitého světla,
$h(x, y)$	m	- výška topografie v bodě (x, y) .

Více snímkové algoritmy

V praxi se používají především více snímkové algoritmy, které nejsou tak náchylné na vzniklé chyby při měření. Jedná se především o chyby způsobené vibracemi, nesprávně nastavenou fází mezi jednotlivými snímky, chyby způsobené nelinearitou čipu kamery aj. [27]. V následující části jsou uvedeny nejčastěji používané více snímkové algoritmy:

- čtyř snímková metoda:

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{I_2(x, y) - I_4(x, y)}{I_3(x, y) - I_1(x, y)} \right), \quad (37)$$

- pěti snímková metoda (Schwider-Harriharan):

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{2(I_4(x, y) - I_2(x, y))}{I_1(x, y) - 2I_3(x, y) + I_5(x, y)} \right], \quad (38)$$

- šesti snímková metoda (Schmit, Creath):

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left(\frac{-3I_2(x, y) + 4I_4(x, y) - I_6(x, y)}{I_1(x, y) - 4I_3(x, y) + 3I_5(x, y)} \right), \quad (39)$$

- sedmi snímková metoda (Harriharan):

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{4(2I_4(x, y) - I_2(x, y) - I_6(x, y))}{I_1(x, y) - 7I_3(x, y) + 7I_5(x, y) - I_7(x, y)} \right]. \quad (40)$$

Omezení metody

Hlavním limitujícím faktorem této interferometrické metody je výškově omezená měřitelnost, kdy výškový rozdíl dvou měřených bodů nesmí převyšovat $\pi/4$ vlnové délky použitého světla. Z toho vyplývá, že tato metoda je vhodná především pro měření relativně hladkých povrchů.

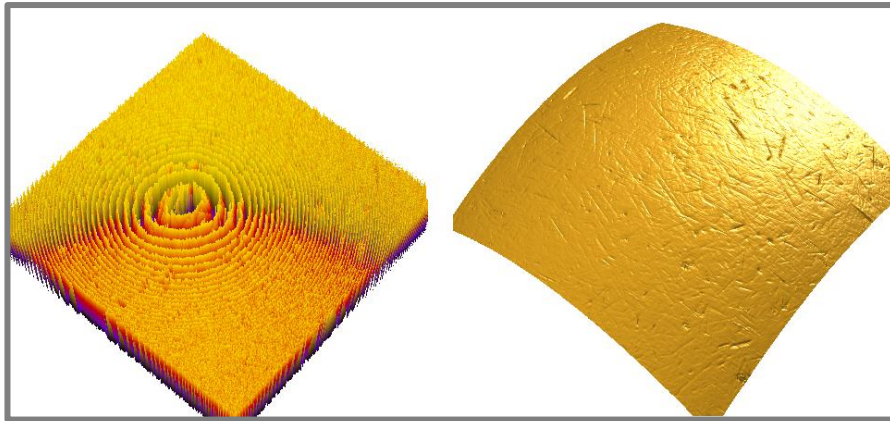
Aplikace PSI pro měření reálných kontaktů

Představa využití PSI pro měření reálných kontaktů in-situ je následující: kontaktní kulové těleso se vloží do simulátoru Hertzova kontaktu a skrze transparentní těleso se změří jeho struktura povrchu v nezátíženém stavu. Poté je simulátorem vyvozeno kontaktní zatížení a opět se provede měření struktury tentokrát zatíženého povrchu. Na základě porovnání těchto dvou stavů bude možné stanovit vzniklou makro i mikroskopickou deformaci.

Vzhledem ke skutečnosti, že fázově řízená interferometrie nebyla doposud aplikována pro měření reálných povrchů in-situ, je nezbytné vyřešit, zdali vlivem měření skrze transparentní těleso nedochází ke zkreslení výšek nebo tvarů povrchových výčnělků.

4.3.2. Phase unwrapping

Dojde-li při měření struktury povrchu k překročení jednoho interferenčního řádu (kulový vrchlík), dojde k tzv. „zabalení povrchu do jedné vlnoplochy“, obdobně jako tomu je ukázáno na obr. 37. Úkolem unwrappingu je tedy analýza a zároveň korekce míst, kde došlo k výškovým přeskokům o jednu vlnovou délku. Vzhledem k dobrým vlastnostem této korekce dat bývá v praxi unwrappingu aplikováno i v případech, kde k překročení interferenčního řádu zjevně nedošlo. Na základě předchozích zkušeností s řešením této problematiky byl aplikován algoritmus PCG [35].



Obr. 37 Ukázka měřeného povrchu před a po phase unwrappingu.

Princip phase unwrappingu

Jeden z nejjednodušších druhů unwrappingu je založen na mapování fáze dvou sousedních bodů. Lze ho popsat následujícím algoritmem:

je-li:

$$\phi(A) - \phi(B) > \pi, \quad (41)$$

pak korekce je ve tvaru:

$$\phi(B) = \phi(B) + 2\pi, \quad (42)$$

a naopak:

$$\phi(A) - \phi(B) < -\pi, \quad (43)$$

pak korekce je ve tvaru:

$$\phi(A) = \phi(A) - 2\pi, \quad (44)$$

V praxi jsou většinou využívány mnohem sofistikovanější algoritmy, které nejsou tak náchylné na přítomný šum [36].

Metody phase unwrappingu:

- metody sledující cestu,
- metody globální minimalizace,
- metody residuální.

4.3.3. Filtrace složek povrchu

Struktura povrchu strojních součástí je složena z prvků, které se od sebe odlišují vlnovou délkou [37]. Jsou to tyto prvky: základní tvar, vlnitost a drsnost. Představitelem krátkých vlnových délek je drsnost povrchu a naopak představitel dlouhých vlnových délek je základní tvar. Oblast mezi dlouhými a krátkými vlnovými délkami vyplňuje vlnitost. Aby mohly být analyzovány vzniklé mikroskopické deformace profilu drsnosti, je nezbytné z pořízených dat odstranit všechny prvky, které obsahují dlouhé vlnové délky.

Základní tvar je z pořízených dat odstraněn odečtením kulové plochy. Je nutné podotknout, že se musí od deformovaného a nedeformovaného povrchu odečíst ta samá koule, aby nedocházelo ke zkreslení představy o vzniklé deformaci. Jakmile je odstraněn základní tvar, data obsahují pouze prvky vlnitosti a drsnosti. Protože je objektem zájmu především deformace povrchových výstupků, musí se odstranit i prvky vlnitosti za pomoci Fourierovy filtrace nebo pomocí konvoluce. Oba dva přístupy lze provést v programu Matlab. Při analyzování provedených experimentů bylo použito Fourierovy filtrace.

Diskrétní Fourierova filtrace

Základní myšlenka Fourierovy filtrace (separace) jednotlivých prvků struktury povrchu vychází z Fourierova teorému: každou funkci $f(x)$, která je alespoň po částech spojitá a má konečný počet bodů nespojitosti, lze rozložit na součet harmonických funkcí (sinus, cosinus) lišících se vlnovou délkou, frekvencí a amplitudou [49]. Filtrace je tedy proces, při kterém se určité vlnové délky získaného signálu ponechají a jiné se odstraní.

Diskrétní Fourierova transformace (DFT) doznala obrovského rozmachu s rozvojem počítačové techniky. Dnes se jedná o nenahraditelný nástroj při analýze dat, neboť umožňuje vyšetřovat průběh signálu jak v prostorové, tak ve frekvenční oblasti. Výhodou zobrazení signálu ve frekvenční oblasti je snadná filtrace jeho jednotlivých harmonických složek např. v závislosti na jejich vlnových délkách.

Rozklad diskretního signálu do frekvenční oblasti je:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} nk\right), \quad (45)$$

zpětná transformace je:

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} nk\right), \quad (46)$$

kde:

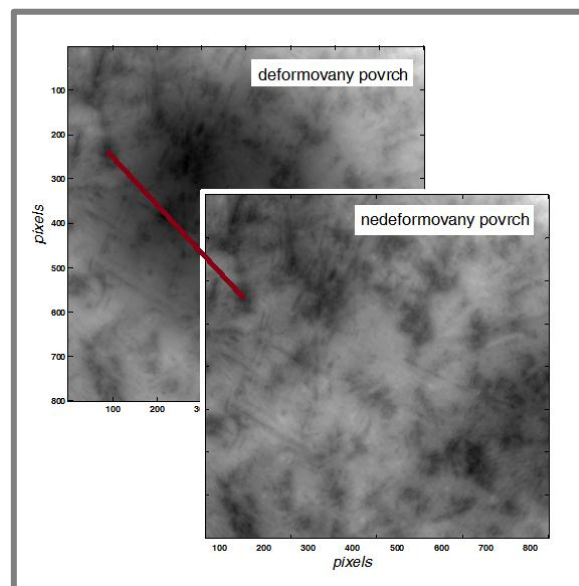
- $X(k)$ - obraz Fourierovy transformace,
- $x(n)$ - originál Fourierovy transformace,
- N - počet vzorků,
- k, n - 1, 2, 3, ..., N-1.

