



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

KALIBRACE KOHERENČNÍHO RASTROVACÍHO INTERFEROMETRU TALYSURF CCI

CALIBRATION OF TALYSURF CCI COHERENCE SCANNING INTERFEROMETER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Anastasia Varava

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Matej Harčarík

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Studentka:	Ing. Anastasia Varava
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Kvalita, spolehlivost a bezpečnost
Vedoucí práce:	Ing. Matej Harčarik
Akademický rok:	2016/17

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

Kalibrace koherenčního rastrovacího interferometru Talysurf CCI

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je popisuje proces kalibrace optického přístroje pro hodnocení textury povrchu Taylor Hobson Talysurf CCI Lite a stanovení jeho nejistoty měření.

Cíle diplomové práce:

1. Popis přístroje Talysurf CCI Lite.
2. Popis procesu kalibrace přístroje.
3. Stanovení nejistoty měření vybraných parametrů textury povrchu.

Seznam doporučené literatury:

BUMBÁLEK, Bohumil, Vladimír ODVODY a Bohuslav OŠŤÁDAL. Drsnost povrchu. Praha: SNTL, 1989, 340 s. ISBN nepřiděleno.


RICHARD, Leach (ED.). Optical measurement of surface topography. Berlin: Springer, 2011. ISBN 9783642120114.

WHITEHOUSE, David. Handbook of surface and nanometrology. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. ISBN 9781420082012.

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

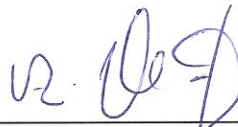
V Brně, dne 31. 10. 2016





doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.

ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.

děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá kalibrací koherenčního rastrovacího interferometru Talysurf CCI Lite. V práci byly rozebrány základní pojmy z oblasti hodnocení textury povrchu a také popsány parametry profilové a plošné metody hodnocení textury povrchu. Také byl popsán funkční princip a konstrukce použitého přístroje. Byly rozebrány existující postupy kalibrace dle výrobce vzhledem k definici pojmu *kalibrace* Mezinárodním metrologickým slovníkem. Dále byly představeny kalibrační kroky odpovídající pojmu *kalibrace* z hlediska stanovení nejistoty měření. V neposlední řadě byla stanovena nejistota měření plošných parametrů textury povrchu S_q a S_z . Popsané postupy a výsledky práce mohou přispět k rozšíření používání bezkontaktních optických přístrojů pro měření textury povrchu.

ABSTRACT

This master's thesis deals with calibration of a coherence scanning interferometer Talysurf CCI Lite. Basic terms related to surface texture evaluation were described along with selected profile and areal surface texture parameters. The working principle and design of the calibrated instrument were explained. Manufacturer's calibration procedure was analyzed in relation to the definition of *calibration* in the International vocabulary of metrology. Further calibration steps leading to calculation of measurement uncertainty were presented. Last but not least, measurement uncertainties of areal surface texture parameters S_q and S_z were evaluated. The procedures and results described in this thesis may contribute to wider use of non-contact surface texture measuring instruments.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kalibrace, koherenční rastrovací interferometr, textura povrchu, plošné parametry.

KEYWORDS

Calibration, coherence scanning interferometer, surface texture, areal parameters.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Varava, A., *Kalibrace koherenčního rastrovacího interferometru Talysurf CCI*, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2017, 87 s., Vedoucí diplomové práce Ing. Matej Harčarik.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji mému vedoucímu Ing. M. Harčaríkovi za jeho pomoc při tvorbě této práce a společnostem Mesing s.r.o. a Imeco TH s.r.o. za poskytnutí etalonů pro provedení kalibrací.

Anastasia Varava

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. M. Harčaríka a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne

.....
Anastasia Varava

OBSAH

ABSTRAKT	1
ABSTRACT	1
KLÍČOVÁ SLOVA	1
KEYWORDS	1
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE.....	1
PODĚKOVÁNÍ.....	3
ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ.....	5
ÚVOD 9	
1 ZÁKLADNÍ POJMY V OBLASTI TEXTURY POVRCHU.....	11
1.1 Textura povrchu	11
1.2 Profilová metoda hodnocení textury povrchu.....	11
1.2.1 Základní pojmy profilové metody	12
1.3 Plošná metoda pro hodnocení textury povrchu.....	15
1.3.1 Výškové plošné parametry	17
1.4 Srovnávání parametrů profilové a plošné metody	18
2 PŘÍSTROJ PRO MĚŘENÍ TEXTURY POVRCHU.....	19
2.1 Popis CSI - Koherenční rastrovací interferometrie.....	20
2.2 Konfigurace CSI	21
2.3 Koherenční korelační interferometrie CCI	23
2.4 Taylor Hobson Talysurf CCI Lite.....	23
2.4.1 Technické charakteristiky měřicího přístroje	24
2.4.2 Softwarové prostředí.....	24
2.4.3 Objektivy	25
2.4.4 Příprava měření.....	27
2.4.5 Normy vztahující se na přístroj Talysurf CCI Lite	27
2.4.6 Postup měření	28
2.4.7 Omezení CCI.....	28
3 PROCES KALIBRACE	31
3.1 Normy v oblasti kalibrace koherenčních rastrovacích interferometrů.....	31
3.2 Kalibrace dle výrobce a CSIR	31
3.2.1 Vybavení pro kalibraci v ose Z.....	31
3.2.2 Vybavení pro kalibraci v osách X a Y.....	31
3.2.3 Vybavení pro korekci základny Z.....	32
3.2.4 Postup kalibrace.....	33
3.3 Kalibrace podle NPL	34
3.3.1 Materiály.....	34
3.3.2 Metrologické charakteristiky	35
3.3.3 Kalibrační kroky	35
3.4 Kritický pohled na definované postupy kalibrace	38
4 ANALÝZA MĚŘENÍ.....	41
4.1 Šum	41
4.2 Rovinnost.....	45
4.3 Výpočet příspěvku měřicího šumu a rovinnosti k nejistotě měření.....	48

4.4	Kalibrace osy Z.....	49
4.4.1	Výpočet nejistoty.....	53
4.5	Kalibrace os X a Y	54
4.5.1	Výpočet nejistoty.....	57
4.6	Rozlišení.....	59
5	URČENÍ NEJISTOTY MĚŘENÍ VYBRANÝCH PARAMETRŮ TEXTURY POVRCHU	60
5.1	Výpočet celkové nejistoty pro parametr S_q	62
5.1.1	Rozšířená nejistota S_q	62
5.2	Výpočet celkové nejistoty pro parametr S_z	63
5.2.1	Rozšířená nejistota S_z	63
	ZÁVĚR 65	
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	68
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	71
	SEZNAM TABULEK	73
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	75
	SEZNAM PŘÍLOH.....	77
	A NAMĚŘENÉ HODNOTY MĚŘICÍHO ŠUMU.....	78
	B NAMĚŘENÉ ODCHYLKY ROVINNOSTI.....	80
	C NAMĚŘENÉ HODNOTY Z KALIBRACE OS XY.....	81

ÚVOD

Textura povrchu má rozhodující vliv na funkčnost strojních součástí. Odhaduje se, že textura povrchu způsobuje přibližně 10% poruch ve vyrobených dílech a vede ke zvýšení nákladů na nízkou kvalitu ve společnosti [16]. Proto je u součástí s funkčními povrchy mimořádně důležité správně definovat a kontrolovat texturu povrchu [10]. Existuje několik technik pro měření textury povrchu, které lze rozdělit zejména na dotykové a optické [13].

Na začátku a až do poloviny dvacátého století bylo vyvinuto několik různých druhů optických přístrojů pro měření textury povrchu a tvaru. Mezi ně patří například konvenční Michelsonovy a Twyman-Greenovy interferometry, Linnikovy interferometry nebo Tolanského mnohosvazkové interferometry. Tyto interferometry umožňovaly přesně měření výstupků a prohloubí textury povrchu s vysokým vertikálním rozlišením. Neumožňovaly však komplexní posouzení kontrolovaného povrchu. Proto se v praxi rozšířilo používání kontaktních profilových měřidel [16].

Situace se začala měnit v důsledku vývoje výkonných počítačů na konci dvacátého století. Ty umožnily optickým přístrojům překonat některá omezení kontaktních profilových přístrojů, zejména omezený prostorový rozsah snímání [16].

V poslední době se zvýšily mezinárodní snahy o normalizaci v oblasti plošného měření textury povrchu vytvořením řady norem ISO 25178, které mají mimo jiné obsahovat jmenovité charakteristiky a kalibrační metody pro optické přístroje. Takové přístroje poskytují trojrozměrné mapy (3D) povrchu ve formě $Z(X, Y)$ datových souborů, ze kterých lze aplikováním různých matematických operací se vypočítat plošné a profilové parametry textury povrchu [10].

Aby bylo možné tyto přístroje nasadit v průmyslové praxi, je nutné vyřešit otázku jejich metrologické návaznosti. Aktuálně proto ve světě probíhá vývoj kalibračních postupů a etalonů pro použití s optickými přístroji pro měření textury povrchu.

Táto diplomová práce se zabývá kalibrací měřicího přístroje Talysurf CCI Lite. Tento přístroj, který je založen na principu konvenční korelační interferometrie, je využívá v laboratoři praktické a experimentálně metrologie FSI VUT.

V první kapitole jsou popsány základní pojmy z oblasti hodnocení textury povrchu, včetně popisu profilové a plošné metody hodnocení textury povrchu.

Druhá kapitola obsahuje technickou charakteristiku přístroje Talysurf CCI Lite. Je v ní stručně popsán princip jeho fungování, jeho konstrukci a postupy jeho používání.

V kapitole třetí jsou rozebrány kalibrační kroky, které by měly odpovídat požadavkům normy, technickým parametrům přístroje a doporučením výrobce. Složitost tkví v tom, že norma ISO 25178-703, která je má stanovit je ještě v procesu vývoje. Proto jsou zde rozebrány kalibrační kroky dle výrobce, a také postup kalibrace dle anglického NPL.¹

Čtvrtá kapitola se zabývá konkrétním postupem a výsledky kalibrace přístroje Talysurf CCI Lite v laboratoři praktické a experimentálně metrologie FSI VUT. Zvolený postup vychází z těch popsanych v kapitole třetí s několika rozdíly vycházejícími z místních podmínek.

¹ NPL – National Physical Laboratory

V poslední, páté, kapitole je s pomocí dosažených výsledků kalibrace provedeno určení nejistoty měření zvoleného vzorku z fondu laboratoře praktické a experimentálně metrologie FSI VUT.

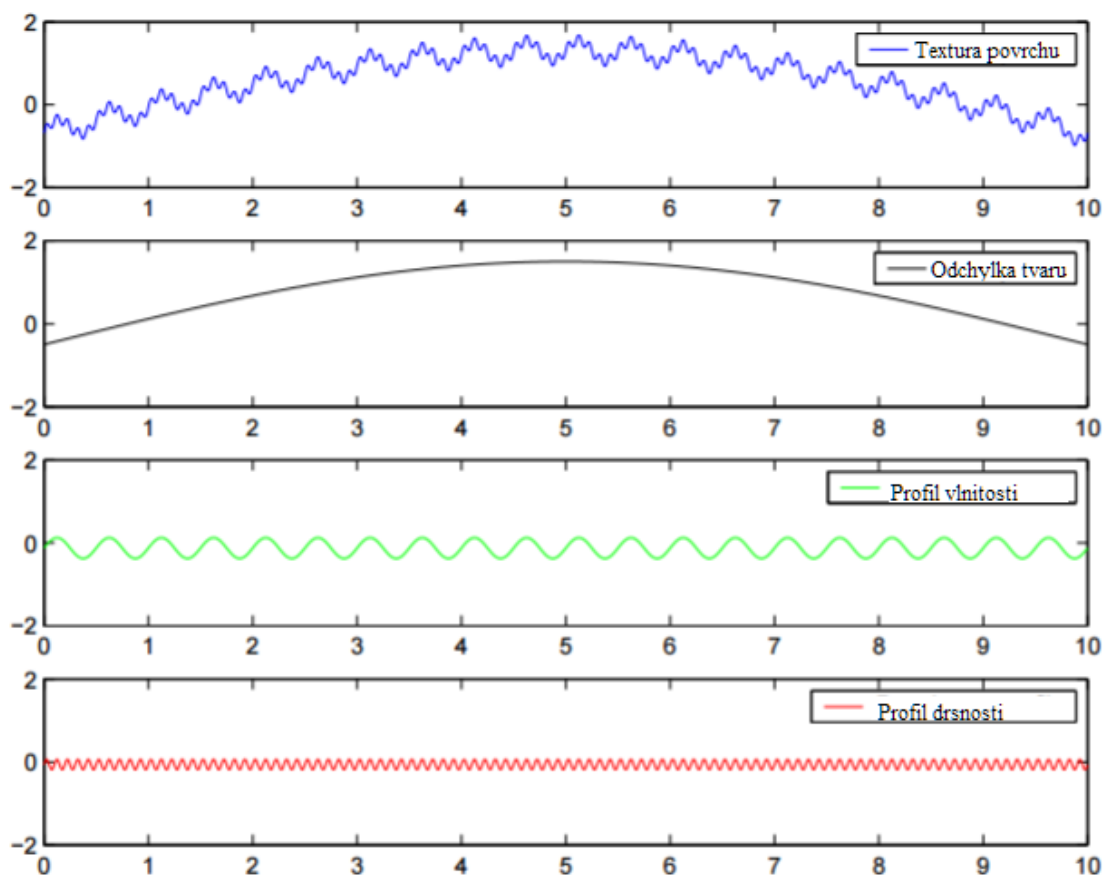
1 ZÁKLADNÍ POJMY V OBLASTI TEXTURY POVRCHU

1.1 Textura povrchu

České normy se vyskytuje nesoulad v překladu anglického pojmu *surface texture*. Normy, které byly vydané před rokem 2000, používají termín *struktura povrchu*, zatímco některé normy vydané později překládají daný pojem jako *textura povrchu*. V této práci je používán termín *textura povrchu* jako opakované nebo náhodné odchylky od geometrického povrchu, které tvoří třírozměrnou topografii povrchu [24].

1.2 Profilová metoda hodnocení textury povrchu

Existují tři hlavní složky měřeného profilu, které můžeme na povrchu rozlišit: drsnost, vlnitost a tvar. Tyto složky se typicky nevyskytují samostatně, ale společně tvoří 2D topografii povrchu. Obrázek 1.1 ukazuje, jak tyto složky složený dohromady tvoří výsledný profil. Obvykle jsou posuzovány odděleně [10, 4].



Obrázek 1.1 Složky textury povrchu [10]

Drsnost, vlnitost a odchylka tvaru jsou teoreticky definovány následovně:

- Drsnost jsou nerovnosti s kratší vlnovou délkou, které jsou inherentními důsledky výrobního procesu. Souvisí např. s geometrií obráběcího nástroje [4].
- Vlnitost tvoří nerovnosti s delší vlnovou délkou, které obvykle vznikají v důsledku nestability v procesu obrábění, například nerovnováhy brusného kotouče, vibrační stroje, atd. [4].
- Odchylka tvaru je obecný tvar povrchu již bez uvážení odchylek drsnosti a vlnitosti [4].