4.3.4. Sesazování snímků

Snímky, ze kterých byl odstraněn základní tvar a následně i prvky vlnitosti, jsou dále upravovány a analyzovány. Jak vyplývá z podstaty měřící metody, snahou je vzájemně porovnávat nedeformované a deformované povrchy. Toho lze docílit vzájemným sesazením snímků, které jsou mapami výšek povrchových nerovností, a vytvořením profilů drsnosti, ze kterých lze identifikovat vzniklé deformace.

Ačkoliv existují automatické algoritmy, které dokáží na sebe sesadit dva snímky, zůstává otázkou, jaká je jejich robustnost při aplikaci na reálné povrchy, kde jsou povrchové nerovnosti rozmístěny velmi stochasticky.

Byl zvolen ruční přístup sesazování, kdy jeden snímek je posouván vůči druhému v osách x , y a případně je vůči němu natáčen. Přičemž jako referenční body slouží povrchové nerovnosti, které se nacházejí mimo kontaktní oblast (obr. 38). Hodnotícím kritériem míry shody správného sesazení snímků byla použita suma rozdílů dvou povrchů.



Obr. 38 Vzájemné sesazování snímků.

4.4. Postup měření

Povrchy obou kontaktních těles musí být očištěna např. pomocí acetonu. Poté se kulové těleso a skleněný disk vloží do simulátoru Hertzova kontaktu a provede se kalibrace tlakového snímače C9B v softwaru AED Panel32 [50]. Po kalibraci se do kontaktního rozhraní vpraví imerzní kapalina, aby se zamezilo vzniku dalšího optického rozhraní. Použitá imerze byla pro všechny provedené experimenty stejná. Byl použit olej LSBS s indexem lomu $n = 1,492$. Poté je spuštěn snímací software (kapitola 4.1.3.). Pro stanovení mapy fází byla použita sedmi snímková metoda [34], která je invariantní k chybám, vzniklých okolními vibracemi. S ohledem na tvar měřeného tělesa byl aplikován phase unwrapping dle algoritmu PCG [35].

5. ANALÝZA A INTERPRETACE ZÍSKANÝCH ÚDAJŮ

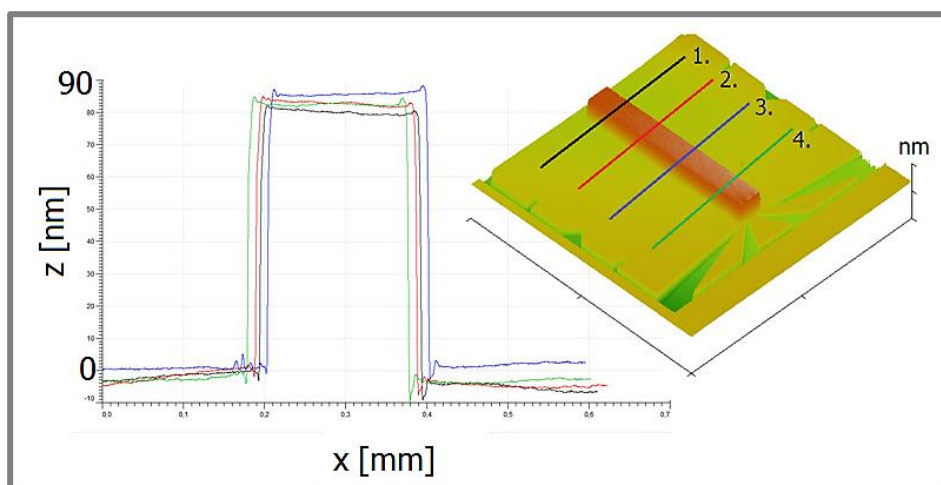
5.

5.1. Měření standardu VLSI

5.1.

Před aplikováním fázově řízené interferometrie pro měření kontaktů strojních součástí bylo nutné ověřit metodu, zda nedochází ke zkreslení, či ovlivnění přesnosti získaných výsledků vlivem měření skrz transparentní těleso s přítomností imerze. Provedlo se experimentální měření na standardu SHS 880 QC od společnosti VLSI [51]. Jedná se o křemíkovou desku, na které jsou přesně vyleptány geometrické útvary. Jedním z takovýchto útvarů je kalibrovaný práh (obr. 39) s garantovanou výškou $86,7 \pm 1,2$ nm. Měření probíhalo za podmínek velmi blízkých Hertzovu kontaktu. Standard byl přikryt skleněnou deskou o tloušťce 3 mm a do kontaktního rozhraní byla vpravena imerzní kapalina, aby se zamezilo vzniku dalšího optického rozhraní. Byl použit olej LSBS s indexem lomu $n = 1,492$. Pro představu, použité sklo má index lomu $n = 1,5$.

Na změřeném prahu bylo vytvořeno několik na sobě nezávislých profilových řezů v programu Gwyddion a jejich výšky byly zaznamenány do tabulky 2. Průměrná výška změřeného prahu byla 85,1 nm. Z toho lze usoudit, že transparentní těleso nemá výrazný vliv na výsledek změřené výšky povrchového výčnělku. Také změřený tvar nevykazuje známky optického zkreslení.



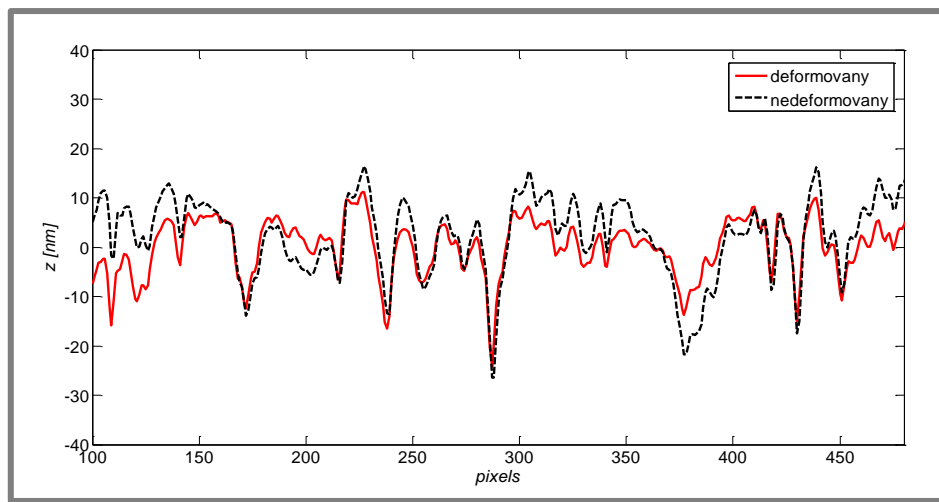
Obr. 39 Ukázka kalibrovaného prahu a místa vedených řezů.

Tabulka 2 Experimentálně zjištěné hodnoty výšky kalibrovaného prahu.

Řez:	Výška z:
1.	83,2 nm
2.	86,2 nm
3.	84,7 nm
4.	86,2 nm
Aritmetický průměr	85,1 nm

5.2. Měření kontaktu ocel – sklo

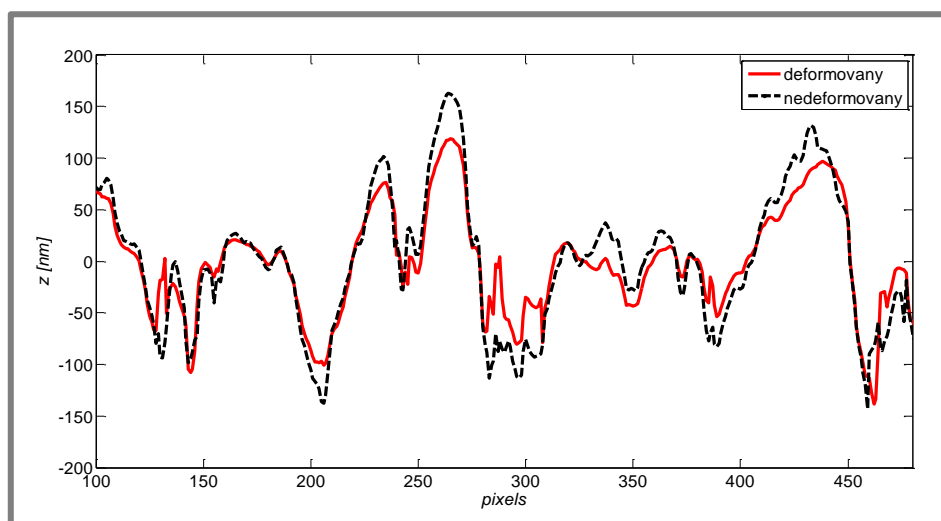
Byla měřena elastická úloha kontaktu ocelové koule o průměru 25,4 mm a skleněného disku BK7 o tloušťce 3 mm. Do kontaktního rozhraní byla vpravena imerze (olej LSBS) a kontakt byl zatížen silou $W = 20$ N. Provedené profily drsnosti zatíženého a nezatíženého stavu jsou zobrazeny na obr. 40. Lze vidět drobnou deformaci povrchových výčnělků, avšak významnou deformaci celého profilu drsnosti. Z toho lze vydedukovat skutečnost, že v tomto kontaktu došlo k deformaci především na makroskopické úrovni. Tato skutečnost je přisuzována nezanedbatelné deformaci skleněného disku.



Obr. 40 Profil drsnosti nedeformovaného a deformovaného ($W = 20$ N) povrchu ocelové koule.

5.3. Měření kontaktu mosaz – sklo

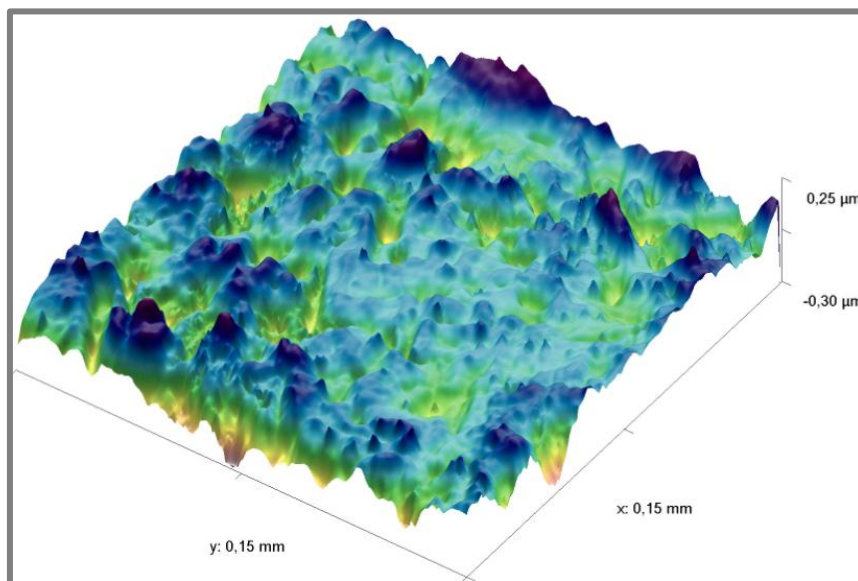
Byla měřena elastická úloha mosazné koule o průměru 19,05 mm (3/4“) a skleněného disku BK7 o tloušťce 3 mm. Do kontaktu byla vpravena imerze (olej LSBS) a kontakt byl zatížen silou $W = 7$ N. Na obr. 41 je zobrazen graf profilu drsnosti nezatíženého a zatíženého povrchu. Lze si všimnout jasně viditelné deformace povrchových výčnělků a téměř nulové deformace profilu drsnosti.



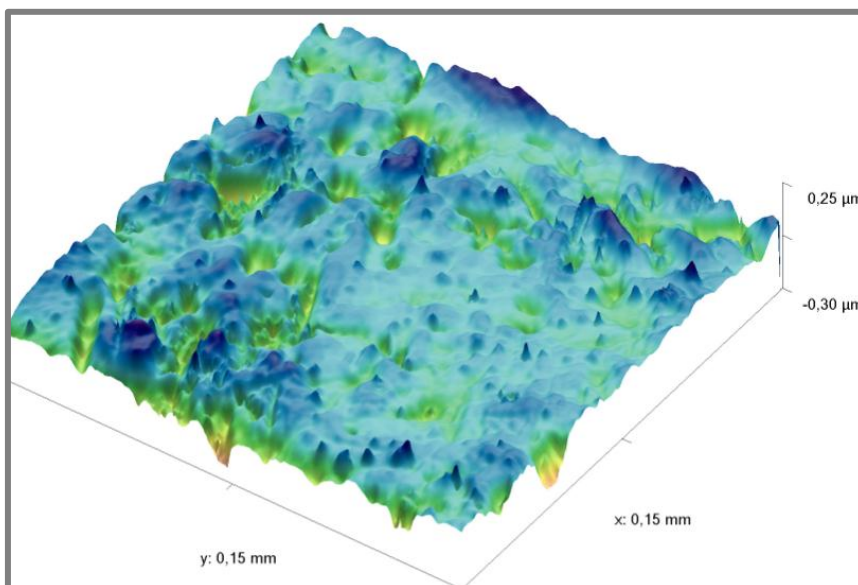
Obr. 41 Profil drsnosti nedeformovaného a deformovaného ($W = 7$ N) povrchu mosazné koule.

Způsobený rozdíl mezi deformačním chováním ocelové a mosazné koule byl zřejmě způsoben rozdílnými materiálovými charakteristikami těles. Modul pružnosti oceli ($E = 210\,000\text{ MPa}$) je dvakrát vyšší, nežli modul pružnosti mosazi ($E = 110\,000\text{ MPa}$). Dalším neopomenutelným faktorem, který může způsobovat tyto odlišnosti, je rozdílná výchozí struktura povrchu těles viz tabulka 1.

Na obr. 42 je zobrazena 3D vizualizace nedeformovaného a na obr. 43 deformovaného mosazného povrchu, která opticky podkládá změřená data nedeformovaného a deformovaného povrchu.



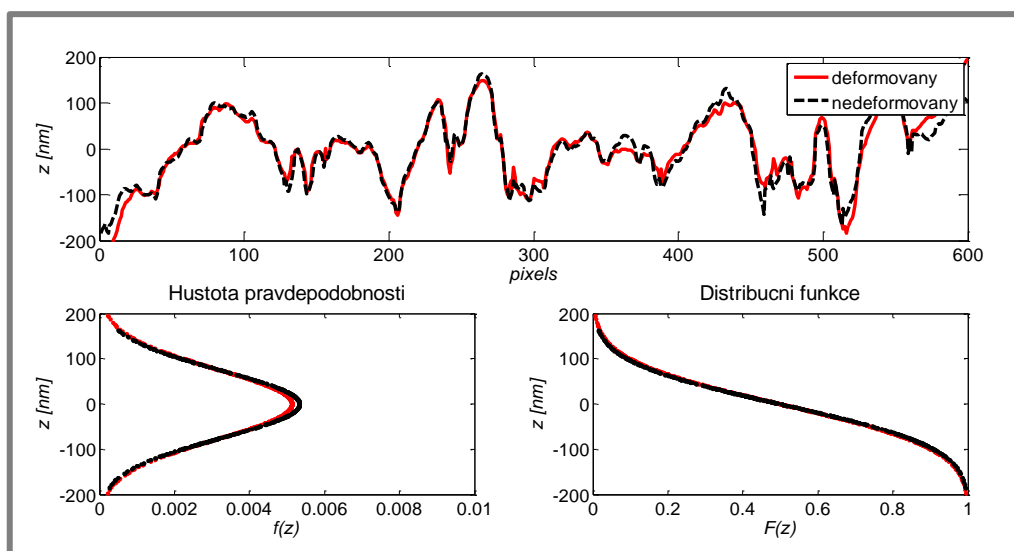
Obr. 42 3D vizualizace nedeformovaného profilu.