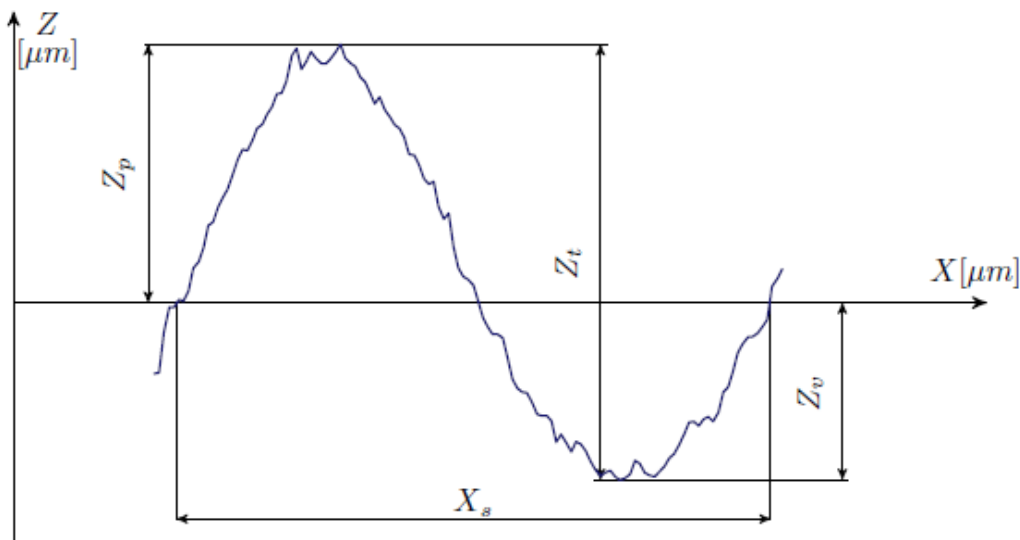
Tyto složky v praxi nelze od sebe jednoduše oddělit. K jejich praktickému posouzení je proto nutné toto dělení aproximovat filtrací. Jednotlivé složky jsou od sebe navzájem odděleny filtry profilu s odlišnými mezními vlnovými délkami *cut-off*. Filtry potlačují amplitudy vln určité vlnové délky a zároveň zachovávají ostatní [10].

Dle použité filtrace se definují tři druhy profilů. Základní profil vzniká odstraněním jmenovitého tvaru z naměřených dat. Z něj lze potlačením dlouhovlnných složek profilu získat profil drsnosti. Naopak potlačením krátkovlnných složek základního profilu vzniká profil vlnitosti [10].

1.2.1 Základní pojmy profilové metody

Profilové parametry textury povrchu definuje norma ISO 4287. Jejich použití je založeno na matematickém zpracování základního profilu, který vzniká snímáním skutečného povrchu zkoumané součásti a pak úpravou naměřených dat [11, 22].

Při protnutí povrchu zkoumané součásti s myšlenou rovinou XZ vzniká profil, který je představován křivkou znázorněnou na Obr. 1.2. [11].



Obrázek 1.2 Prvek profilu [11]

Profilové filtry rozdělují profil na dlouhovlnné a krátkovlnné složky. Přístroje pro měření základního profilu, vlnitosti a drsnosti používají tři filtry se stejnými přenosovými charakteristikami, ale s rozdílnými hodnotami mezní vlnové délky *cut-off*. Filtr λ_s definuje

hranici mezi drsnostmi a kratšími složkami vln z daného povrchu. Druhý filtr λ_c odpovídá za definování hranice mezi složkami, kterými jsou profil drsnosti a vlnitosti. Třetí filtr λ_f je používán pro definování rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln přítomnými na daném povrchu [11].

Obvykle tato metoda využívá pravoúhlý souřadnicový systém. Osy v takovém systému tvoří pravotočivou kartézskou soustavu. Osa X leží ve směru snímání a je paralelní se střední čarou, osa Y se nachází na skutečném povrchu vymežujícím těleso a oddělujícím ho od okolního prostředí a osa Z směřuje z materiálu do okolního prostředí [11].

Základní délka je délka ve směru osy X použitá pro rozpoznání nerovnosti vyhodnocovaného profilu. Používáním konkrétních filtrů se určuje typ vyhodnocovaného profilu. Ze základního profilu se vypočítávají P-parametry, R-parametry jsou odvozené z profilu drsnosti a W-parametry se vypočítávají z profilu vlnitosti [11].

Prvek profilu je část profilu od bodu, ve kterém překračuje střední čáru až k bodu, ve kterém bude dále procházet střední čarou ve stejném směru (například zespodu nad středovou čarou) [15].

Výstupek profilu je část profilového prvku, která je nad střední čarou, tj. profil, odkud překračuje střední čáru v kladném směru, dokud nepřesáhne střední čáru v záporném směru [15].

Prohlubeň profilu je co se týče profilu výstupku, ale se zvrátěného směru [15].

Postup pro posuzování profilových parametrů textury povrchu

Pravidla a postupy pro posuzování parametrů získaných používáním profilové metody stanovuje norma ČSN ISO 4288 [30].

Rři měření profilových parametrů je nutné se vyhnout nedokonalostem povrchu, například rýhám, škrábancům a prasklinám podle klasifikace v normě ISO ČSN 8785 [11], [24].

Z dat naměřených na jedné základní délce se vypočítá odhad hodnot parametrů a určením aritmetického průměru hodnot ze všech jednotlivých základních délek se dostane k odhadu průměrných hodnot parametrů [24].

Norma ČSN ISO 4288 stanovuje dva postupy pro porovnávání výsledných hodnot parametrů s tolerančními mezemi:

Pravidlo 16 % říká, že pokud překročí hodnotu horní meze uvedenou v dokumentaci méně než 16 % všech měřených hodnot, které byly určeny na vyhodnocované délce, bude povrch považován za přijatelný. Pro parametry s dolní toleranční mezí platí, že pokud je méně než 16 % všech výsledných hodnot menších než hodnota stanovená ve výrobní dokumentaci, tyto povrchy budou považované za přijatelné [24].

Nevýhodami tohoto pravidla jsou silná závislost na předpokladu normálního rozdělení naměřených hodnot parametrů a neurčitá povolená míra překročení specifikace [24, 11].

Pravidlo maxima popisuje, že toleranční meze stanovené ve výkresech nebo výrobní dokumentaci nesmí být překročené na celém kontrolovaném povrchu. Pravidlo maxima zajišťuje přesnější a jednoduchou interpretaci výsledků [24, 11].

Postup pro stanovení nejistoty měření a srovnávání naměřených hodnot se specifikovanými mezními hodnotami je definován normou ISO 14253-1 [24].

Výškové parametry profilu

Výškové parametry patří mezi parametry profilu, které mohou být popsány pomocí různých druhů funkcí. V podstatě vyjadřují různé statistické ukazatele délky, výšky apod. [20].

Existují dvě základní skupiny výškových parametrů. První charakterizuje profil přímým měřením výšek výstupků a druhá profil popisuje pomocí složitějšího zpracování dat, např. průměrování. Přímé měření výšek výstupků je jednodušší, no jeho výsledky mají divergentní tendenci. Čím větší je délka profilu nebo posuzovaná délka, tím větší bývá výsledná hodnota. To neplatí pro průměry, hodnoty průměrujících parametrů obvykle pro daný povrch konvergují ke stabilní hodnotě [20].

Je potřeba si uvědomit, že není nutné používat všechny parametry. Pro danou aplikaci je nutné zvolit nejvhodnější parametry [15].

Nejznámější a dnes nejčastěji používaný parametr drsnosti je R_a , průměrná aritmetická odchylka profilu drsnosti [20]. Je to průměrná hodnota absolutních hodnot souřadnic $Z(X)$ v základní délce. Vzorec pro výpočet R_a lze zapsat pomocí rovnice (1) [15]

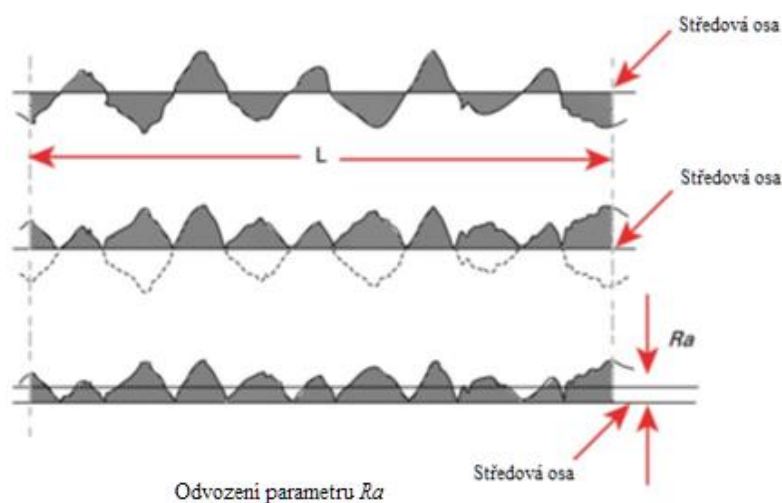
$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |z(x)| dx \quad (1)$$

Výše uvedená rovnice je pro spojitou funkci $Z(X)$. Nicméně, při měření textury jsou data $Z(X)$ stanovena diskretním počtem měřících bodů. V tomto případě by měla R_a být zapsána [15]

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |z_i| \quad (2)$$

kde N je počet měřených bodů v základní délce [15].

Odvození parametru R_a může být znázorněno graficky, jak je znázorněno na obrázku 1.3. Oblasti grafu pod středovou osou uvnitř základní délky jsou překlopeny nad středovou osou. Hodnota R_a je průměrná výška výsledného profilu [15].

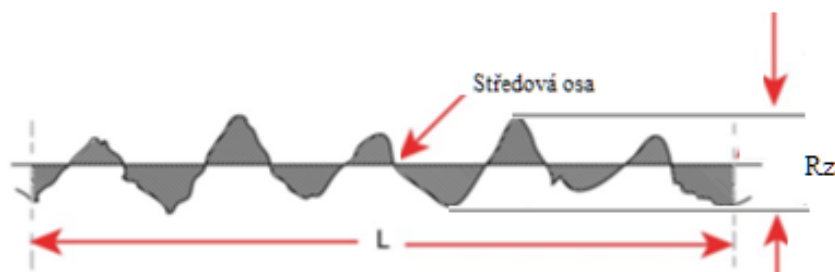


Obrázek 1.3 Odvození aritmetického průměru odchylky [15]

Účinek jednoho netypického výstupku nebo prohlubně na hodnotu parametru Ra je jen nepatrný. Je vhodné, aby Ra byla posouzena na řadě po sobě následujících základních délek, a aby byl určen průměr získaných hodnot. Je důležité, aby měření probíhalo kolmo k nerovnostem povrchu [15].

Ra na povrchu může značně se lišit bez ovlivnění výkonnosti povrchu. Hodnota Ra neposkytuje žádnou informaci o tvaru nepravidelností na povrchu. Je možné získat podobné hodnoty Ra pro povrchy, které mají velmi odlišné profily, a proto je užitečné uvádět obráběcí proces používaný k výrobě povrchu. Z historických důvodů, Ra je pravděpodobně nejčastější ze všech parametrů textury povrchu. To by však nemělo odradit uživatele od volby dalších parametry, které mohou poskytnout více informací o funkčnosti povrchu [20, 17].

Největší výška profilu Rz (Obr. 1.4) je průměrná hodnota výšek mezi nejvyšším výstupkem a nejhlubší prohlubní jednotlivých základních délek profilu. Důvodem pro přijetí průměrné hodnoty výstupků je minimalizace účinku nereprezentativních výstupků a prohlubní, které mohou poskytnout zavádějící hodnotu, když se posuzují jednotlivě [20, 17].



Obrázek 1.4 Největší výška profilu (profil drsnosti) [20]

1.3 Plošná metoda pro hodnocení textury povrchu

Profilová metoda vytváří a hodnotí dvourozměrný profil nepravidelností povrchu a popisuje ho jako naměřená data nebo v matematické formě jako funkci $Z(X)$. V praxi se ukázalo, že dvourozměrné posuzování povrchů je často nedostatečné. Z toho důvodu vznikly další metody hodnocení povrchu využívající 3D prostor [27].

Metoda topografie povrchu a metoda integrování plochy jsou metody určené k posouzení povrchové textury prostřednictvím snímání plochy z povrchu namísto jednotlivých profilů [27].

Metoda topografie plochy vytváří topografické zobrazení povrchu, které lze matematicky vyjádřit jako funkci $Z(X,Y)$, se dvěma nezávislými proměnnými (X,Y). Různé typy měření touto metodou 3D model povrchu vytváří pomocí skládání sousedících rovnoběžných profilů nebo přímo měřením ve třech osách [27].

Výstupem metody integrování plochy jsou přímo číselné výsledky, které odráží vybrané vlastnosti povrchu jako celku. Táto metoda nemůže být používána pro získání údajů topografie $Z(X,Y)$. Jako nástroj hodnocení kvality vychází ze srovnávání měřených povrchů s kalibrovanými vzorky drsnosti nebo kalibrovanými zkušebními vzorky vyrobenými obdobným výrobním procesem [27].

Podobně jako při profilové metodě se i při plošné metodě hodnocení povrchu využívá filtrace naměřeného souboru datových bodů na základním povrchu. Základní povrch se skládá z jmenovitého tvaru a samotné textury povrchu.

Definují se dva druhy posuzovaných povrchů: S-F povrch a S-L povrch [28].

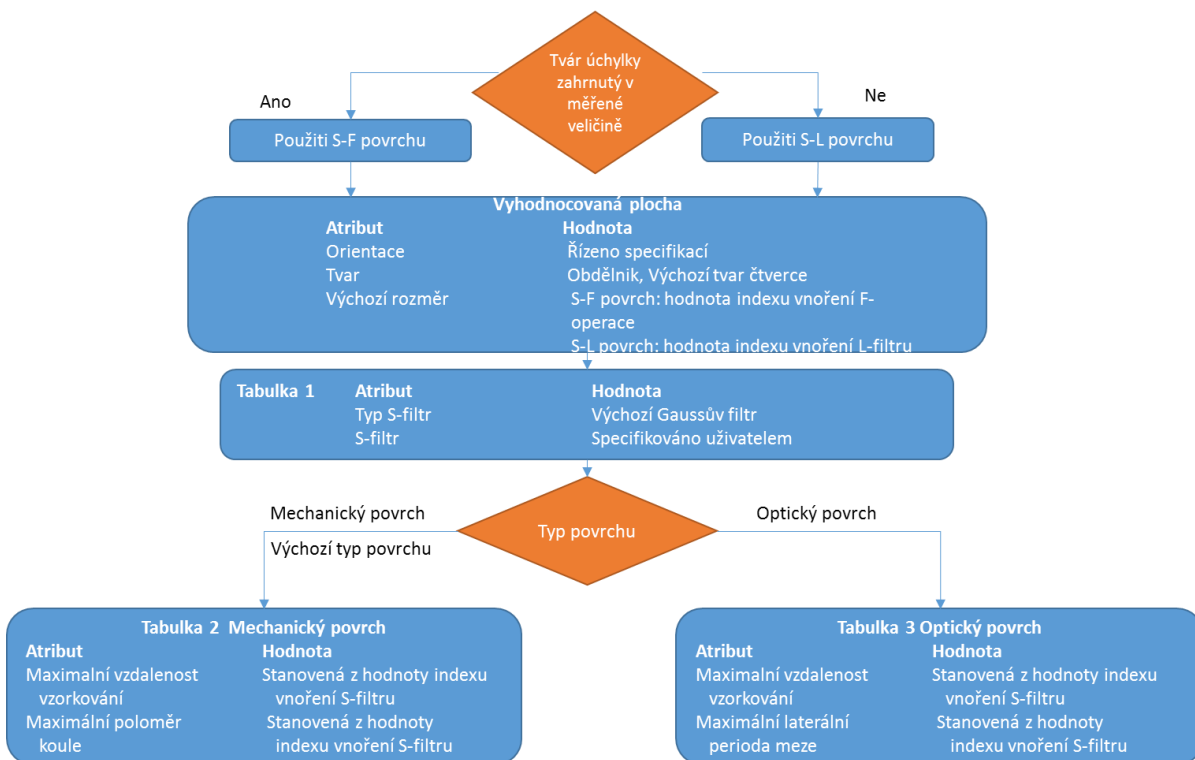
S-F povrch vzniká po snížení šumu pomocí S-filtru a odstranění jmenovitého tvaru povrchu použitím F-operace. Je plošným ekvivalentem základního profilu [11, 28].

S-filtr je plošný Gaussův filtr, který potlačuje malé stranové složky povrchu, obvykle šum. Je plošným ekvivalentem filtru λ_s [11, 28]. Hodnota cut-off ve směru osy X může být vybraná z řady 0,0005mm, 0,0008mm, 0,001mm, 0,002mm, 0,0025mm, 0,005mm, 0,008mm, 0,01mm, atd. [28].