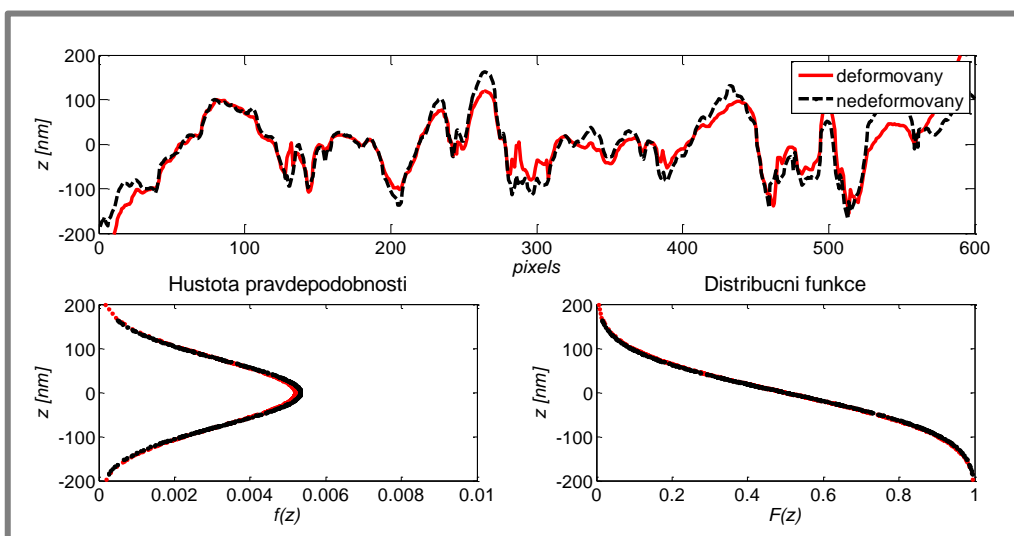
Obr. 43 3D vizualizace deformovaného profilu.

5.4. Závislost profilu drsnosti na zatížení

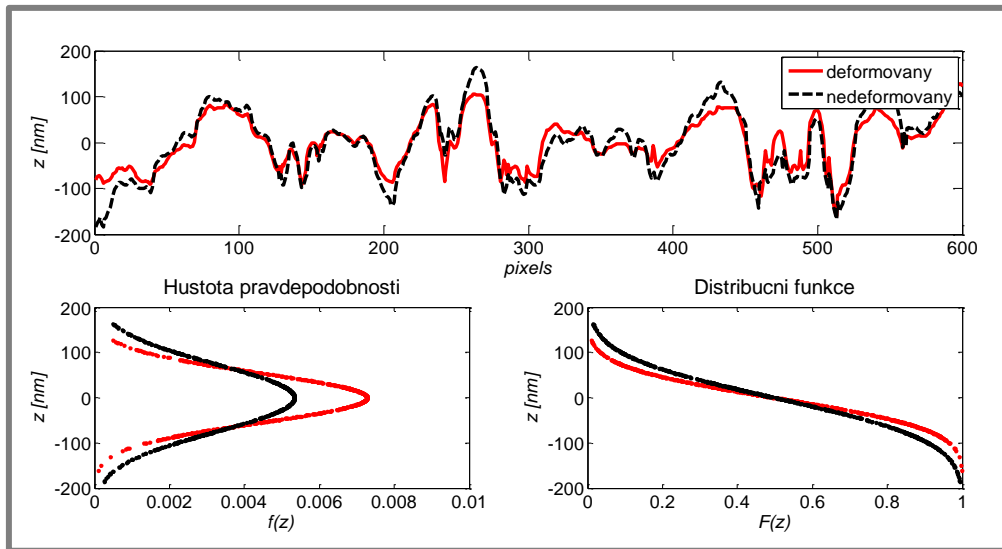
Pro mosaznou kouli o průměru 19,05 mm ($\frac{3}{4}$ palce) byla provedena sada měření kontaktní úlohy se sklem BK7. Jako imerze byl použit olej LSBS. Bylo aplikováno kontaktní zatížení v rozsahu: 2, 7, 10, 15, 20, 25 a 30 N, přičemž hlavním objektem zájmu bylo pozorování chování drsnosti v závislosti na aplikovaném zatížení. Je důležité zdůraznit, že tento experiment překračuje elastickou oblast deformace (mezní síla 7 N). Aby bylo dosaženo co nejreálnější představy, struktura povrchu mosazné koule nebyla před provedením experimentu žádným způsobem upravována (leštění apod.). Pro jednotlivá zatížení byly sestaveny grafy profilové drsnosti, jejich distribuční funkce a hustoty. S cílem zpřehlednit tuto diplomovou práci, jsou zde uvedeny grafy pouze pro čtyři hodnoty zatížení. Ostatní grafy jsou obsahem přílohy č. 1.



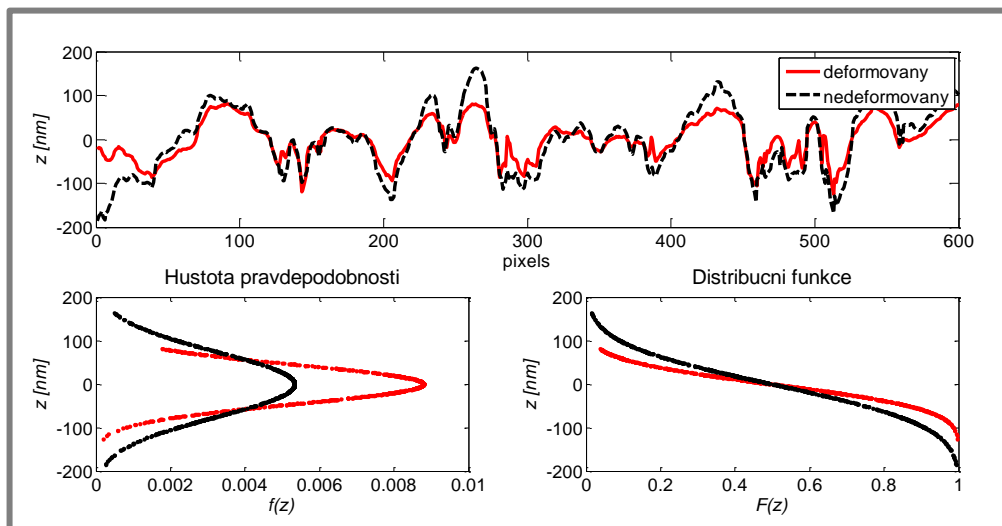
Obr. 44 Profil drsnosti mosazné koule $W = 2$ N.



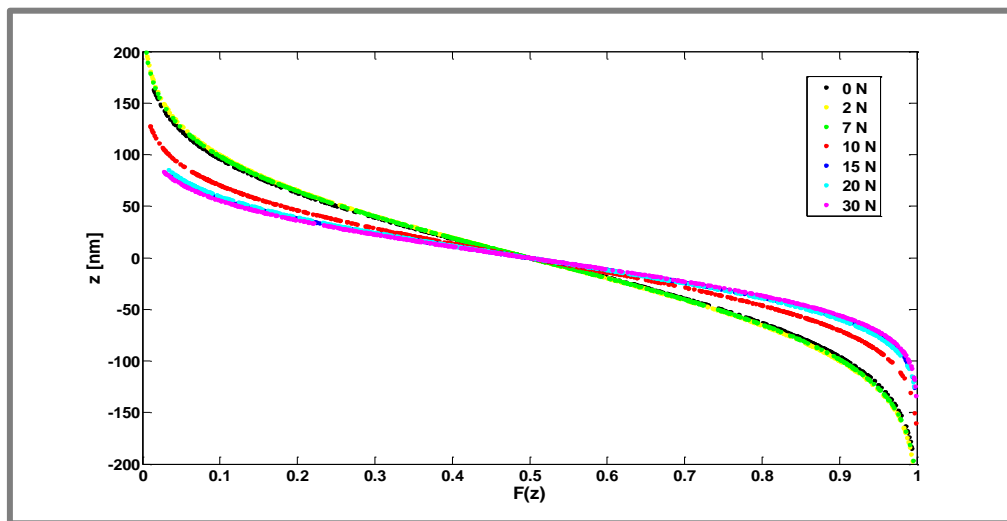
Obr. 45 Profil drsnosti mosazné koule $W = 7$ N.



Obr. 46 Profil drsnosti mosazné koule $W = 10$ N.



Obr. 47 Profil drsnosti mosazné koule $W = 15$ N.



Obr. 48 Závislost distribuční funkce na zatížení.