F-operace je operace odstranění jmenovitého tvaru ze základního povrchu pomocí metody nejmenších čtverců. Je nutnou podmínkou pro použití L-filtru [11, 28].

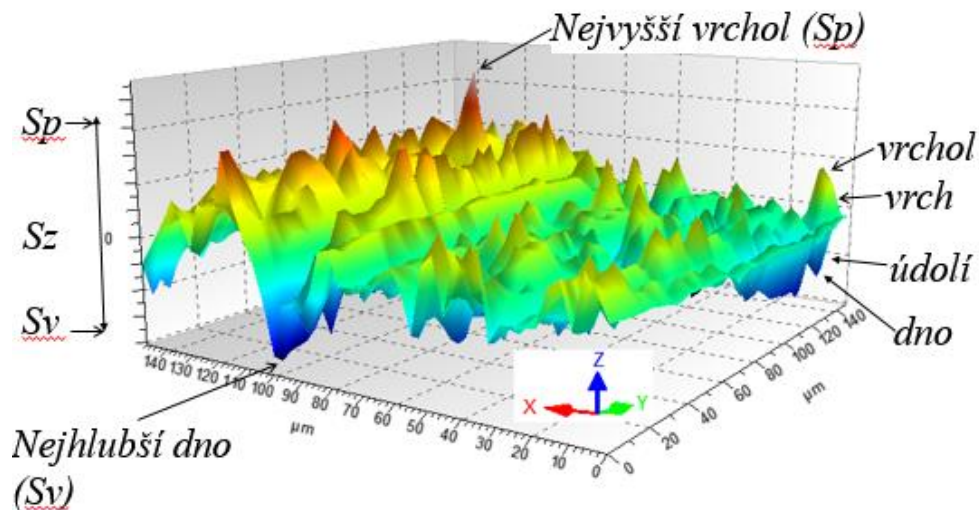
L-filtr slouží k potlačení značných stranových složek S-F povrchu anebo základního povrchu. Jeho použití vede k vytvoření S-L povrchu [11].

Strom rozhodování pro zpracování různých typů povrchu a různé druhy filtrace je zobrazen na Obr. 1.5 [28].



Obrázek 1.5 Strom volby typu filtru dle [28]

V této práci je použita jedna z metod topografického měření povrchu, koherenční rastrovací interferometrie. Tato metoda je široce používána pro trojrozměrné zobrazení povrchů různých materiálů. Na posuzované ploše může být rozpoznané topografické prvky, které jsou zobrazeny na obrázku 1.6.



Obrázek 1.6 Obraz topografie získaný metodou topografie povrchu [12]

Vrchol je bod, který je vyšší ostatních bodů na povrchu. Oblast, která je kolem vrcholku se jmenuje vrch. Nejnižším bodem v okolí je dno, oblast okolo dna je údolí [11, 27].

1.3.1 Výškové plošné parametry

Výškové parametry dávají informace o plošných výškových odchylkách topografie povrchu. Existuje sedm základních parametrů [19], ale v práci jsou využity pouze tři.

Průměrná kvadratická výška posuzované plochy, S_q je definována jako průměrná kvadratická hodnota odchylky povrchu $Z(X, Y)$ [19]:

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A Z^2(X, Y) dXdY} \quad (3)$$

kde A je obsah posuzované plochy XY [19].

Rovnice (3) je určena pro spojitou funkci $Z(X, Y)$. Nicméně, při měření topografie povrchu pomocí CSI se hodnoty $Z(X, Y)$ stanovují po diskrétní počet měřicích bodů. V tomto případě se rovnice (3) převede do tvaru [19]

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{N} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M Z_{ij}^2} \quad (4)$$

kde N je počet bodů ve směru X , a M je počet bodů ve směru Y . Parametr S_q se nejčastěji používá k charakterizaci optických povrchů [19].

Průměrná aritmetická výška posuzované plochy S_a je aritmetický průměr absolutních hodnot výšky posuzované plochy. Vypočítá se dle vztahu [19]

$$S_a = \frac{1}{A} \int_A |Z(X, Y)| \quad (5)$$

Parametr S_a je nejbližší příbuzný parametru R_a . Jejich hodnoty se však obvykle pro daný povrch zásadně liší a neměly by být přímo srovnávány. Výškové S -parametry používají plošné filtry (viz dále), zatímco R -parametry používají profilové filtry [19].

Maximální výška posuzované plochy S_z je definována jako součet výšky nejvyššího vrcholu a hloubky nejhlubšího dna posuzované plochy [19].

Parametr S_z v souhrnu s parametry S_P (maximální výškou výstupku posuzované plochy) S_V (maximální hloubkou dna posuzované plochy) dává informace o rozsahu výšek posuzovaného povrchu. Mohou být užitečné samostatně, ale také mohou být použité ve spojení s jinými parametry pro komplexnější popis topografie povrchu [19].

1.4 Srovnávání parametrů profilové a plošné metody

Omezení profilového (2D) měření a charakterizace vedlo k vývoji plošného (3D) měření. Trojrozměrné techniky poskytují lepší porozumění povrchu v jeho funkčním stavu. Existují určitá přirozená omezení 2D povrchové měření a charakterizaci. Zásadním problémem je to, že 2D profil nemusí nutně popisovat funkční aspekty povrchu. Příkladem toho je například nepoužívanější parametr pro 2D charakterizaci povrchu, R_a [19].

Při charakterizaci měřeného profilu je často obtížné určit přesný charakter topografie povrchu. Příkladem tohoto je profilový parametr R_z , který má analogie v plošné metodě je S_z . Hodnoty parametru S_z na daném povrchu bývají výrazně vyšší, než hodnoty parametru R_z . Měření 2D profilu totiž poskytuje pouze řez povrchem a je nepravděpodobné, že takový řez projde nejvyšším nebo nejnižším bodem povrchu. Při měření povrchu ve 3D je mnohem větší šance, že budou extrémní body zachycené [19].

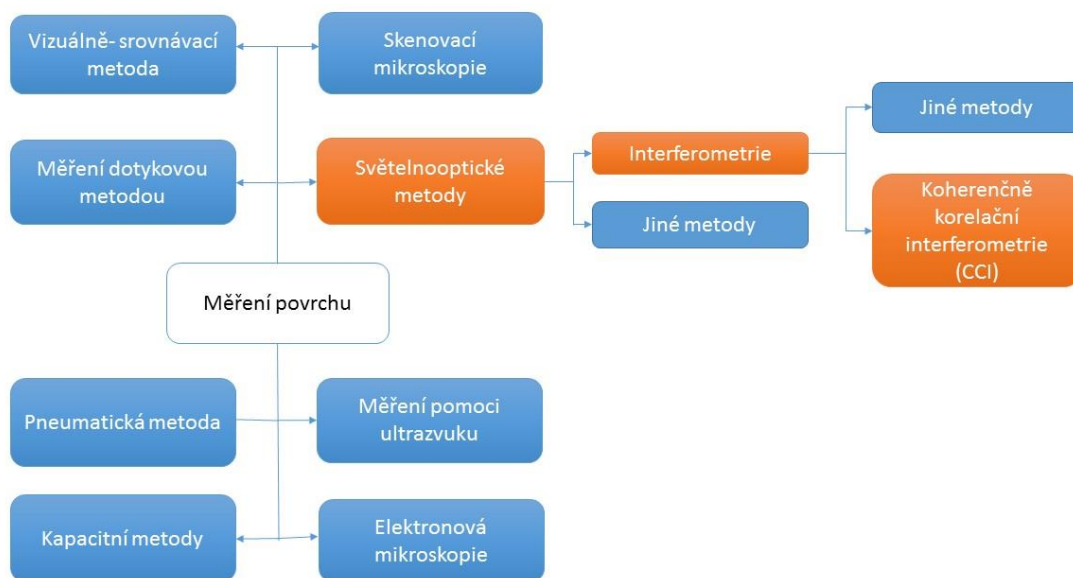
V neposlední řadě použité plošné filtry pracují jinak, než profilové filtry. V důsledku působení plošných filtrů v osách X i Y nelze přímo srovnávat filtrované profily získané z 3D modelu s profily drsnosti nebo vlnitosti získanými profilovým měřením [11].

2 PŘÍSTROJ PRO MĚŘENÍ TEXTURY POVRCHU

Nejstarší způsoby posouzení textury povrchu využívaly palec, nehet a oko. Tyto jsou velmi účinné, ale zcela subjektivní. Požadavky kvantitativních výsledků vedly k vývoji dvou paralelních větví přístrojové techniky: jedné po kontaktní měření napodobující nehet, druhé bezkontaktní napodobující oko [20]. Přehled různých druhů metod pro měření textury povrchu popisuje obrázek 2.1.

Bezkontaktní metody využívají k měření topografie různé optické jevy. Dotykový způsob v podstatě používá hmatadlo, dvě ramena, z nichž dotýká referenčního povrchu a povrch testovaného materiálu [20].

Všechny optické metody zahrnují promítání světla na povrch. Někdy světlo je zaostřeno, ale často to není. Kromě toho světlo může být použito koherentně nebo nesouvislé režimu a nakonec lze využít polarizačních vlastností. Některé optické metody pouze napodobují oko a poskytují jen 2D obraz povrchu. Modernější metody navíc poskytují i údaje o výšce, připomínající profily produkované dotykovým přístrojem. To dává optickým metodám více možností [20].



Obrázek 2.1 Metody měření textury povrchu (dle [20])

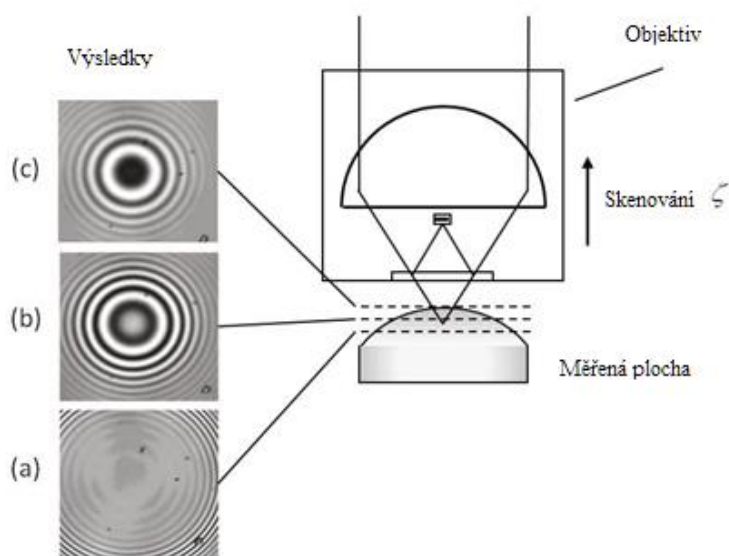
Interferometr je založen na využití interference světla. Při ní se amplitudy dvou nebo více vln navzájem skládají. V nejjednodušším případě, když jsou dvě stejné vlny ve fázi, sčítá se jejich amplituda na dvojnásobek. Když jsou takové dvě vlny mimo fázi o 180° , výsledná vlna má nulovou amplitudu. Toto je známo jako superpozice vln. Výsledky se projeví v souboru tmavých a světlých pásů při pohledu na obrazovku nebo pod mikroskopem, které nazýváme interferenční proužky [9].

Interferometrie je široká oblast metrologie zahrnující různé měřicí přístroje. Ty používají monochromatické zdroje nebo zdroje bílého světla. Tyto světelné zdroje mohou mít

odlišné charakteristiky, které určují aspekty konstrukce optických interferometrů. Tyto charakteristiky zahrnují časovou koherenci, prostorovou koherenci, vlnovou délku a rozpor [19].

2.1 Popis CSI - Koherenční rastrovací interferometrie

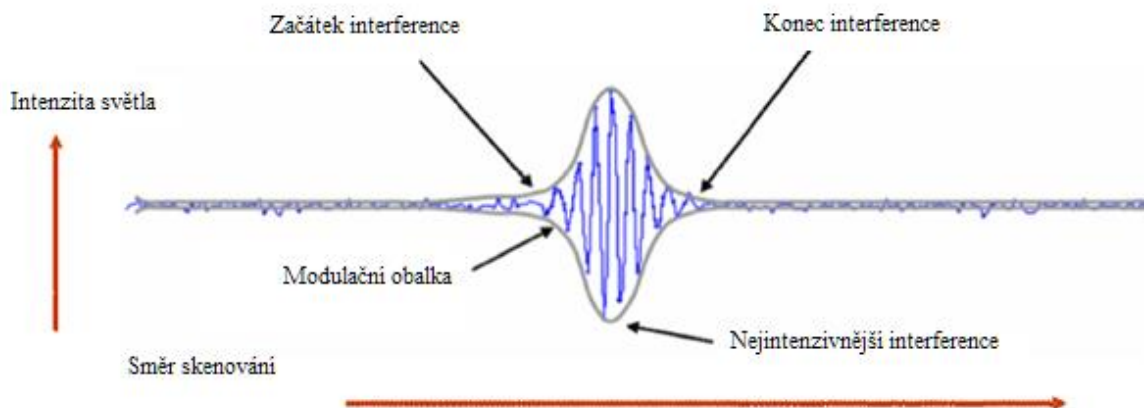
Koherenční rastrovací interferometrie (CSI) vyhodnocuje změny v intenzitě interferenčního signálu v souvislosti s optickou koherencí. Zjednodušeně lze říct, že tato metoda přiřazuje výškové souřadnice dle poloh, ve kterých je efekt interference nejsilnější. Interferenční proužky jsou pouze silně pozorované v úzkém rozmezí výšky snímané plochy [5, 19].



Obrázek 2.2 Obrazy interferenčních proužků na zakřivené ploše y s nízkou koherence osvětlení [5]

Obrázek 2.2 ukazuje, jak se vzhled interferenčních proužků mění v závislosti na poloze objektivu během snímání podél optické osy přístroje. Vizuální výklad vede k závěru, že vnější okraj vzorku musí být nižší než prostředek, jak je zřejmé ze snímací polohy ζ , při které je na okraji méně vysoce kontrastních proužků než ve středu. Ačkoli moderní přístroje využívají pro extrakci dat povrchu celou řadu konfigurací a metod zpracování, sledování změn interferenčních proužků v závislosti na výšce zůstává společnou charakteristikou všech přístrojů CSI [5].

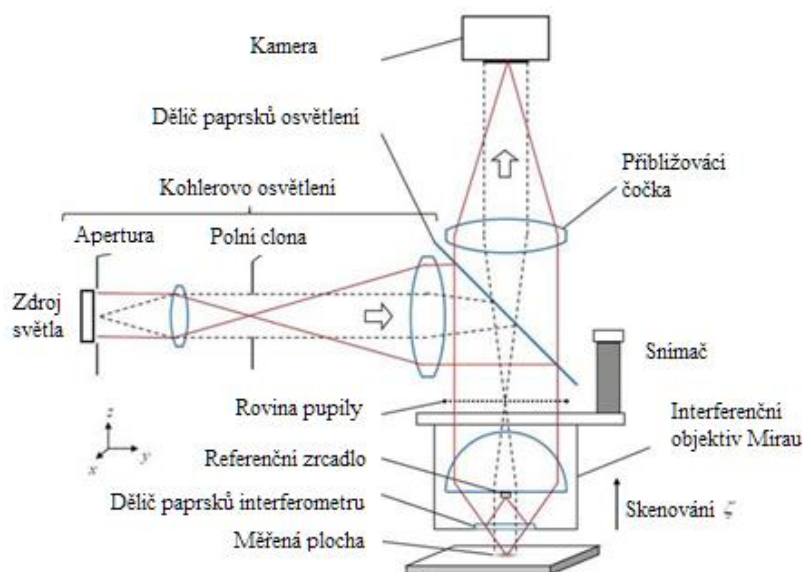
V praxi jsou CSI přístroje automatizované systémy, které vytváří elektronické data, která poskytují signál pro každý pixel obrazu jako funkci snímání polohy. Výsledné signály mají obecně tvar dle Obr. 2.3. Ten ukazuje signál a jeho modulační obálku s polohou maximální hodnoty. Tím je koncepčně označeno bezkontaktní optické měření výšky povrchu [5].



Obrázek 2.3 CSI signál pro jeden pixel ukazuje modulační obálku [5]

2.2 Konfigurace CSI

Obrázek 2.4 ilustruje obecný CSI přístroj. Jemný posuv zajišťuje hladký, kontinuální sken interferenčního objektivu ve směru osy Z v rozsahu výšky měřeného povrchu. Při snímání počítač zpracovává údaje o intenzitě světla pro každý bod nebo pixel postupně jdoucích snímků z CCD snímače [5].



Obrázek 2.4 Geometrie interference v CSI [5]

Světelné zdroje pro CSI jsou nekoherentní, se spojitém spektrem, větším prostorovým rozsahem, nebo obojí. Klasickým příkladem je žárovka, jako například je wolfram-halogenová žárovka. V současné době nejběžnějším zdrojem je bílá LED. Osvětlovací optika Köhler znázorněna na Obr.2.4, zobrazuje světelný zdroj přes zornice na interferenční objektiv. Apertura reguluje numerickou aperturou osvětlení, zatímco polní clona nastavuje osvětlený povrch plochy snímaného předmětu [5].

Nejčastěji osvětlení zaplňuje rovinu pupily, aby se minimalizovala prostorová koherence a maximalizovalo se laterální rozlišení [19].

CSI přístroje se pro měření povrchu ukládají na anti-vibračním stole, který tlumí účinky vibrací z okolního prostředí [19].

K výhodám CSI patří ekvivalent automatického zaostřování na kterémkoliv místě v zorném poli a potlačení interferenci z rozptýleného světla, hrubé testování povrchu a měření s vysokou přesností. V současné době jsou většina interferenčních mikroskopů pro vyhodnocení plošného topografií povrchů fungují na principu CSI [5].

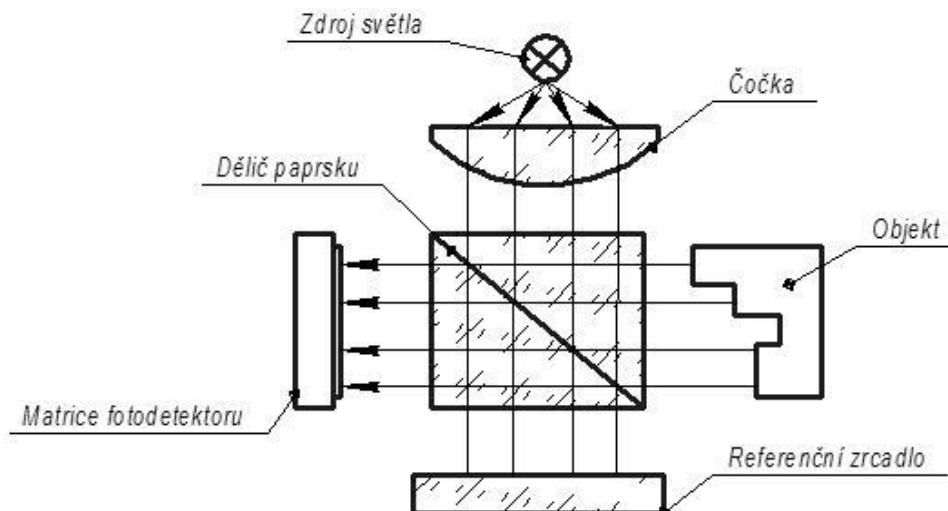
Technologie, které používají stejný základní funkční princip jako CSI, se vyskytují pod různými názvy. Tab. 2.1 níže uvádí jen podmnožinou pojmů, které se objevily v technické, patentní nebo obchodní literatuře, které se všechny vztahují k jednomu typu CSI. Tyto pojmy slouží k označení specifických metod zpracování dat a odlišení komerčních nabídek produktů [5].

Tabulka 2.1 Souhrn uznávaných pojmů pro CSI [29]

Zkratka	Termín
CPM	Koherenční mikroskopie sondy (Coherence probe microscope)
CSM	Koherenční skenovací mikroskopie (Coherence scanning microscope)
CR	Koherenční radar (Coherence radar)
CCI	Koherenční korelační interferometrie (Coherence correlation interferometry)
HSI	Interferometrie s vysokým skenováním (Height scanning interferometer)
MCM	Mirau korelační mikroskopie (Mirau correlation microscope)
RSP	Profil drsného povrchu (Rough surface profiler)
RST	Tester drsného povrchu (Rough surface tester)
SWLI	Skenování bílým světlem interferometrie (Scanning white light interferometry)
VSI	Interferometrie s vertikálním skenováním (Vertical scanning interferometry)
EVSI	Rozšířené VSI (Enhanced VSI)
HDVSI	Vysoké-definovaná interferometrie s vertikálním skenováním (High-definition VSI)
WLI	Interferometrie bílým světlem (White light interferometry)
WLSI	Interferometrie skenování bílým světlem (White light scanning interferometry)
WLPSI	Interferometrie s fází posunu bílého světla (White light phase shifting interferometry)

2.3 Koherenční korelační interferometrie CCI

Metoda CCI (Coherence Correlation Interferometry) je založena na analýze dvou protínajících se nízké koherentních světelných paprsků. Měřicí paprsek se odráží od objektu t , zatímco referenční paprsek se odráží od referenčního zrcadla. Hlavní myšlenka této metody je znázorněna na obrázku 2.5. Vysoce kontrastní interferenční obrazec vzniká v případě, že je délka optické dráhy měřicího paprsku rovna délce optické dráhy referenčního paprsku. Během pohybu objektu je zaznamenáván průběh intenzity světla v každém bodě snímače [13].



Obrázek 2.5 Princip koherence korelační interferometrie dle [13]

2.4 Taylor Hobson Talysurf CCI Lite

Talysurf CCI Lite je přístroj pro bezkontaktní měření textury povrchu založený na principu CCI. Umožňuje měření různých druhů povrchů, které mohou být leštěné nebo hrubé, zakřivené, ploché, stupňovité, atd. Lze měřit materiály s odrazivostí 0,3% až 100%, tedy mnohá skla, kovy, polymery a plasty [31].

Měřicí přístroj dostupný v laboratoři praktické a experimentálně metrologie FSI VUT je na Obrázku 2.6.



Obrázek 2.6 Taylor Hobson Talysurf CCI Lite

2.4.1 Technické charakteristiky měřicího přístroje

Měřicí přístroj Taylor Hobson Talysurf CCI Lite poskytuje zorné pole s počtem měřených bodů 1024×1024 pixelů a maximální plochou měření (X, Y) 6,6mm (>75 mm s X, Y sešíváním). Šumové pozadí v osy Z je udáváno jako méně než 0,08 nm [0,8 Å] [31].

Přístroj je uložen na protivibrační základně se vzduchovým polštářem. Tlak vzduchového polštáře jsou 2 bary pro 4 oporné nohy. Naklápěcí stůl a vertikální sloup (nebo most) jsou namontovány na základně. Naklápěcí stůl umožňuje několik stupňů náklonu ve dvou kolmých osách (typicky os X a Y). Vodorovné osy namontované na naklápěcí stůl poskytují několik desítek milimetrů rozsahu pohybu ve dvou kolmých směrech [5, 19].

2.4.2 Softwarové prostředí

TalyMap je software pro analýzu naměřených dat. Umožňuje různé způsoby zpracování naměřených dat a vyhodnocování profilových i plošných parametrů dle příslušných norem [18].

Nástroje v softwaru TalyMap se člení na tři typy. První jsou nástroje pro manipulaci s daty. Naměřené údaje lze ořezávat, vyrovnávat, odstraňovat z nich tvar, interpolovat případné nenaměřené body, atd. [30].

Druhý typ nástrojů jsou nástroje pro analýzu dat. Ty zahrnují výpočty plošných a profilových parametrů, odečítání povrchů a výpočet materiálových křivek ve 2D a 3D [30].

Vizualizace dat ve 3D představuje třetí typ zpracování pomocí systému TalyMap [30].

Existují TalyMap moduly, které jsou zaměřené na jednotlivé aplikace a odvětví. Aplikační verze TalyMap patří zejména k analýze textury povrchu, analýze výšky stupně, charakterizaci opotřebení a analýze rovinnosti [30].

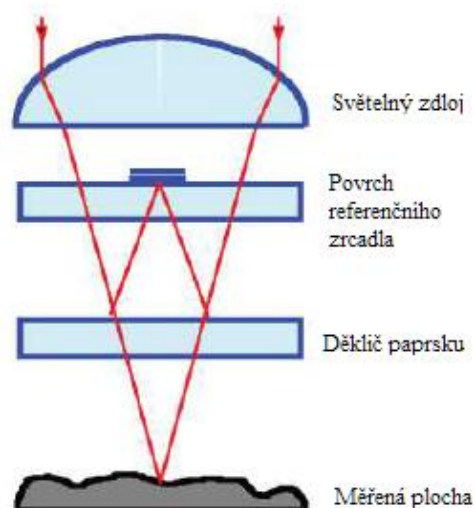
Pro funkce zpracování dat, které neumožňoval TalyMap, byl použit software Gwyddion. Je modulární program původně určen pro vizualizaci a analýzu dat získaných mikroskopy se skenovací sondou (SPM). Ten podporuje i datové formáty topografie získané opticky. Může se také použít pro všeobecná výšková pole a zpracování obrazu ve stupních šedi, například pro analýzu profilometrických dat nebo mapy tloušťky ze zobrazovací spektrofotometrie [32].

Gwyddion umožňuje použití velkého množství funkcí pro zpracování dat, včetně běžných statistických parametrů, funkcí vyrovnávání a korekce dat, funkcí filtrování nebo označování zrna, které byly použity v této práci. Také obsahuje řadu specifických a experimentálních metod zpracování dat. V této práci byly použity funkce filtrování, vyrovnání, funkce thresholding (omezení rozsahu dat). Schopnosti zpracování dat závisí na schopnostech načtených modulů. Software také umožňuje napsání vlastního programu pro čtení, zpracování a zobrazení dat [32].

Gwyddion je částečně vyvíjen v Brně a je podporován Oddělením nanometrologie Českého Metrologického Institutu [32].

2.4.3 Objektivy

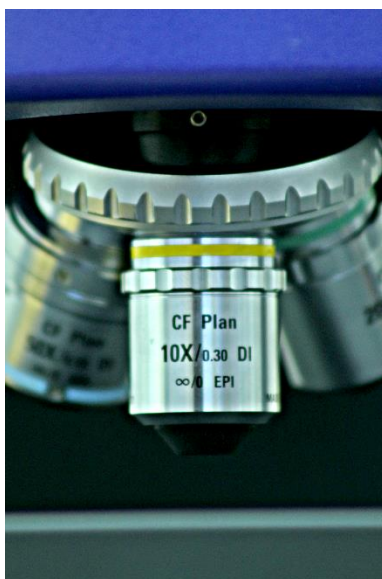
K dispozici jsou různé objektivy, které mohou být instalované současně na otočné hlavici. Od volby objektivu závisí zorné pole, které stanovuje plochu, kterou měříme a optické rozlišení, tedy schopnost rozlišit prvky topografie v osách X a Y [31].



Obrázek 2.7 Princip objektivu Mirau dle [31]

K dispozici jsou dvě cesty ze světelného zdroje k detektoru (Obr.2.7). Jeden paprsek se odráží od horní plochy děliče paprsku, cestuje k povrchu referenčního zrcadla a odráží se zpět. Znovu se odráží od děliče paprsku do mikroskopu a dále k detektoru. Druhý paprsek cestuje přes dělič paprsku k měřenému povrchu, odráží se zpět k objektivu mikroskopu a na detektor [31].

Objektiv se zvětšením 10× (Obr. 2.8)



Obrázek 2.8 Objektiv 10×

Plocha vzorku, která může být měřená objektivem s 10× zvětšením je $1,65 \times 1,65$ mm. Optické rozlišení, při kterém je schopnost rozlišit přilehle výstupky je $1,02\mu\text{m}$, prostorový interval vzorkování je $1,65\mu\text{m}$. Maximální sklon odrazu, omezeny numerickou aperturou, je 14° . Pracovní vzdálenost objektivu je 7,4mm, a jeho numerická apertura, která vyjadřuje uhlovou aperturu objektivu, je 0,3 [31].

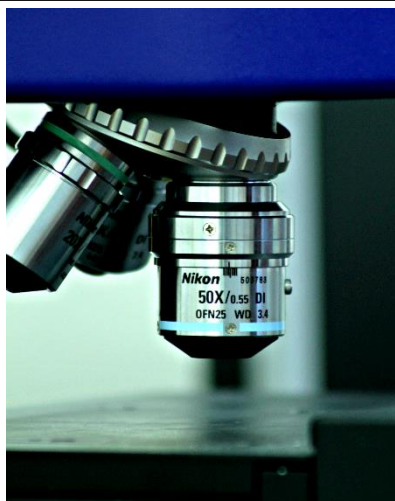
Objektiv se zvětšením 20× (Obr. 2.9)



Obrázek 2.9 Objektiv 20×

Objektiv se zvětšením 20× má optické rozlišení $0,76\mu\text{m}$ s měřenou plochou $0,825 \times 0,825$ mm. Vzorkovací rozlišení je $0,83\mu\text{m}$ a maximální sklon odrazu je 19° při pracovní vzdálenosti mezi vzorkem a objektivem 4,7 mm. Numerická apertura je 0,4 [31].

Objektiv se zvětšením 50× (Obr. 2.10)



Obrázek 2.10 Objektiv 50×

Rozteč měřených bodů objektivu se zvětšením 50× je 0,33 μm s měřenou plochou 0,33 × 0,33mm. Optické rozlišení je nejpřesnější, 0,4 až 0,6μm dle podmínek. Maximální sklon odrazu, omezen numerickou aperturou, je 27,7°. Pracovní vzdálenost, vzdálenost mezi vzorkem a objektivem, je 3,4mm při numerické apertuře 0,55 [31].

2.4.4 Příprava měření

Postup pro přípravu vzorků obvykle zahrnuje vizuální kontrolu vzorku, čištění vzorku, přetírání povrchu (jestliže je to nutné), upínání vzorku a jeho polohování [13].

Optické měření vyžaduje vzorek, který musí být čistý a zbavený mastnoty, otisků prstů, kapalin a prachu. Vzorky musí být vyčištěné předtím, než začne proces měření. Čištění vzorku vyžadují použití kapalin na bázi alkoholu, nebo stlačený vzduch. Očištění povrchu vzorku je nesmírně důležitá otázka, protože nahromaděné znečištění může být zdrojem chyb měření [13].

Geometrie a hmotnost vzorku jsou hlavními faktory, které ovlivňují způsob upínání. Při použití rozebíratelných lepidel (například lepicí pásky, gelu pro fixaci atd.), může docházet k tečení, zatímco použití vnější síly může způsobit deformaci vzorku. K upínání se v praxi používá řada montážních systémů a příslušenství, včetně magnetického a vakuového upínače nebo desky, různých svěraku, sklíčidel, apod. [13].

Orientace vzorku může ovlivnit výsledky měření. Pro dodržení opakovatelnosti je třeba určit správnou orientaci a dodržovat jí pro všechny měřené vzorky [13].

Nastavení sklonu je dalším z kroků přípravy měření. Tento postup je zvláště užitečný pro vzorky, které se vyznačují vysokým úhlem sklonu nebo značnou nepravidelností povrchu [13].

V posledním kroku je nutné nastavit měřicí rozsah, a to ručně nebo motorizovanou kontrolou joystickem [13].

2.4.5 Normy vztahující se na přístroj Talysurf CCI Lite

Pro určení geometrických vlastností výrobku odpovídá skupina norem ISO 25178. V první a druhé části jde o indikace povrchu a určení parametrů povrchu. Část 6 ukazuje

a stručně popisuje různé typy přístrojů pro měření topografií povrchu a podrobnější to se rozebírá v části 604: Jmenovité charakteristiky bezdotkových přístrojů (CSI).

2.4.6 Postup měření

Po řádné přípravě vzorků může začít samotné měření. Jako první je nutné zapnut přístroj a počítač, a na počítači spustit program pro ovládání přístroje a měření.