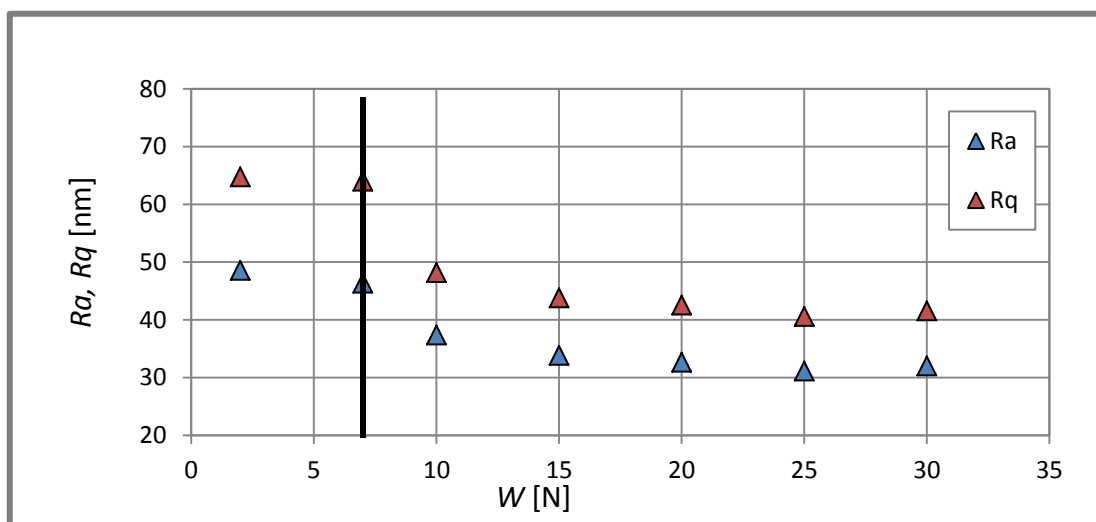
Z výše uvedených obrázků se potvrzuje původně předpokládané chování reálných povrchů v kontaktu. To znamená, že vlivem zvyšujícího se kontaktního zatížení dochází k přibližování povrchových výčnělků ke střední čáře profilu drsnosti. S tímto jevem úzce souvisí i zužování křivky hustoty pravděpodobnosti a pokles strmosti křivky distribuční funkce.

V zobrazeném profilu drsnosti se nacházejí oblasti, kde zřejmě vlivem překročení limitu měřicí metody, došlo k nepřesnostem měření. Při měření struktury povrchu fázově řízenou interferometrií, by výškový rozdíl dvou měřených bodů neměl převyšovat $\lambda/4$ vlnové délky použitého světla (pro použitou laserovou diodu je to cca 165,5 nm).

Z obr. 48 je patrné, že významná změna tvaru křivky distribuční funkce nastává až po překročení určité hodnoty zatížení. Zda-li se jedná o hodnotu mezního zatížení nelze s jistotou říci. Bylo by vhodné experimentální měření opakovat s jemnější volbou kroku kontaktního zatížení.

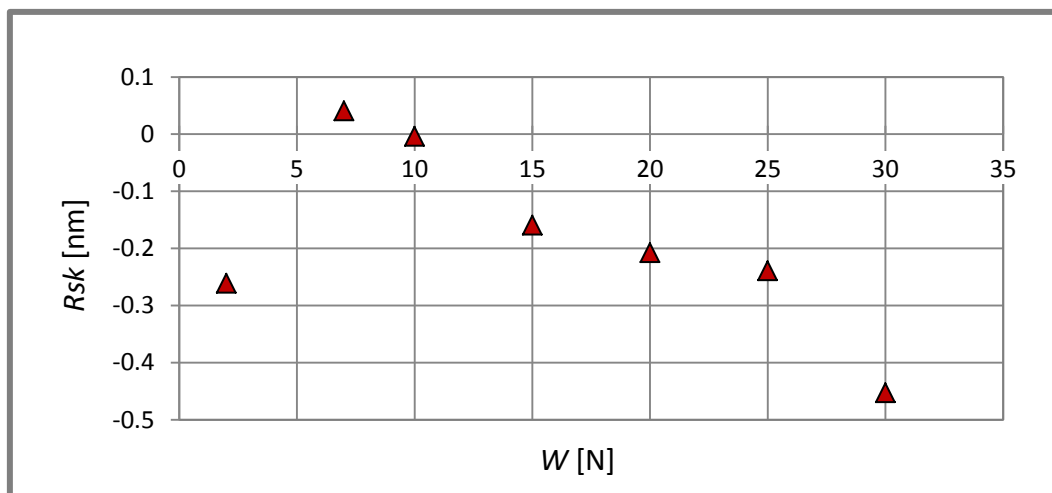
5.5. Závislost R parametrů posuzovaného profilu na zatížení

Z pořízených dat předchozího experimentu byly sestaveny grafy, které vyjadřují závislost mezi amplitudovými R parametry posuzované drsnosti a vyvozeným kontaktním zatížením. Výchozí stav povrchu mosazné koule měl tyto charakteristiky: $Ra = 50$ nm, $Rq = 63$ nm, $Rsk = -0,401$; $Rku = 2,34$. Vyznačené hodnoty v grafu byly stanoveny aritmetickým průměrem z deseti různých profilů drsnosti tělesa.



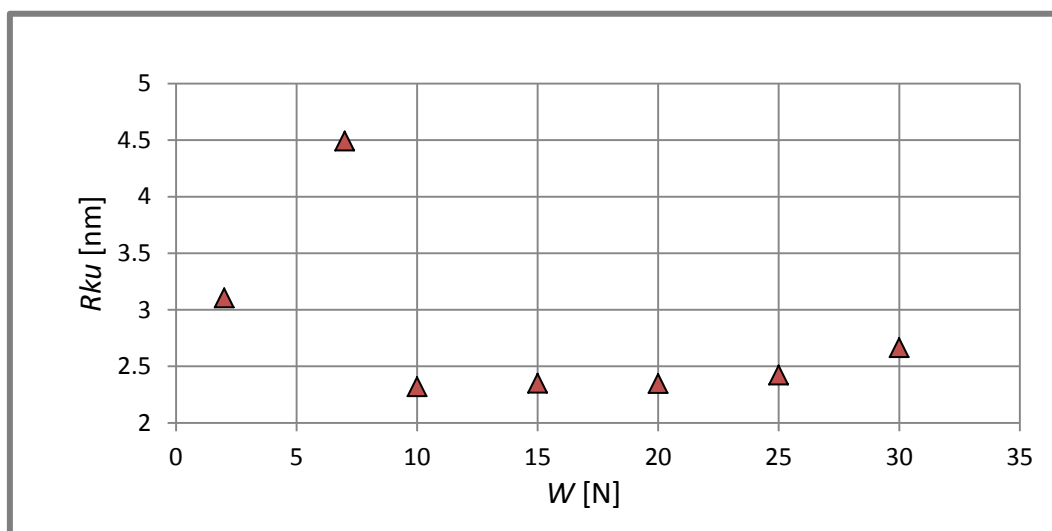
Obr. 49 Závislost Ra , Rq na velikosti kontaktního zatížení W .

Na obr. 49 je zobrazen graf, který vyjadřuje závislost průměrné aritmetické a průměrné kvadratické úchyly posuzovaného profilu (Ra resp. Rq) na velikost kontaktního zatížení W . Vertikální příčka ohraničuje oblast plně elastické a elasto-plastické deformace. Velikost Ra a Rq má v závislosti na zatížení klesající tendenci, přičemž nejvyšší strmost tohoto poklesu se nachází mezi hodnotou zatížení $W = 7$ N a $W = 10$ N.



Obr. 50 Závislost R_{sk} na velikost kontaktního zatížení W .

Na obr. 50 je zobrazen graf, který vyjadřuje závislost mezi šikmostí povrchu a velikostí kontaktního zatížení W . Šikmost (sklon) povrchu vyjadřuje hustotu asymetrie amplitudové křivky. Negativní sklon, neboli $R_{sk} < 0$ označuje povrch s dobrou nosností. Povrch mosazné koule má po překročení kontaktního zatížení 7 N klesající tendenci, dochází tedy ke zvyšování únosnosti povrchu. Tento poznatek koresponduje i s výše uvedenými zjištěními.



Obr. 51 Závislost R_{ku} na velikost kontaktního zatížení W .

Na obr. 51 je zobrazen graf, který vyjadřuje závislost mezi špičatostí povrchu a velikostí kontaktního zatížení W . Špičatost (strmost) povrchu vyjadřuje strmost hustoty amplitudové křivky. Při normálním rozdělení hodnot profilu je $R_{ku} = 3$. Největší změny špičatosti profilu drsnosti mosazné koule nastávají mezi hodnotou zatížení $W = 7$ N a $W = 10$ N. Z grafu nelze vypočítat žádnou závislost, což může být způsobeno vysokou citlivostí R_{sk} na lokální gradienty (chyby měření).

5.6. Diskuze

Při podrobnějším prozkoumání provedených profilů drsnosti pro ocelové a mosazné kontaktní těleso je patrné, že deformace kontaktu ocelového tělesa probíhala především na makroskopické úrovni ($W = 20$ N). Naopak, v kontaktu mosazného tělesa byla deformace patrná i na mikroskopické úrovni při výrazně nižším kontaktním zatížení ($W = 7$ N). Toto chování je přisuzováno skutečnosti, že modul pružnosti oceli je dvakrát vyšší než modul pružnosti mosazi. Tato tvrzení jsou podložena rovnicí 47, ze které vyplývá přímá úměra mezi deformací transparentního tělesa a modulem pružnosti použité koule.