Dalším důležitých krokem je výběr objektivu pro měření. Z praktického hlediska je velmi důležité určit hlavní charakteristiky měřeného povrchu. Vhodný objektiv je obvykle vybrán právě na tomto základě. Obecné informace týkající se výběru objektivu je uvedena v tab. 1.3. [13].

Dále je nutné upnout měřenou součást na stolu přístroje a ustavit ji do správné polohy pomocí posuvů os x a y . Následně se objektiv umístí do pracovní vzdálenosti od měřeného povrchu. Mikroskop se zaostří pro získání ostrého obrazu interferenčních čar. Ručně se seřídí intenzita osvětlení tak, aby byl dosažen optimální kontrast, a vzorek se pomocí naklápění stolu vyrovná tak, aby na něm byl minimální počet interferenčních čar. Následuje případná finální úprava polohy vzorku v osách x a y . Posledním krokem je kontrola správného nastavení softwaru a zahájení sběru dat [13].

Postupy zpracování, analýzy a interpretace jsou důležitou součástí procesu měření. V praxi jsou tyto kroky realizovány pomocí speciálních počítačových programů. V této diplomové práci byly použité nástroje TalyMap a Gwyddion.

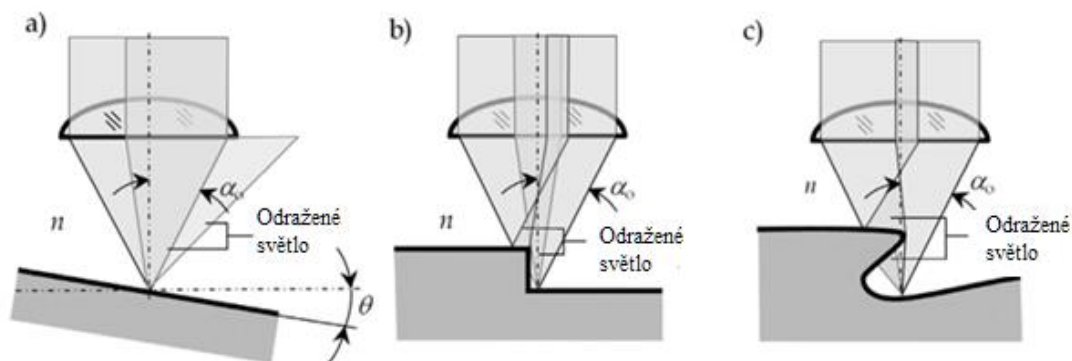
Výsledkem měření je analýza naměřených dat a vyhodnocení číselných hodnot parametrů charakterizujících prvky povrchů. Správná interpretace výsledků je velmi důležitá, protože je v ní značný prostor pro vliv operátora [13].

2.4.7 Omezení CCI

Během měření topografie povrchu se z mnoha různých důvodů mohou vyskytnout chyby a omezení. Zdroje těchto chyb nejčastěji bývá měřicí zařízení a jeho software, jakož i vlastnosti měřeného povrchu a podmínky, ve kterých se měření provádí [13].

Vlastnosti povrchu

Jeden z hlavních přispívajících faktorů, které vedou k výskytu chyb v měření interference na povrchu, jsou velké sklony na analyzovaném povrchu. Z tohoto hlediska jsou významné svahy a stoupání na povrchu. Svahy jsou obvykle matematicky popsitelné pomocí úhly sklonu tangenty, derivace povrchu nebo funkcí přechodu. V mnoha případech značný sklon způsobuje chyby měření v důsledku omezení způsobených vlastnostmi měřicího přístroje a jeho software. Obr. 2.11 ukazuje tři typické situace, které mohou způsobit problémy při měření topografie povrchu: velký úhel sklonu nerovnosti, stupňovitá nerovnost anebo šikmé vybrání [13].



Obrázek 2.11 Zjednodušené schéma, které ukazuje odraz světla procházejícího interferenčním objektivem: a) od šikmé rovného povrchu, b) z povrchu s krokovou výškou, c) od povrchu s šikmým vybráním [13]

Vlastnosti přístroje

Významné instrumentální omezení CCI působeno rozlišením apertury čočky a interferenci, jakož i omezením zdroje světla a snímacího systému. Tato omezení mohou způsobit nepřesně reprezentaci topografií povrchu. Důvodem pro další chyby mohou být nesprávně kalibraci měřicího systému, a nedokonalý software. Mezi omezení týkajících se prostředí, ve kterém se měření provádí vibrace a teplotní změny, které způsobují náhodné změny, které se vyskytují v měření topografii povrchu [13].

3 PROCES KALIBRACE

Kalibrace je činnost, která za specifikovaných podmínek v prvním kroku stanoví vztah mezi hodnotami veličiny s nejistotami měření poskytnutými etalony a odpovídajícími indikacemi s přidruženými nejistotami měření a ve druhém kroku použije tyto informace ke zjištění vztahu pro získání výsledku měření z indikace [21].

Účelem kalibrace jakéhokoli měřicího přístroje jako prostředku metrologické návaznosti je poskytnout jistotu pro uživatele, že naměřená data jsou kvalitní. Cílem procesu kalibrace přístroje je zavést testovací mechanismus, který umožňuje srovnání výstupu přístroje s jiným ověřeným měřením [7].

3.1 Normy v oblasti kalibrace koherenčních rastrovacích interferometrů

Za kalibrace bude odpovídat norma ISO 25178 část 700 Calibration of areal surface measuring instruments, která ještě je v procesu vývoje [7].

3.2 Kalibrace dle výrobce a CSIR²

Daný postup kalibrace vypracoval Swapan Barman a CSIR spolu s výrobcem [31].

3.2.1 Vybavení pro kalibraci v ose Z

Stupňovité etalony jsou používány ke kalibraci vertikálních měření systémem Talysurf CCI. Etalony pro výškovou kalibraci Taylor Hobson Limited (Obr.3.1) jsou dodávány s certifikací UKAS³ a ISO 17025 [31]. Je ve fakultní laboratoře v dostupnosti etalon bez kalibraci s výškou stupně 4,875 μ m se sériovým číslem 112/3298-01UC-10025.



Obrázek 3.1 Kalibrační etalon 5 μ m výšky stupně [31]

3.2.2 Vybavení pro kalibraci v osách X a Y

Etalon pro příčnou kalibraci je používán pro kalibraci zvětšení přístroje (Obr.3.2) [31].

² CSIR - Central Mechanical Engineering Research Institute, India

³ UKAS - United Kingdom Accreditation Service

Tak je současně korigováno zorné pole i rozteč pixelů. Používání soustředných kružnic při kalibraci zajistí přesnost na méně než 1 pixel. Jedním etalonem je prováděna kalibrace všech objektivů a konfigurací systému. Etalony jsou dodávány s mezinárodní certifikací nebo bez certifikace [31]. Etalon, který je v laboratoři dodán bez certifikace.

Etalon pro příčnou kalibraci obsahuje kružnice, které mají jmenovité průměry 1.3300, 1.9950, 2.3275, 2.5269, 2.7931, 2.9927, 3.3253, 3.9903, 5.3201 $\mu\text{m} \pm 0.0005 \mu\text{m}$ a mřížky s velikostí rozteče pro objektiv se zvětšením 10 \times je 100 μm , pro objektiv 20 \times je 50 μm a pro 50 \times objektiv je 20 μm [31].



Obrázek 3.2 Etalon pro příčnou kalibraci všech objektivů [31]

3.2.3 Vybavení pro korekci základny Z

Optimální provedení měření vyžaduje odstranění všech optických odchylek a nepřesností způsobených referenčním zrcadlem interferometru. Toho se dosáhne využitím metody korekce základny [31].

Pro kalibraci Taylor Hobson dodává etalon z karbidu křemíku nejvyšší kvality s odchylkou rovinnosti nepřevyšující 0,2 nm RMS (Obr.3.3). Taylor Hobson dodává dva typy etalonů, jeden bez certifikace 112/3297-01 a druhý etalon s certifikací 112/3507-01 s hodnotou odchylky rovinnosti menší než 0,04nm (0,4 Å) [31].



Obrázek 3.3 Kalibrační ploché zrcadlo 0,2nm RMS [31]

3.2.4 Postup kalibrace

Každá složka kalibračního cyklu musí být kalibrována s nastavením jeho korekčního faktoru, který bude vypočítán softwarem v průběhu měření. Složky kalibračního cyklu, účel kalibrace a příslušné etalony, které mohou být použité pro kalibraci jsou uvedeny v tabulce 3.1 [2].

Tabulka 3.1 Kroky kalibrace a etalony používané pro kalibraci

Č.p.	Typ kalibrace	Účel kalibrace	Použité etalony
1	Kalibrace Z	Kontrola zisku osy Z	Etalon výšky
2	Kalibrace XY	Kontrola zisku os XY	Laterální etalony
3	Korekce základny Z	Korekce Z z jednoho měření	Planparalelní zrcadlo
4	Pokročila korekce Z	Korekce Z z několika měření	Planparalelní zrcadlo
5	Pokročila korekce normalizace světla	Seřízení odchylek a intenzity osvětlení pro měření	Planparalelní zrcadlo
6	Kalibrace vlnové délky zdroje světla	Vyhnutí se převzorkování povrchu při vysoké rychlosti skenování a také zlepšení kontrastu interferenčních proužků	Planparalelní zrcadlo

Prvním krokem je **kalibrace osy Z**. Hodnota výšky stupně se v softwaru nastaví na referenční hodnotu etalonu. Průvodce kalibrací následně zobrazí naměřenou výšku a aktuální chybu, která by měla být menší než 1% výšky stupně kalibrované hodnoty. Kalibrace osy Z musí být provedena samostatně pro každý objekt [2].

Druhým krokem je **kalibrace XY**. Na začátku je nutné osu Z ručně nastavit na minimální polohu, dokud nejsou vidět žádné interferenční čáry. Kalibrovaná hodnota průměru kruhového etalonu v zorném poli (např. 1330 μm pro 10 \times objektivu) se nastaví podle objektivu. Přípustná odchylka je do 1%. Přijetím chybové hodnoty, je nastaveno zvětšení XY pro daný objektiv. Pro další objektivy je nutné zopakovat stejné kalibrační kroky s kružnicemi odpovídajících průměrů [2].

Dalším krokem je **korekce základny Z**. Osu Z je nutné ručně nastavit tak, aby byl viditelný jeden interferenční proužek, a měří se odchylka tvaru. Aktuální chyba by měla být větší než 3,0 nm na 10 \times , 20 \times a 50 \times objektivy [2].

V **pokročilé korekce Z základny** se provádí osm měření v různých polohách. Zde se stanovuje průměrná chyba [2].

Korekce normalizace světla je důležitá pro seřízení odchylek a intenzity osvětlení pro měření tak, aby bylo možné nasnímat slabě osvětlené oblasti v rozích. Pokud je světlo příliš světlé, budou se na displeji objevovat žluté tečky. Naopak, následkem případné nízké saturace světla budou chybějící data. Pro pokročilou světelnou korekci normalizace světla se provádí osm měření při různých polohách etalonu. Tato kalibrace se provádí pro každý objektiv [2].

Kalibrace vlnové délky zdroje světla se provádí, aby nebylo nutné opakovat snímání povrchu, když se provádí skenování při vysoké rychlosti. Když je povrch vzorku snímán při vysoké rychlosti (x3 nebo x5 rychlosti snímání), a bez použití této kalibrace, je pravděpodobné, že budou chybět data. Pro kalibraci světelného zdroje je doporučena nejpomalejší rychlost snímání [2].

Po dokončení kalibračního cyklu systém konfigurace uloží nejnovější obdržené faktory pro každý parametr. Bude generována tabulka o konfiguraci ukazující stav kalibrace každé čočky [2].

3.3 Kalibrace podle NPL⁴

Vzhledem k tomu, že popsáný postup kalibrace od výrobce nezahrnuje určení nejistoty měření, není kalibrací ve smyslu VIM. Proto musel být zvolen jiný postup. Prof. Leach ve své spolupráci s NPL se rozebírá kalibrační kroky, které odpovídají pojmu kalibrace podle VIM v části stanovení nejistoty měření.

3.3.1 Materiály

Při kalibraci koherenčních rastrovacích interferometrů lze úspěšně využít některé druhy etalonů určené pro kalibraci kontaktních přístrojů, tak jak je definuje norma ISO 5436-1. Mezi tyto etalony patří např. měřicí etalony hloubky typu A [23].

Norma rozlišuje dvě podskupiny etalonů typu A. V této práci byl využit etalon typu A1.

Typ A1 s širokými drážky s plochým dnem je první podskupinou. Tyto měřicí etalony mají široké kalibrované drážky s plochým dnem, hřeben s plochým výstupkem, nebo několik takových prvků stejné nebo zvyšující se hloubky nebo výšky [23].

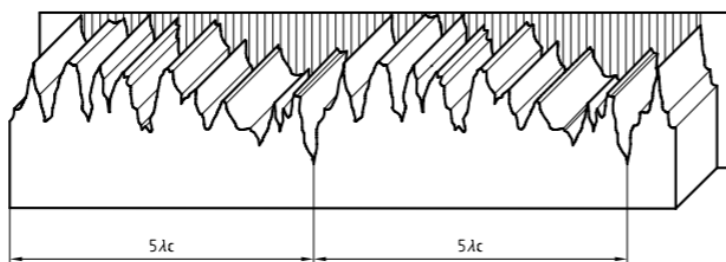
Etalon použitý pro kalibrace výšky stupně (Obr. 3.1) je etalon typu A1 podle normy ISO 5436-1.

Pro kalibraci os X a Y se pro určení nejistot měření v těchto osách dají použít etalony s mřížkou s definovanou roztečí (Obr. 3.2).

Další důležitou oblastí v oblasti vývoje etalonů je testování laterálního rozlišení. Na testování celkového výkonu přístroje jsou zaměřeny čerpované⁵ etalony (uvnitř i vně lineárního provozního režimu optických přístrojů). Ty sestávají ze sinusoidních struktur, které se liší jak ve vlnové délce, tak v amplitudě. Mikrokuličky byly navrženy jako alternativa pro testování výkonu optických přístrojů v jejich lineárním provozním režimu [7].

Pro celkovou kalibraci přístrojů, topografii povrchů byla vyvinuta metoda pro měření povrchového etalonu 3D drsnosti s nepravidelnou topografií povrchu [17], podobná etalonům typu D dle ISO 5436-1 [23].

Tyto etalony mají nepravidelné profily (například získaný broušením) ve směru posuvu, ale mají pohodlí přibližně konstantní průřez kolmý ke směru traverzy (viz. Obrázek 3.4) [23].



Obrázek 3.4 Typ drážky D1 dle [23].

Tyto etalony simulují obrobky, které obsahují širokou škálu vzdálenosti hřebenů. Poskytují ujištění o konečné celkové nejistotě kalibrace [23].

⁴ NPL - National Physical Laboratory, UK

⁵ čerp = pojmenování pro signál s proměnlivou vlnovou délkou [14]

3.3.2 Metrologické charakteristiky

Kalibrace přístrojů by měla být založena na modelu měření, jehož vstupní veličiny jsou schopny zachytit chyby v měřících osách. Metrologická charakteristika je charakteristika měřícího zařízení, která by mohla ovlivnit výsledky měření [7].

To naznačuje, že soubor metrologických charakteristik je přímo spojeny s metrologickou výkonností přístroje. Kalibrace metrologických vlastností proto je nezbytná a metrologické vlastnosti mají okamžitý vliv na nejistoty měření [7].

V seznamu metrologických charakteristik je uvedeno sedm veličin: tři specifické pouze pro měření v ose Z: měřicí šum, reziduální odchylka rovinnosti a topografické prostorové rozlišení; jeden specifický pro měření os XY: kolmost os XY; a tři týkající se všech os měření: koeficient zesílení, odchylka linearity, topografická přesnost [7].

3.3.3 Kalibrační kroky

Hlavní vstupní veličiny, které mají vliv na nejistotu spojenou s 3D měřením topografie jsou: měřicí šum; rovinnost; koeficient zvětšení a linearity Z a příčných os; kolmost os XY a rozlišení [7].

Šum

Měřicí šum zahrnuje všechny rušivé signály, které se přidávají do výstupního signálu přístroje, pokud je přístroj používán v normálních provozních podmínkách [29]. Šum může být způsoben jak vnitřním šumem přístroje (elektronická nestabilita), tak šumem od prostředí (například vibrace povrchu, vzduchu, teplotní kolísání). V této práci je vyčíslen šum spojený s CCI v podmínkách fakultní laboratoře. CCI je namontován na antivibračním stole, který může izolovat vibrace při frekvencích menších než 4 Hz. Měření velikosti šumu může být dosaženo měřením průměrné kvadratické odchylky posuzovaného profilu S_q na rovné ploše s odchylkou rovinností menší nebo rovné 30 nm. Obtížnost testu spočívá v oddělování vlivu drsnosti nedokonalého povrchu od šumu přístroje [9]. Tomu se však lze vyhnout dvěma způsoby.

První je metoda průměrování předpokládá, že příspěvek šumu přístroje k průměrné kvadratické odchylce posuzovaného povrchu z průměrů získaného z více měření provedených na stejném místě povrchu klesá s druhou odmocninou počtu opakovaných měření. V takovém případě může být velikost měřícího šumu určena pomocí rovnicí [8].

$$S_{q_{noise}} = \sqrt{\frac{S_q^2 - S_{q_n}^2}{1 - \frac{1}{n}}} \quad (6)$$

kde S_q je naměřená průměrná kvadratická odchylka posuzovaného profilu po jednom měření, n je počet opakovaných měření, S_{q_n} je naměřená průměrná kvadratická odchylka posuzovaného profilu průměrného povrchu a $S_{q_{noise}}$ je měřicí šum [8]. Aby se tento vztah dal použít, průměr z několika měření musí být menší než výsledek měření bez průměrování.

Druhou metodou je metoda odečítání po sobě následujících měření, pro které nebylo použito průměrování [8]. Při této metodě se vzájemně odečítají dvě naměřené topografie získané ze stejného místa na etalonu. Jejich rozdíl by měl být tvořen pouze náhodnými odchylkami, tedy měřícím šumem.

$S_{q_{noise}}$ se významně neliší (méně než 0,1%) s nárůstem počtu opakovaných měření [8].

Rovinnost

Kontrola rovinnosti se provádí na rovném povrchu. Výškový parametr, který určuje velikost vlivu rovinnosti na měření je maximální výška posuzované plochy (S_z). S_z je vysoce citlivý na místní kolísání výšky, jako jsou škrábance nebo nečistota. Je proto obtížné zcela oddělit příspěvek přístroje od nedokonalosti etalonu a dalších rušivých údajů. Jeden způsob, jak překonat tyto problémy je změřit topografii na různých místech beze změny nastavení přístroje vyhodnotit průměrnou hodnotu měření výšky každého bodu topografie. Je obtížné doporučit přesný počet opakovaných měření, protože počet závisí na rychlosti, se kterou se hodnota S_z stabilizuje. Měření je nutné opakovat, dokud se hodnota S_z stabilizuje [8].

Výsledky testů měřicího šumu a odchylky rovinnosti je nutné filtrovat před jejich použitím ve výpočtu nejistoty [6].

Výpočet příspěvku nejistoty od měřicího šumu a rovinnosti

Měřicí šum přispívá k celkové nejistotě měření ve formě normálního rozdělení, které má nulovou střední hodnotu a rozptyl roven druhé mocnině hodnoty S_q měřicího šumu. Zbytková rovinnost přispívá k nejistotě měření ve formě rovnoměrného rozdělení, které má směrodatnou odchylku, která se rovná $S_{z_{flatness}}^2/12$. Kombinovaný příspěvek měřicího šumu a zbytkové rovinnosti k nejistotě měření v ose Z je standardní nejistota měření u_{NF} vyjádřená vztahem [6]

$$u_{NF} = \sqrt{S_{q_{noise}}^2 + \frac{S_{z_{flatness}}^2}{12}} \quad (7)$$

Kalibrace osy Z

Kalibrace osy Z se skládá ze série měření různých etalonů výšky stupně s různými hloubkami. Pomocí jejich výsledků se stanoví vztah mezi křivkou ideální odezvy a křivkou odezvy přístroje. Stupnice osy Z by měla být kalibrována v pravidelných intervalech, protože charakteristiky přístroje se mohou měnit v průběhu času [8].

Kalibrace os XY

Kalibrace os XY sestává z měření rozteče segmentů přesné mřížky. Měření polohy těžišť čtverců křížové mřížky s pomocí navázaného měřicího přístroje umožňuje stabilní a sledovatelné měření délek v osách X a Y. Dále může být pomocí měření úhlu mezi dvěma přímkami přeloženými středy otvorů na dvou jmenovitě kolmých osách měřena kolmost os X a Y. Orientaci každé řady čtverců lze vypočítat přeložením čáry přes těžiště odpovídajících čtverců [8].

V praxi vypočtené koeficienty zvětšení (α_X , α_Y a α_Z) slouží k nastavení přístroje. Kvůli určení jejich příspěvků k nejistotě je následně nutné zkoušky zvětšení a linearity zopakovat. Podíl chyb koeficientu zvětšení a linearity k nejistotě měření může být vypočten jako kombinace chyb měření, návaznosti etalonu, reprodukovatelnosti a opakovatelnosti [6].

Příspěvek chyby linearity k nejistotě měření u_{error} se šíří v podobě rovnoměrného rozdělení, které má směrodatnou odchylku rovnu $\delta_{error}^2/3$. Příspěvky opakovatelnosti a reprodukovatelnosti k celkové nejistotě měření u_{repeat} a u_{reprod} se šíří ve formě normálního rozdělení, které má nulovou střední hodnotu a rozptyl roven druhé mocnině

hodnoty opakovatelnosti a reprodukovatelnosti u_{repeat} nebo u_{reprod} . Kombinovaný příspěvek chyby měření, návaznosti $u_{traceability}$, opakovatelnosti a/nebo reprodukovatelnosti ke standardní nejistotě měření v jednotlivých osách u_{T-x} , u_{T-y} a u_{T-z} je dan vztahem

$$u_{T-i} = \sqrt{u_{traceability}^2 + u_{repeat}^2 + u_{reprod}^2 + u_{error}^2} \quad (8)$$

kde je $i = \{x, y, z\}$ [6].

Rozlišení⁶

Rozlišení při měření pomocí klasickým 2D mikroskopem znamená nejmenší příční vzdálenost mezi dvěma body, které mohou být rozlišeny. Při měření ve 3D by však vzdálenost mezi dvěma sousedními body mohla mít vliv na jejich relativní výškový rozdíl. Proto není jednoduché pojem prostorového rozlišení vůbec definovat a prakticky realizovat. Řešení problému prostorového rozlišení je předmětem probíhajícího vývoje [8].

Příčné rozlišení přispívá k nejistotě měření u_{res} ve tvaru rovnoměrného rozdělení, které má odchylku, která se rovná $Res^2/3$, kde Res je boční mez [6].

Výpočet nejistoty

Nejistota se vypočítá podle pokynů uvedených v Příručce k vyjádření nejistoty měření (GUM) [6].

Standardní nejistota spojená s výsledkem měření může být zapsána jako odmocnina kvadratického součtu nejistoty měření typu A a nejistoty měření typu B,

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (9)$$

kde u je kombinovaná standardní nejistota, u_A je standardní nejistota typu A, u_B standardní nejistota typu B [6].

Rozdíl mezi nejistotou typu A a vyhodnocením nejistoty typu B je to, že první z nich je založená na statistickém zpracování opakovaných měření, zatímco druhá je založená na apriorním rozdělení, tedy na známých informacích, které mohou být také vyjádřené směrodatnou odchylkou [6].

Pokud jsou složky nejistoty nekorelované, hodnocení standardní nejistoty typu B lze vypočítat pomocí

$$u_B^2 = \sum_{i=1}^n C_i^2 u^2(x_i) \quad (10)$$

kde C_i je i -tý koeficient citlivost (viz GUM), $u(x_i)$ je nejistota spojená s i -tou komponentou [6].

Příspěvek kalibrace metrologických vlastností je součástí hodnocení standardní nejistoty typu B (i když měřicí šum je často náhodný efekt, model kalibrace, která používá metrologické vlastnosti, jej považuje za součást nejistoty typu B). To znamená, že každá

⁶ ISO/TC213-WG16 definuje prostorové rozlišení výškového parametru jako schopnost naměřené topografie povrchu přístroje rozlišovat v těsné vzdálenosti povrchové prvky

z metrologických vlastností tohoto přístroje představuje samostatnou složku standardní nejistoty typu B [6].

Kombinovaný příspěvek kalibrace metrologických vlastností může být vypočten použitím rovnice (11),

$$\begin{cases} u_x = \sqrt{(u_{T-x}^2 + u_{Res}^2)} \\ u_y = \sqrt{(u_{T-y}^2 + u_{Res}^2)} \\ u_z = \sqrt{(u_{T-z}^2 + u_{Res}^2)} \end{cases} \quad (11)$$

Nejistoty spojené s měřením v ose Z mají větší vliv než příspěvek reprodukovatelnosti, protože standardní nejistoty spojené s rozsahem kalibrace bývají výrazně větší [6]. Hlavním přispěvatelem k této kombinované nejistotě bývá základní kalibrace etalonu, má obvykle poměrně velkou nejistotu. Nicméně, při výpočtu parametrů drsnosti, je ještě možné dosáhnout hodnoty, které jsou menší než kombinované nejistoty vztažené ke středové čáře [6].

Existují různé způsoby zobrazení výsledků nejistoty měření spojené s kalibrací metrologických vlastností tohoto přístroje. Nejistota může být vyjádřena jako kombinace délky přiměřených podmínek a omezení a vhodné to použít v případě, ve kterém je koeficient zvětšení podstatně větší než chyby linearity a není opravené nebo upravené. Pevný způsob zobrazení se používá, když je vyžadována celková hodnota nejistoty měření spojená s měřením souřadnic [6].

3.4 Kritický pohled na definované postupy kalibrace

Mezinárodní metrologický slovník – Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM) popisuje *kalibraci* jako činnost, která stanoví vztah mezi hodnotami s nejistotami a pak stanovení vztahu pro dosažení výsledku měření. Praktické kalibrační kroky musí zahrnovat definování hodnot nejistot v různých osách [21].

Prvním krokem v kalibraci CCI přístrojů musí být popsání všech parametrů překážejících procesu kalibrace. Z tohoto pohledu je třeba definovat parametry šumu, včetně vibračních přístrojů, prachu a parametrů pracovního prostředí majících vliv na proces kalibrace. Tento postup přesně popisují ve svých pracích [15, 14] prof. Leach. Pomocí rovnice (1) definuje šum vznikající v procesu kalibrace.

Po zohlednění šumu a vibračních vznikajících v procesu kalibrace, se může začít proces, ve kterém bude zkalibrováno měření výšky. Kalibrační postup výrobce a CSIR v kapitole 3.2 ves skutečnosti popisuje proces seřízení přístroje. Stanovuje sice maximální přípustnou chybu, která by měla být menší než 1 % výšky stupně, ale bez stanovení nejistoty měření požadovaného ve VIM. Dalším problémem je, že výrobce v procesu „kalibrace výšky stupně“ nebere v úvahu místní kolísání výšky stupně, škrábance nebo nečistoty, které mají přímý vliv na výškové charakteristiky etalonů a mohou mít chybu větší než 1 %.

Pro přesné definování výšky etalonu, na kterém se provádí kalibrace, je doporučeno provedení několika měření výšky na různých místech do stabilizace hodnoty výškového parametru posuzované plochy pro každý objektiv. Pro úplnou kalibraci musí být provedeny měření etalonů s různými hloubkami drážek pro stanovení vztahu mezi křivkou ideální odezvy

a křivkou odezvy přístroje pomocí metody korekce základny. Korekce základny Z výrobce nabízí provádět po kalibraci os XY , a před tím ručně nastavit polohu osy Z .

Kalibrace os XY popisují výrobce a prof. Leach různě. Dle výrobce má být kalibrace prováděna pomocí soustředných kružnic. Software přístroje provádí srovnávání naměřené hodnoty průměru kalibračních kružnic s definovanými přednastavenými hodnotami a vypočítá korekce. Nevýhodou tohoto postupu je to, že bude posuzována lokální charakteristika rozsahu přístroje a nezískají se informace o křivce odezvy přístroje. Měření etalonu s křížovými mřížkami dává možnost provést kalibrace os XY v celém rozsahu a navíc umožňuje získat informace o kolmosti os XY .

Důležitým krokem v procesu kalibrace je korekce saturace světla, nezbytná pro vyloučení chybějících dat. Výrobce specifikuje počet měření pro nastavení saturace na úrovni 8 měření. Tato korekce musí být provedena pro každý objektiv.

V případech provádění měření na vysoké rychlosti doporučuje výrobce provádět kalibrace vlnové délky zdroje světla. Kalibrace má být prováděna při nízké rychlosti snímání.

Jedním z nejdůležitějších kroků je kalibrace prostorového rozlišení. Její složitost tkví v tom, že na rozdíl od klasického 2D rozlišení je nutné brát v úvahu i výškový rozdíl mezi dvěma přilehlými body. Přesné stanovení postupu a parametrů pro charakterizaci rozlišení pro CSI přístroje je ještě v procesu vývoje. Doporučení, pro řešení tohoto problému nabízí prof. Leach [8].

Posledním krokem v procesu kalibrace je výpočet nejistoty přístroje. Kalibrační kroky doporučené výrobcem neodpovídají pojetí Mezinárodního metrologického slovníku (VIM), protože postup neobsahuje výpočet nejistoty a stanovení vztahu mezi naměřenými hodnotami s nejistotami. Tento vztah definuje prof. Leach, který doporučují provést výpočet nejistoty podle Příručky k vyjádření nejistoty v měření (GUM) [6]. V této práci je využit proces kalibrace, který dodržuje kalibrační kroky dle výrobce ale s ohledem na doporučení prof. Leache a místní možnosti.

4 ANALÝZA MĚŘENÍ

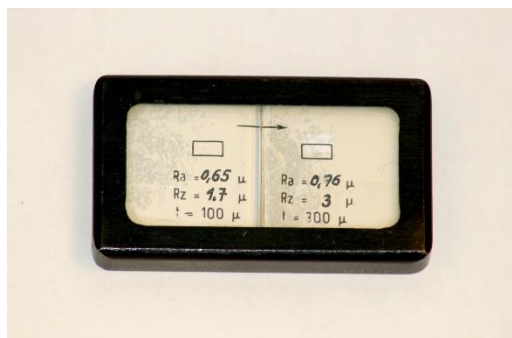
4.1 Šum

Měřicí šum zahrnuje kombinaci vnitřního šumu z přístroje, šumu z venkovního prostředí a šumu při měření ve směru osy Z.

Prof. Leach ve své práci [6] popisuje dva postupů, které jsou schopné izolovat měřicí šum od samotné drsnosti vzorku, a jakýchkoli odchylek rovinnosti přístroje. Jeden postup izoluje šum odečítáním dvou měřených topografií a druhý postup využívá průměrování několika naměřených topografií tak, že účinek měřicího šumu je snížen o druhou odmocninu počtu měření. V obou technikách je míra měřicího šumu odhadována ve formě průměrné kvadratické výšky posuzované plochy, Sq [6].

Používání techniky průměrování měřicího šumu je vyjádřeno rovnicí (7).

Pro měření šumu byly použity tři etalony. Prvním z nich byla rovná plocha etalonu výšky stupně Taylor Hobson (viz Obr. 3.1). Druhým byl etalon rozteče s drážkami se sinusovým profilem Mahr pro 20× a 50× zvětšení (viz Obr. 4.1), a třetím byl další etalon rozteče značky Somet použitý pro 10× objektiv. Vyhodnocení proběhlo bez filtrování měřených údajů. Byly použity obě výše zmíněné metody – metoda odečítání po sobě následujících měření a metoda průměrování dvou, čtyř, osmi nebo šestnácti měření [6]. V tabulkách A.1 až A.6 v příloze A jsou uvedena naměřená data.