Jsou-li v kontaktu dvě zatížená tělesa s odlišnými materiálovými charakteristikami, vzniklá deformace je pro každé těleso jiná. Rozděluje se podle následujícího vztahu [38]:

$$\frac{\delta_1 E_1}{(1 - \nu_1^2)} = \frac{\delta_2 E_2}{(1 - \nu_2^2)}, \quad (47)$$

přičemž celková vzniklá deformace je dána vztahem:

$$\delta = \delta_1 + \delta_2, \quad (48)$$

kde:

- δ - celková deformace,
- $\delta_{1,2}$ - složka deformace.

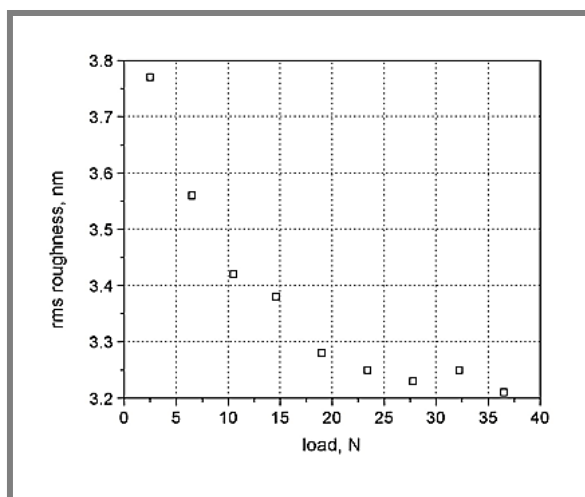
Ačkoliv byla při kontaktu mosazné koule jasně viditelná deformace povrchových výčnělků, nezanedbatelná deformace skla znemožnila stanovení relevantního kritéria velikosti kontaktní oblasti. Možná cesta ke stanovení tohoto kritéria spočívá ve vytvoření idealizované kontaktní dvojice. To znamená kontakt ideálně tuhé desky a elasticky se deformující koule. Idealizovaného stavu lze docílit:

1. použitím koule s výrazně nižším modulem pružnosti nežli má skleněný disk, (např. polymerová koule).
2. Použití transparentního tělesa s výrazně vyšším modulem pružnosti, nežli má použitá koule (např. safírové sklo nebo diamant $E = 1150$ GPa).

Měření prvního případu, kdy bylo použito polyamidové koule PA6 o průměru 18 mm a skleněného disku, neproběhlo úspěšně. Ačkoliv se podařilo změřit strukturu povrchu koule, při aplikování imerzní kapaliny do kontaktu došlo k úplnému zneviditelnění kontaktního rozhraní. Toto chování je přisuzováno skutečnosti, že polymerové materiály mají velmi podobný index lomu skla nebo imerze. Po nanesení tenké kovové vrstvy na povrch tělesa by mělo dojít k nárůstu indexu lomu povrchu a tedy ke změřitelnosti této kontaktní úlohy.

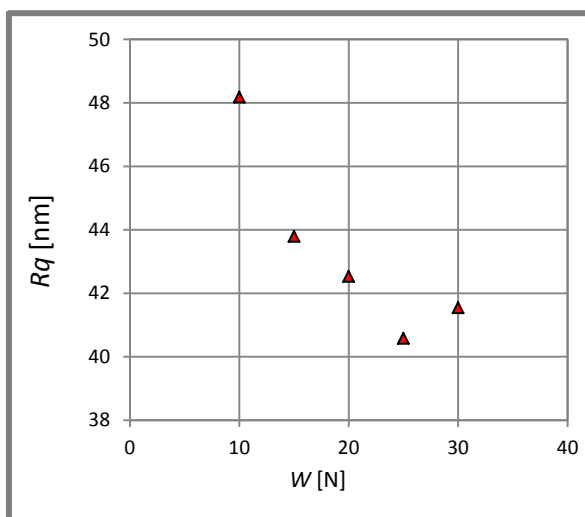
Druhé kontaktní uspořádání je komplikováno vysokým indexem lomu transparentního tělesa (např. index lomu diamantu $n = 2,42$). Otázkou je, zdali na trhu existuje imerzních kapalina s takto vysokým indexem lomu, která by byla netoxická a její absorpce téměř nulová. Provedení experimentu bez aplikování imerzní kapaliny do kontaktního rozhraní je nemožné, neboť by došlo ke vzniku dalšího optického rozhraní, na kterém by vznikala v tomto případě parazitní interference. Změřená data by tak nebyla relevantní.

Při porovnání změřené závislosti R_a , R_q na kontaktním zatížení s experimenty, které byly provedeny jinými autory, lze vidět jistá podoba. Na obr. 52 je zobrazena závislost R_q (rms) na kontaktním zatížení, která byla změřena Křupka a kol. [17] pomocí kolorimetrické interferometrie pro suchý statický kontakt ocelové koule o průměru 25,4 mm a skleněného disku, na kterém byla nanášena vrstva oxidu křemičitého o tloušťce 195 nm. Výchozí struktura povrchu ocelové koule byla: $R_a = 12$ nm, $R_q = 15$ nm.



Obr. 52 Závislost R_q na zatížení: změřeno kolorimetrickou interferometrií [17].

Závislost R_q na zatížení, která byla změřena fázově řízenou interferometrií, byla stanovena pro kontakt mosazné koule o průměru 19,05 mm a skleněného disku o tloušťce 3 mm. Výchozí struktura povrchu mosazné koule byla: $R_a = 50$ nm, $R_q = 63$ nm.



Obr. 53 Závislost R_q na zatížení: změřeno PSI.

Z výše uvedených výsledků vyplývá, že pomocí fázově řízené interferometrie je možné měřit kontaktní úlohy reálných těles. V kontaktu byla identifikována jak mikro, tak makroskopická deformace experimentálního tělesa. Na základě této informace lze pomocí inverzní elastické teorie [40] stanovit reálné rozložení kontaktního tlaku, který je vstupním parametrem výpočtu reálného rozložení podpovrchových napětí. Tato informace je uplatňována především při řešení úloh kontaktní únavy, neboť struktura povrchu významně ovlivňuje životnost strojních součástí [57].

Vzhledem ke skutečnosti, že během experimentálního měření se nepodařilo vytvořit takovou kontaktní dvojici, která by mohla být považována za idealizovaný případ kontaktu tuhé desky a elasticky se deformující koule, nebylo možné stanovit relevantní kritérium velikosti kontaktní oblasti.

6. ZÁVĚR

Primárním cílem této diplomové práce bylo použití fázově řízené interferometrie pro řešení kontaktů těles. Jedná se o inovativní experimentální přístup studia kontaktu povrchů s reálnými nerovnostmi, který doposud nebyl v literatuře popsán. Ke splnění tohoto cíle bylo nutné sestavit experimentální aparaturu, provést na ni měření a pořízená data analyzovat. Před aplikováním této interferometrické metody pro měření reálných kontaktů bylo nezbytné vyšetřit, zdali vlivem měření struktury povrchu skrze transparentní těleso nedochází ke zkreslení pořízených dat. Byl tedy proveden experiment na standardu VLSI, kdy byla měřena výška kalibrovaného prahu. Při vzájemném porovnání změřené výšky s hodnotou uváděnou výrobcem bylo zjištěno, že přítomnost transparentního tělesa neovlivňuje výšku ani tvar změřené struktury. Na základě tohoto předpokladu byla provedena sada experimentů pro kontakt ocelové, mosazné koule a skleněného disku. Z hlediska získaných výsledků se tato metoda jeví jako vhodnou pro studium reálných kontaktů, přičemž její největší potenciál je ve schopnosti stanovení vzniklé mikro a makroskopické deformace, jež lze dále využít při studiu kontaktní únavy strojních součástí.

7. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HERTZ, HR, 1882, Ueber die Beruehrung elastischer Koerper (On Contact Between Elastic Bodies), in *Gesammelte Werke (Collected Works)*, Vol. 1, Leipzig, Germany, 1895.
- [2] DYSON, J.; HIRST, W. The True Contact Area Between Solids. *Proceedings of the Physical Society*. 1954, 4, s. 309-312.
- [3] GREENWOOD, J. A.; WILLIAMSON, J. B. P. Contact of nominally flat surfaces, *Proc. R. Soc. Lond. Ser.* 1966, A295, s. 300-319.
- [4] UPPAL, A. H.; PROBERT, S. D.; THOMAS, T. R. The real area of contact between a rough and a flat surface. *Wear*. 1972, 22, s. 163-183.
- [5] BHUSHAN, B. Contact mechanics of rough surfaces in tribology: Single asperity contact. *Appl Mech Rev* . 1996, 49, s. 275-298.
- [6] JOHNSON, K. L. Contact mechanics. Cambridge (Edinburgh) : Cambridge University Press, 1987. 1-457 s.
- [7] KLIMCZAK, T.; KACZMAREK, J. Predicting Microcontact Spot Size Distribution in Contact Problems. *Annals of the CIRP*. 1992, 41, s. 609-612.
- [8] GIBSON, G. B. The surface as a random proces, *Rough Surfaces*, ed. T. R. Thomas (Longman, London, 1982).
- [9] McCOOL, J. I. Predicting microfracture in ceramics via a microcontact model. *ASME Journal of Tribology*. 1986, 108, s. 380-386.
- [10] MAJUMDAR, A.; BHUSHAN, B. Role of fractal geometry in roughness characterization and contact mechanics of rough surfaces. *ASME Journal of Tribology*. 1990, 112, s. 205-216.
- [11] MAJUMDAR, A.; BHUSHAN, B. Fractal model of elastic-plastic contact between rough surfaces. *ASME Journal of Tribology*. 1991, 113, s. 1-11.
- [12] GREENWOOD, J. A.; TRIPP, J. H. The elastic contact of rough spheres. *ASME J. Appl. Mech.* 1967, 34, s. 153-160.
- [13] MIKIC, B. B. Thermal contact conductance; theoretical considerations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1974, 17(2), s. 205-214.
- [14] EGUCHI, M.; NIIKURA, T.; YAMAMOTO, T. Estimation of Real Contact of Paper-Based Friction Material for Wet Clutches. *J. JAST*. 1997, No. 42, s. 813.
- [15] REFAIE, M. EL; HALLING, J. Experimental Study of Apparent Area of Contact uder Nominally Hertzian Contact of Rough Surfaces. *Proc. Inst. Mech. Engr.* 1968, 183, s. 116-124.
- [16] BHUSHAN, B.; DUGGER, M. Real contact area measurements on magnetic rigid disks. *Wear*. 1990, 137, s. 41-50.
- [17] KRUPKA, I.; HARTL, M.; LIŠKA, M. Some insights into lubricant film thickness in mixed EHD point contacts. *Tribological Research and Design for Engineering Systems*. 2003, s. 549-557.
- [18] EGUCHI, M.; YAMAMOTO, T. Measuring a real contact area using white light interferometry for a low- reflecting rough surface under nonlubricated conditions. *Institute of Symbiotic Science and Technology*. 2005, no. 3, s. 365-375.
- [19] EGUCHI, M.; YAMAMOTO, T.; SHIBAMIYA, T. Measurement of real contact area and analysis of stick/slip region. *Tribology International*. 2009, 42, s. 1781-1791.

- [20] VISSCHER, M.; STRUIK, K. G. Optical profilometry and its application to mechanically inaccessible surfaces Part I: Principles of focus error detection. *Precision Engineering*. 1994, 16 (3), s. 192-198.
- [21] VISSCHER, M.; STRUIK, K. G. Optical profilometry and its application to mechanically inaccessible surfaces Part II: Applications to elastomer/ glass contact. *Precision Engineering*. 1994, 16 (3), s. 199-204.
- [22] DIACONESCU, E.; GLOVNEA, M. Visualization and Measurement of Contact Area by Reflectivity. *Journal of Tribology*, 2006, 128, 915-917.
- [23] MCBRIDE, J. W. The Loaded Surface Profile: A new technique for the investigation of contact surfaces. *International Conference on Electrical Contacts*. 2006, 23, s. 150-156.
- [24] MCBRIDE, J. W.; CROSS, K. C. An Experimental Investigation of the Contact Area between a Glass plane and both Metallic and Carbon- Nano-Tube Electrical Contacts. *IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*. 2008, 54, s. 325-331.
- [25] JAMARI, J.; SCHIPPER, D. J. Deformation due to contact between a rough surface and a smooth ball. *Wear*. 2006, 262, s. 138-145.
- [26] WOO, K. L.; THOMAS, T. R. Contact of rough surface: A review of experimental work. *Wear*. 1980, 58, s. 331-339.
- [27] ŠPERKA, P. 3D optický profilometr pro mapování inženýrských povrchů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2007. 83 s.
- [28] MAREK, J. Simulátor Hertzova kontaktu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 32 s.
- [29] KIM, D. W. Vertical scanning interferometers using white light. *OPTI515*. 2009, 27, s. 1-11.
- [30] ŠMÍD, P., et al. Užití metody korelace polí koherenční zrnitosti pro měření v mechanice. *JMO*. 2009, 1, s. 3-4.
- [31] HRABOVSKÝ, M.; BAČA, Z.; HORVÁT, P. Measurement of an object rotation using the theory of speckle pattern decorrelation. *Optik*. 2000, 111, s. 359.
- [32] HORVÁT, M.; HRABOVSKÝ, Z.; ŠMÍD, P. Application of speckle decorrelation method for small translation measurements. *Opt Appl*. 2004, 34, s. 203.
- [33] OZCAN, A., et al. Speckle reduction in optical coherence tomography images using digital filtering. *JOSA*. 2007, 7, s. 1901-1910.
- [34] SCHREIBER, H.; BRUNING, J. H. Phase Shifting Interferometry. In *Optical Shop Testing. The United States of America : John Wiley & Sons*, 2007. s. 547-666.
- [35] BIAN, Y.; MERCER, B. Weighted regularized preconditioned conjugate gradient (PCG) phase unwrapping method. *Journal of Optics*. 2009, 11, s. 1-11.
- [36] GHIGLIA D. C., PRITT M. D., „Two-Dimensional Phase unwrapping: Theory, Algorithms, and Software“, A Wiley-Interscience publication, ISBN 0-471-24935-1 (1998).
- [37] SVOBODA, P., et al. Základy konstruování. Brno: *CERM akademické nakladatelství*, 2009. 7-234 s. ISBN 978-80-7204-633-1.
- [38] SAYLES, R. S. Basic principles of rough surface contact analysis using numerical methods. *Tribology International Volume*. 1996, 29, s. 639-650.

- [39] ZAPLETAL, L. Studium chování elasto-hydrodynamicky mazaných kontaktů strojních částí s nehladkými povrchy. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 75 s.
- [40] ZHRADNÍK, R. Vliv topografie třecích povrchů na kontaktní únavu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 92 s.
- [41] SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. Mechanical engineering design. 7th ed. 2003. 1030 s. ISBN 0072520361.
- [42] REZVANIAN, O., et al. Surface roughness, asperity contact and gold RF-MEMS switch behavior. *Journal of micromechanics and microengineering*. 2007, 17, s. 2006-2015.
- [43] BHUSHAN, B. Contact mechanics of rough surfaces in tribology: multiple asperity contact. *Tribology letters*. 1998, 4, s. 1-35.
- [44] *Software* [online]. [cit. 2011-04-14]. TAICAAAN. Dostupné z WWW: <http://www.taicaan.com/index_eng.html>.
- [45] GUNT [online]. [cit. 2011-04-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.gunt.de/networks/gunt/sites/s1/mmcontent/prduktbilder/04026200/Datenblatt/04026200%204.pdf>>.
- [46] TecQuipment [online]. [cit. 2011-04-10]. Dostupné z WWW: <http://www.tecquipment.com/Datasheets/TE98_0908.pdf>.
- [47] HBM Test and Measurement [online]. [cit. 2011-04-25]. Products. Dostupné z WWW: <<http://www.hbm.com/>>.
- [48] Wikipedia : The Free Encyclopedia [online]. 2011 [cit. 2011-04-25]. Speckle pattern. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Speckle_pattern>.
- [49] ULLMANN, Vojtěch. AstroNuklFyzika [online]. [cit. 2011-04-25]. Filtry a filtrace v nukleární medicíně. Dostupné z WWW: <<http://astronuklfyzika.sweb.cz/Filtry.htm>>.
- [50] HBM Test and Measurement [online]. [cit. 2011-04-25]. Support. Dostupné z WWW: <<http://www.hbm.com/>>.
- [51] VLSI Standards Incorporated [online]. 2011 [cit. 2011-04-25]. [Http://www.vlsistandards.com/products/dimensional/ststandards.asp?sid=47](http://www.vlsistandards.com/products/dimensional/ststandards.asp?sid=47). Dostupné z WWW: <<http://www.vlsistandards.com/>>.

8. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

A	m^2	- velikost kontaktní oblasti,
A_0	m^2	- velikost nominální kontaktní oblasti,
A_{re}	m^2	- velikost reálné kontaktní oblasti,
E^*	Pa	- redukovaný modul pružnosti v tahu,
$E_{1,2}$	Pa	- modul pružnosti v tahu tělesa 1 a 2,
$F(z)$		- distribuční funkce,
H	Pa	- tvrdost materiálu,
I	lx	- intenzita,
I_0	lx	- intenzita originálu,
I_{AV}	lx	- průměrná hodnota intenzity,
I', I''	lx	- intenzity jednotlivých ramen interferometru,
N		- celkový počet prvků,
R	m	- redukovaný poloměr,
$R_{1,2}$	m	- poloměr tělesa 1 a 2,
R_a	m	- průměrná aritmetická úchylka drsnosti,
R_e	Pa	- mez kluzu v tahu,
R_q	m	- průměrná kvadratická úchylka drsnosti,
R_{qr}	m	- redukovaná průměrná kvadratická úchylka drsnosti,
W	N	- normálová síla,
$X(k)$		- obraz Fourierovy transformace,
a	m	- poloměr kontaktní oblasti,
$d(r)$	m	- celková elastická deformace,
$h(x, y)$	m	- výška povrchového výstupku,
n		- počet aktivních výstupků,
\bar{p}	Pa	- střední nominální tlak,
$p(r)$	Pa	- efektivní tlak,
p_0	Pa	- maximální Hertzův tlak,
\bar{p}_r	Pa	- střední efektivní tlak,
$x(n)$		- originál Fourierovy transformace,
$\phi(x, y)$		- fáze v bodě x, y ,
α		- parametr drsnosti pro Hertzův kontakt,
β	m	- poloměr zaoblení povrchového výstupku,
δ	m	- přiblížení,
η_s	m^{-2}	- hustota výstupků,
λ	m	- vlnová délka použitého světla,
μ		- stav povrchu tělesa,
$\nu_{1,2}$		- Poissonovo číslo,
$\sigma_{1,3}$	Pa	- hlavní napětí,
$\sigma_{x, y, z}$	Pa	- normálové napětí,
σ_p		- směrodatná odchylka,
τ_{max}	Pa	- maximální smykové napětí,
φ		- fázový posun,
ψ		- index plasticity,
$\omega_b(r)$	m	- elastická deformace tělesa jako celku.

9. SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

9.1. Seznam obrázků

Obr. 1 Průběh napětí při kontaktu dvou koulí [41].	15
Obr. 2 Kontakt reálných těles je zprostředkován převážně na povrchových výstupcích [42].	16
Obr. 3 Ukázka nejjednoduššího kontaktního modelu [43].	17
Obr. 4 Ukázka Greenwoodova – Williamsonova kontaktního modelu [43].	17
Obr. 5 kontakt koule s reálnou deskou [6].	19
Obr. 6 Možné způsoby optického měření [14].	21
Obr. 7 Ukázka broušeného a lapovaného vzorku (zvětšeno 69x) [2].	22
Obr. 8 Experimentální zařízení pro studium reálných kontaktů [16].	23
Obr. 9 Chování reálné kontaktní oblasti v závislosti na zatížení: a) střední rádius mikro -kontaktů b) celkový počet vytvořených mikro-kontaktů c) aktuální počet mikro-kontaktů d) počet eliptických mikro-kontaktů e) počet kruhových mikro-kontaktů [4].	24
Obr. 10 Profily drsnosti při zatížení 2,52 N a 36,5 N [17].	24
Obr. 11 Schéma experimentálního zařízení [18].	25
Obr. 12 RGB-AND princip [18].	26
Obr. 13 Gaussova distribuční funkce [19].	27
Obr. 14 Experimentální zařízení a nezávislost měření skrze transparentní těleso [20].	28
Obr. 15 Profil polymerního materiálu při dvou zatíženích [21].	28
Obr. 16 Vizualizace kontaktní úlohy při $F_N = 1560$ N [22].	29
Obr. 17 Princip konfokálního skenovacího profilometru [14].	29
Obr. 18 Experimentální zařízení [25].	30
Obr. 19 2D výškové mapy hliníkových těles a jejich profily drsnosti ($W = 4$ N), průměrná kvadratická úchylka drsnosti levého $R_q = 2,1$ μ m a pravého tělesa $R_q = 2,2$ μ m [25].	30
Obr. 20 Možnosti řešení reálného kontaktu.	31
Obr. 21 Schéma experimentálního zařízení.	32
Obr. 22 Pohled na experimentální stanici: 1) Optický mikroskop 2) interferenční objektiv 3) simulátor Hertzova kontaktu 4) laserová dioda 5) magnetický držák 6) rotující matnice 7) CMOS kamera.	34
Obr. 23 Schéma nové (vlevo) a staré (vpravo) koncepce simulátoru Hertzova kontaktu: 1) matice, 2) sklo, 3) koule, 4) vložka kuliček, 5) pracovní píst, 6) o-kroužek, 7) tlakový píst, 8) příruba, 9) válec, 10) zajišťovací podložka, 11) opěrná podložka, 12) ovládací šroub, 13) odvzdušňovací šroub, 14) tlakový snímač.	35
Obr. 24 Vystředění tlakového snímače vůči vložce koulí.	36
Obr. 25 Hydraulické schéma simulátoru.	36
Obr. 26 Pracovní píst je proti pootočení zajištěn stavěcím šroubem.	37
Obr. 27 Spojení ovládacího šroubu a tlakového pístu.	37
Obr. 28 Schéma optické části experimentální aparatury.	38
Obr. 29 Optický mikroskop Nikon Eclipse LV150 -1) stojan 2) CMOS kamera 3) hlava mikroskopu s okuláry 4) Karusel pro objektivy 5) adaptér pro připojení optického vlákna.	39
Obr. 30 CMOS kamera Photonfocus a její spektrální charakteristika.	39
Obr. 31 Mirau interferenční objektiv s piezoelektrickým posuvem [27].	40
Obr. 32 Řídící jednotka piezoelektrického posuvu: Physik instrumente E-501 [27].	40
Obr. 33 Rotující matnice.	41
Obr. 34 Závislost mezi kontaktním zatížením a smykovým napětím pro ocelové kontaktní těleso.	44
Obr. 35 Závislost mezi kontaktním zatížením a smykovým napětím pro mosazné kontaktní těleso.	44
Obr. 36 Princip fázově řízené interferometrie [27].	45
Obr. 37 Ukázka měřeného povrchu před a po phase unwrappingu.	48
Obr. 38 Vzájemné sesazování snímků.	50
Obr. 39 Ukázka kalibrovaného prahu a místa vedených řezů.	51
Obr. 40 Profil drsnosti nedeformovaného a deformovaného ($W = 20$ N) povrchu ocelové koule.	52
Obr. 41 Profil drsnosti nedeformovaného a deformovaného ($W = 7$ N) povrchu mosazné koule.	52
Obr. 42 3D vizualizace nedeformovaného profilu.	53
Obr. 43 3D vizualizace deformovaného profilu.	53

<i>Obr. 44 Profil drsnosti mosazné koule $W = 2$ N.</i>	54
<i>Obr. 45 Profil drsnosti mosazné koule $W = 7$ N.</i>	54
<i>Obr. 46 Profil drsnosti mosazné koule $W = 10$ N.</i>	55
<i>Obr. 47 Profil drsnosti mosazné koule $W = 15$ N.</i>	55
<i>Obr. 48 Závislost distribuční funkce na zatížení.</i>	55
<i>Obr. 49 Závislost R_a, R_q na velikost kontaktního zatížení W.</i>	56
<i>Obr. 50 Závislost R_{sk} na velikost kontaktního zatížení W.</i>	57
<i>Obr. 51 Závislost R_{sk} na velikost kontaktního zatížení W.</i>	57
<i>Obr. 52 Závislost R_q na zatížení: změřeno kolorimetrickou interferometrií [17].</i>	59
<i>Obr. 53 Závislost R_q na zatížení: změřeno PSI.</i>	59

9.2. Seznam tabulek

9.2.

<i>Tabulka 1 Přehled mechanických charakteristik materiálů.</i>	43
<i>Tabulka 2 Experimentálně zjištěné hodnoty výšky kalibrovaného prahu.</i>	51

10. SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1

Profily drsnosti.

Příloha č. 2

3-01-00-5O95/2011

K-3-01-00-5O95/2011

1-01-01-5O95/2011

3-01-02-5O95/2011

4-01-03-5O95/2011

3-01-04-5O95/2011

4-01-05-5O95/2011

4-01-06-5O95/2011

4-01-07-5O95/2011

4-01-08-5O95/2011

4-01-09-5O95/2011

4-01-10-5O95/2011