Obrázek 4.1 Etalon Mahr

Možnost software průměrovat dva, čtyři, osm a šestnáct měření se týká průměru signálu pro jednotlivé pixely snímače, před tím, než se použije algoritmus pro transformaci elektro-optického signálu na topografii (výšku) [6]. Tabulka 4.1 ukazuje výsledky získané metodou průměrování.

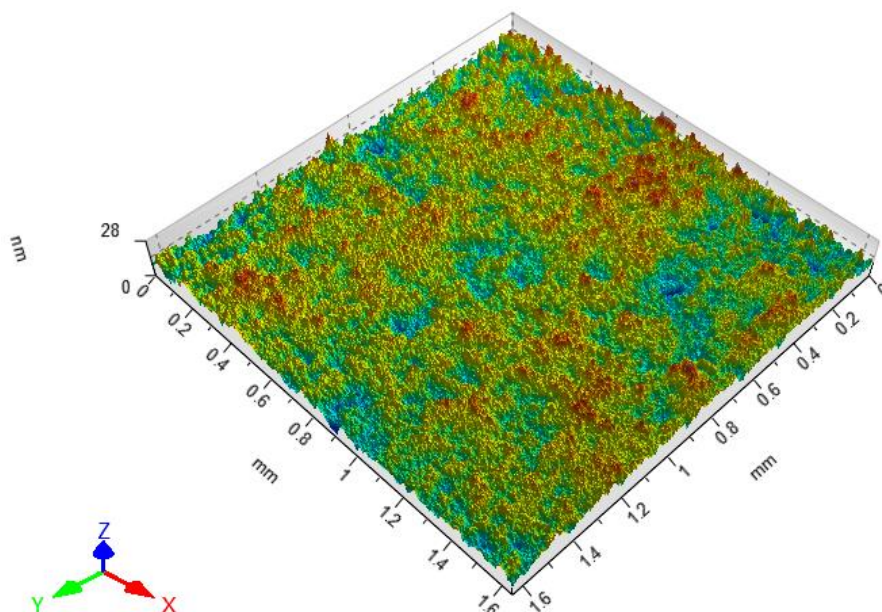
Etalon Taylor Hobson

Tabulka 4.1 Parametry metody průměrování pro etalon Taylor Hobson

	Objektiv 10×	Objektiv 20×	Objektiv 50×
	Sq [nm]		
2	0,2723	-	-
4	0,2910	0,6001	0,3935
8	0,2671	0,5094	0,4195
16	-	0,4967	0,4820

Pokračování tabulky 4.1			
Průměr	0,2768	0,5354	0,4316
Směr. odchylka	0,0051	0,0230	0,0186

Rozdíl Sq mezi průměrováním dvou nebo šestnácti opakovaných měření jednoho objektivu je nepatrný. Jak je ukázáno v tabulce 4.1, parametr Sq je velice citlivý na zvětšení objektivu.

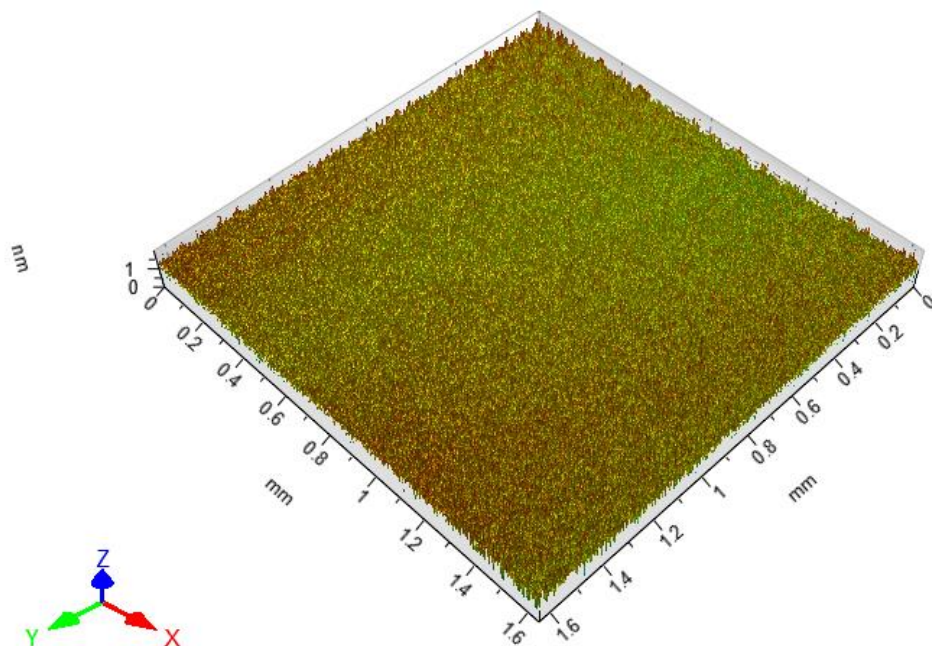


Obrázek 4.2 3D topografie neprůměrovaného povrchu etalonu Taylor Hobson pro 10× objektiv

Neprůměrované výsledky měření byly použité pro výpočet šumu pomocí metody odečítání. Na obrázku 4.2 je zobrazena 3D topografie základního povrchu etalonu Taylor Hobson při 10× zvětšení. Tabulka 4.2 ukazuje hodnoty parametrů dosažené použitím této metody. Z prvního měření bylo odečteno druhé, z druhého je třetí a tak dále, dokud nebylo získáno pět nových topografií šumu. Zobrazení výsledné 3D topografii povrchu měřicího šumu je zobrazeno na obrázku 4.3 pro etalon Taylor Hobson použitím etalonu se zvětšením 10×.

Tabulka 4.2 Parametry při použití metody odčítání na etalonu Taylor Hobson

Č. m.	Objektiv 10×	Objektiv 20×	Objektiv 50×
	Sq_{noise} [nm]		
1	0,24094	0,91484	0,72470
2	0,25956	0,90274	0,68286
3	0,20297	1,02640	0,64507
4	0,18847	0,92714	0,66807
5	0,17569	0,92080	0,62469
Průměr	0,21353	0,93838	0,66908
Směr. odchylka	0,01588	0,02237	0,01708

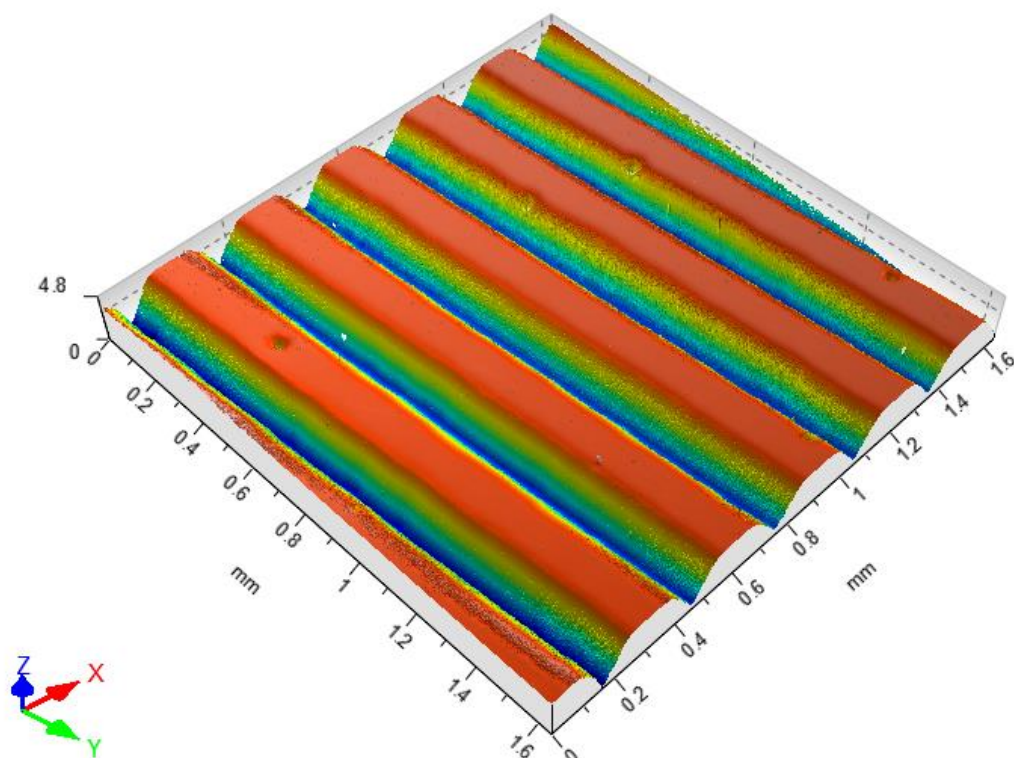


Obrázek 4.3 3D topografie povrchu metody odečítání na etalonu Taylor Hobson pro 10× objektiv

Výsledek metody odečítání pro 50× objektiv je $S_{q_{noise}} = 0,66908$ nm s přidruženou směrodatnou odchylkou 0,01708 nm, pro objektiv se zvětšením 20× je $S_{q_{noise}} = 0,93838$ nm s přidruženou směrodatnou odchylkou 0,02237 nm a pro případ objektivu o velikosti 10× zvětšení je $S_{q_{noise}} = 0,21353$ nm s přidruženou směrodatnou odchylkou 0,01588 nm (viz tabulka 4.2). Rozdíl mezi dvěma metodami pro etalon Taylor Hobson není velký (pohybuje se mezi 10-20%). Za zmínku stojí, že naměřené průměrované hodnoty v některých případech překonaly hodnoty bez průměrování. Toto může být způsobeno vlivem prostředí.

Etalon Somet pro objektiv 10× a Mahr pro objektiv se zvětšením 20× a 50×

Protože by výsledky metod průměrování a odečítání neměly záviset na topografii měřeného etalonu, bylo vyzkoušeno i posouzení měřicího šumu pomocí etalonů s drsným povrchem. Na obrázku 4.4 je 3D zobrazení základního povrchu etalonu Somet pro objektiv se zvětšením 10×.



Obrázek 4.4 3D topografie povrchu neprůměřovaných hodnot etalonu Somet pro objektiv 10×

Pro měření šumu objektivem se zvětšením 10× byl použit etalon Somet a pro objektivy 20× a 50× Mahr. Etalon Mahr nebyl pro objektiv s 10× zvětšením použit, protože jeho měření tímto objektivem vykazovalo stabilně zvýšený počet nenaměřených bodů. Tabulky 6, 7 a 8 přílohy A ukazují dosažené parametry.

Metodou průměrování byly získané výsledky uvedené v Tabulce 4.3.

Tabulka 4.3 Parametry metody průměrování pro etalony Mahr a Somet

	Objektiv 10×	Objektiv 20×	Objektiv 50×
	<i>Sq [μm]</i>		
2	-	0,0157	-
4	-	0,0181	0,0329
8	-	0,0097	0,0507
16	-	0,0114	0,0539
Průměr	-	0,0137	0,0459
Směr. odchylka	-	0,0019	0,0046

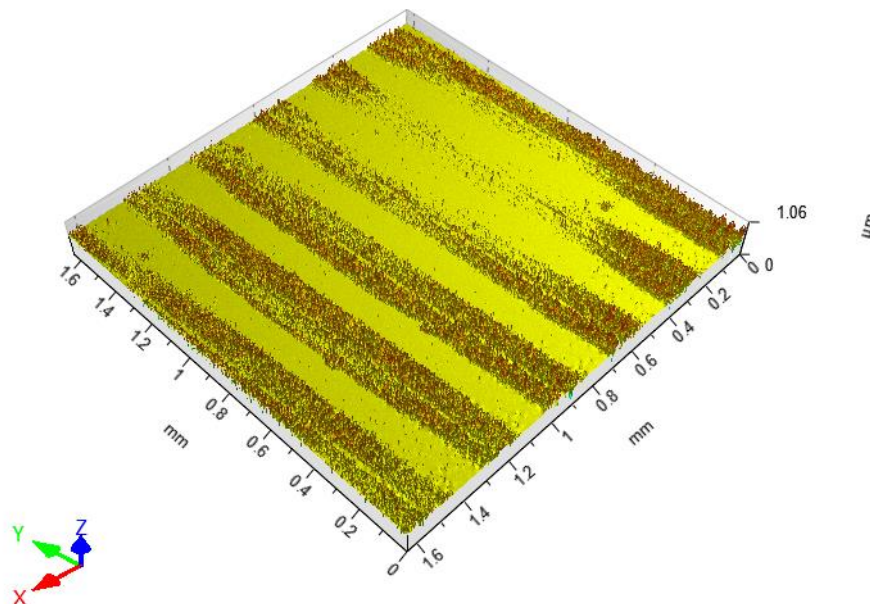
Při měřeních těchto dvou etalonů byl rozdíl mezi průměrováním dvou nebo šestnácti měření velmi malý (Tab.4.3), ale směrodatná odchylka se značně měnila se změnou zvětšení.

Výsledky měření, pro které nebylo použito průměrování, byly použity pro metodu odečítání. Jako v případě s etalonem Taylor Hobson, od prvního měření bylo odečteno druhé, od druhého třetí a tak dále (Tab.4.4).

Tabulka 4.4 Parametry při použití metody odečítání na etalonu Mahr a Somet

Č. m	Objektiv 10×	Objektiv 20×	Objektiv 50×
	$Sq_{mean} [\mu m]$		
1	0,05453	0,05440	0,07570
2	0,05436	0,05410	0,07560
3	0,05442	0,05420	0,07560
4	0,05462	0,05440	0,07560
5	0,05445	0,05440	0,07560
Průměr	0,05448	0,05432	0,07562
Směr. odchylka	0,00005	0,00006	0,00002

Na obrázku 4.5 je uvedena 3D topografie povrchu měřicího šumu etalonu Somet pro 10× zvětšení po použití metody odečítání. Ze srovnání s obr. 4.3 je patrný téměř tisícinásobný nárůst amplitudy šumu při použití etalonu s nerovnou geometrií. Toto ukazuje, že etalon má značný vliv na měřicí šum i při použití metod, které mají jeho vliv potlačovat.



Obrázek 4.5 3D topografie povrchu metody odečítání na etalonu Somet s objektivem 10×

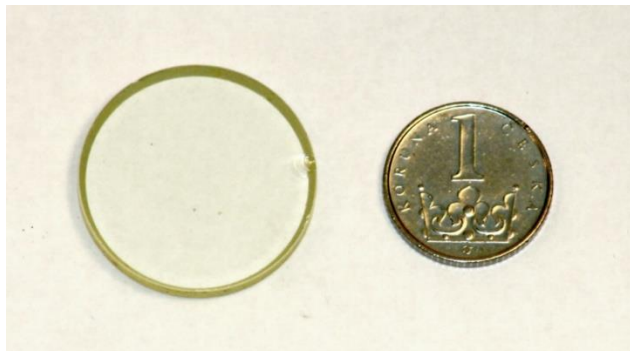
Metoda průměrování je nevhodná pro ty případy, kdy jsou výsledné hodnoty Sq bez průměrování menší, než průměrované hodnoty. Při měření objektivem se zvětšením 10× etalonu Somet se nedalo provést průměrování.

4.2 Rovinnost

Druhým krokem kalibrace je měření rovinnosti povrchu, které slouží k posouzení kvality referenční plochy přístroje. Měření rovinnosti ovlivňovaly chyby pocházející z optických komponentů, které nejsou ideální, a z jejich upevnění [6].

Měření ukazující správnost nastavení referenční plochy přístroje se provádí na plochém etalonu s maximální výškou posuzované plochy S_z menší než 30 nm [6]. Pro výběr etalonu s co nejnižší odchylkou rovinnosti byly vyzkoušeny dva etalony.

Etalonem, který byl nakonec použit při kalibraci je nízký skleněný válec zapůjčený společností Mesing s.r.o. (viz Obr. 4.6).

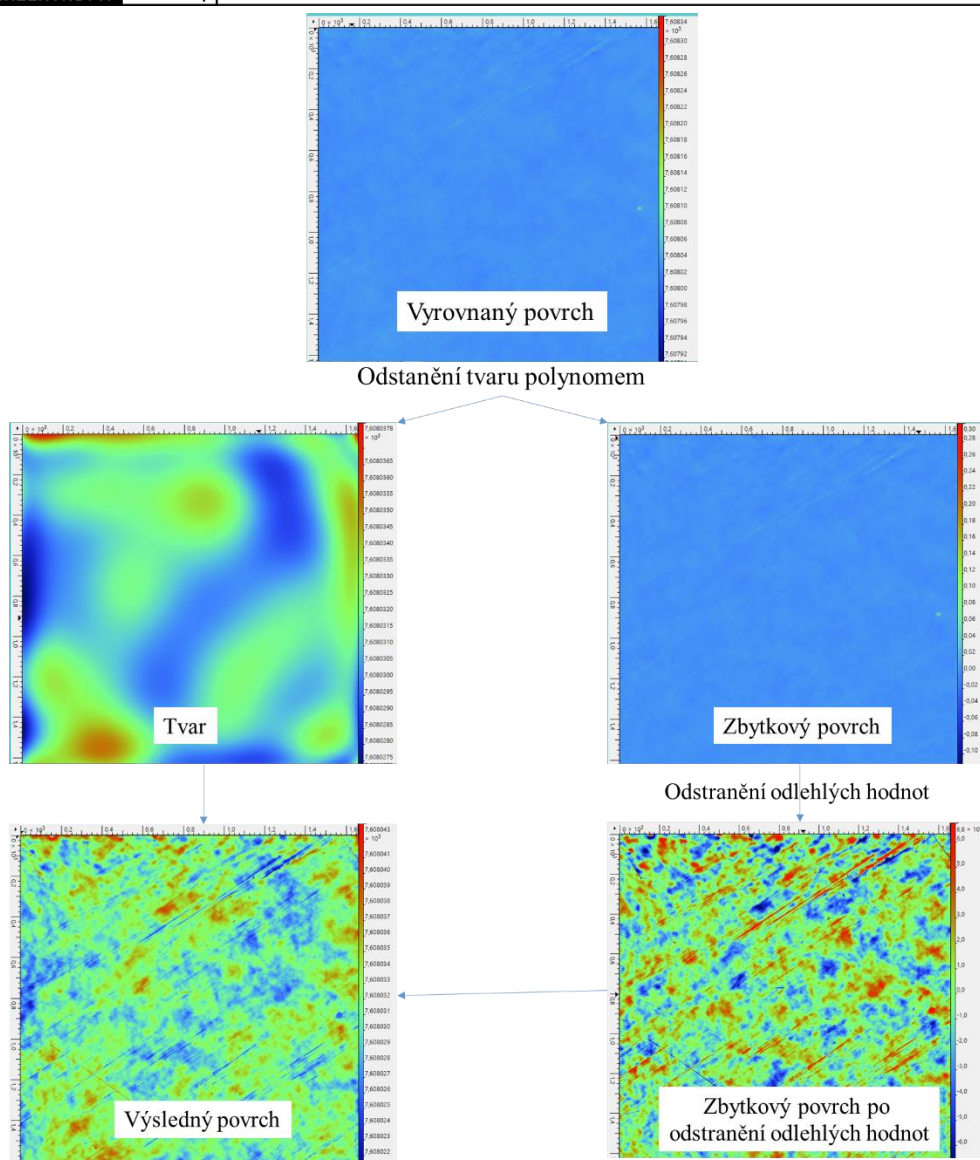


Obrázek 4.6 Ploché skleněné válce

Parametr S_z bývá ovlivněn místními změnami výšky, jako jsou škrábance nebo nečistoty. Způsob, jak snížit vliv těchto nežádoucích ovlivňujících faktorů, je měřit topografii na různých místech s pohybem vzorku v horizontální rovině. Metoda je podobná metodě průměrování popsané v části měření šumu, s výjimkou toho, že při měření šumu se provádí více měření na stejném místě [6].

Při kalibraci rovinnosti byl použit etalon s rovinnou plochou, která byla měřena nominálně kolmo k optické ose přístroje. Parametrem použitým pro vyjádření odchylky rovinnosti je maximální výška plochy s omezeným rozsahem (S_z) která pro etalon musí být níže než 30nm [6]. Pro kalibraci rovinnosti byl jako etalon vybrán nízký skleněný válec, který má odchylku rovinnosti nejbližší k tomuto limitu hodnoty.

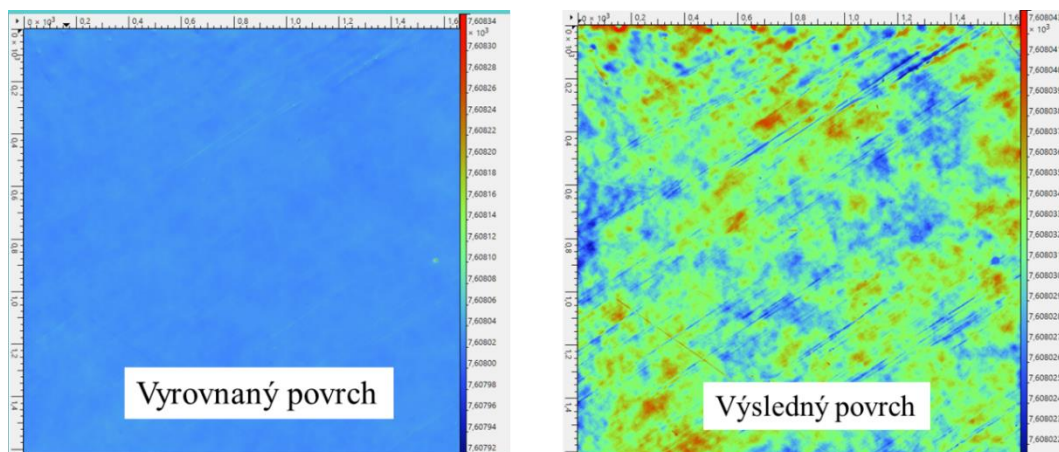
Měření rovinnosti může být ovlivněno falešnými údaji vznikajícími z nežádoucích vlastností částic přítomných na povrchu, a proto je dobré vyloučit jejich vliv na měření odchylky rovinnosti přístroje. Jedním ze způsobů eliminace těchto vlastností je například použití polynomu jedenáctého řádu pro odstranění tvaru, a odstranění výstupků a prohloubí zbytkového povrchu, které jsou větší než trojnásobek hodnoty S_q vypočtené na zbytkové ploše [6]. Pro dosažení nejpřesnějších výsledků byly použity odstraňování tvaru a funkce thresholding – metoda odstraňování výstupků a prohloubí dle stanovených kritérií (prachy, vměstky, vlákna apod.) viz Obrázek 4.7.



Obrázek 4.7 Graf popisující kroky pro použití funkce Thresholding (odstranění prachů)

V softwaru TalyMap, který byl dodán s přístrojem v laboratoři praktické a experimentálně metrologie FSI VUT není možné provést sčítání dvou ploch ani požadovanou formu funkce thresholding. Proto byl použit software Gwyddion.

Po provedení deseti měření v deseti místech plochy byla dosažena hodnota $S_z = 29,5394$ nm pro objektiv se zvětšením $10\times$, pro zvětšení $20\times$ hodnota S_z je $10,9763$ nm a $28,8222$ nm pro objektiv s $50\times$ zvětšením. Naměřené hodnoty jsou uvedené v Tabulce B.1 v příloze B této práci. Odchylka rovinnosti je na stavu referenčního zrcadla přístroje ale i na kvalitě povrchu etalonu použitého pro jeho seřízení. Vyšší kvalita povrchu seřizovacího etalonu by vedla k vytvoření kvalitnější reference a tím k nižším hodnotám odchylky rovinnosti.



Obrázek 4.8 Topografie povrchu před zpracováním rovinnosti (zleva) a výsledek zpracování (zprava) se zvětšením 10×

4.3 Výpočet příspěvku měřicího šumu a rovinnosti k nejistotě měření

Měřicí šum přispívá k celkové nejistotě měření ve formě normálního rozdělení, které má střední hodnotu rovnou nule a rozptyl rovnající se čtverci hodnoty S_q měřicího šumu. Příspěvek odchylky rovinnosti k nejistotě měření se šíří ve formě rovnoměrného rozdělení, které má směrodatnou odchylku rovnou $S_{zflatness}^2/12$. Kombinovaný příspěvek měřicího šumu a zbytkové rovinnosti ke standardní nejistotě měření v ose Z je dán vztahem [6]

$$u_{NF} = \sqrt{S_{qnoise}^2 + \frac{S_{zflatness}^2}{12}} \quad (7)$$

V tabulce 4.5 jsou uvedené příspěvky k nejistotě vypočtené pro měření šumu na etalonu Taylor Hobson a rovinnosti na malém válce, v tabulce 4.6 jsou obdobné hodnoty pro etalony Somet a Mahr a rovinnosti na malém válce.

Tabulka 4.5 Výpočet vlivů nejistot měření šumu etalonu Taylor Hobson a rovinnosti na malém válce při měření osy Z

	10×	20×	50×
S_{qnoise} , nm	0,2768	0,5354	0,4316
$S_{zflatness}$, nm	29,5394	10,9763	28,8222
U_{nf} , nm	8,6039	3,4552	8,5066

Tabulka 4.6 Výpočet vlivů nejistot měření šumu na etalonech Somet a Mahr a rovinnosti na malém válce při měření osy Z

	10×	20×	50×
S_{qnoise} , μm	-	0,0137	0,0459
$S_{zflatness}$, μm	0,0295	0,0110	0,0288
U_{nf} , μm	-	0,0034	0,0104

4.4 Kalibrace osy Z

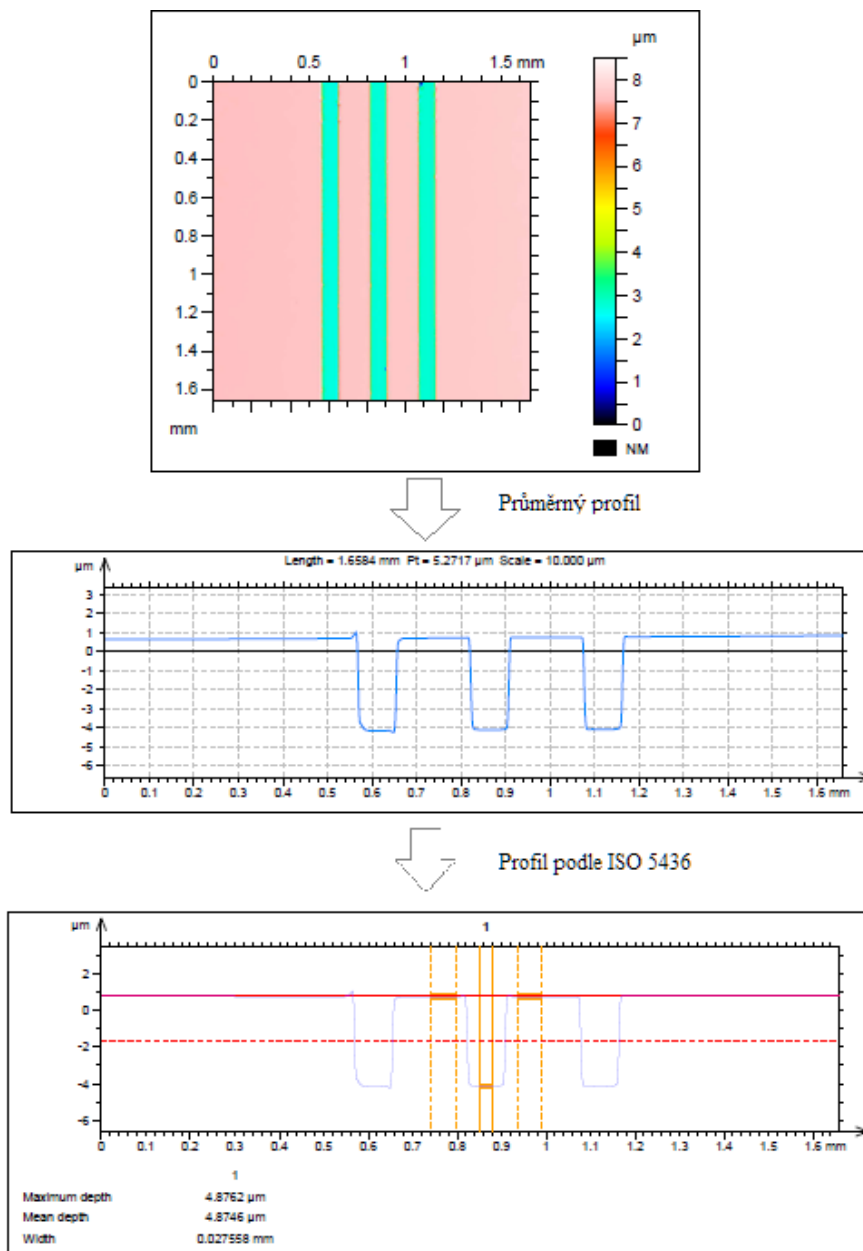
Kalibrace koeficientu zvětšení α_Z , chyby linearit l_Z a kolmosti sestává z řady měření rozsahu stupňových etalonů s různými výškami pro stanovení vztahu mezi křivkou ideální odezvy a křivkou odezvy přístroje. Tato kalibrace poskytuje informace o chybě linearit osy Z a koeficientu zvětšení [6].

Rozsah výšek různých etalonů výšky stupně by měl pokrývat celý pracovní rozsah nebo alespoň rozsah zájmu. Chyby linearit a koeficient zvětšení lze extrahovat z výsledků měření několika kalibrovaných výškových kroků různých hodnot přeložením přímky nejmenších čtverců s pevným průsečíkem s osami v počátku (0, 0) [6].

V současné době neexistuje standardizovaná analýza pro měření výšky stupně v plošném režimu. Jedním způsobem měření etalonu výšky stupně, který využívá plošná data a analýzu standardní výšky (podle ISO 5436 část 1), je vypočet z průměrného profilu posuzované plochy kolmému ke směru stupně [6].

Na obr. 4.9 je uveden graf analýzy měření etalonu výšky stupně Taylor Hobson 4.875 μm v plošném režimu (obrázek 4.9 nahoře). Analýza⁷ (obrázek 4.9 dolu) se provádí na středové drážce průměrného profilu (obrázek 4.9 uprostřed).

⁷ podle ISO 5436 část 1



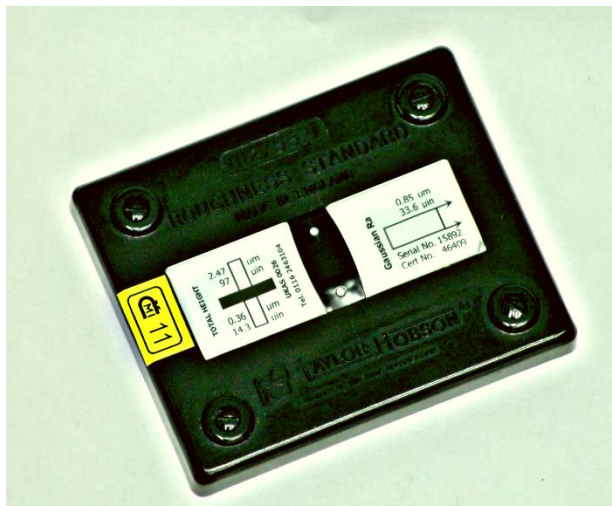
Obrázek 4.9 Graf postupu vyhodnocování kalibraci osy Z

Výhodou kalibrace s pomocí několika etalonů výšky stupně je to, že se při ní projeví chyby kolmosti X-Z a Y-Z. Kosinová chyba, která je způsobena odchylkou kolmosti osy Z se projevuje jako chyba zvětšení [6].

Kalibrační etalon výšky stupně (Obr. 4.10) byl měřen v deseti polohách. U každé z deseti poloh etalonu byla jednou změřena výška, což umožnilo výpočet opakovatelnosti měření (nejistota typu A). Shrnutí výsledků je uvedeno v tabulkách 4.7, 4.8, 4.9. Chyba měření (δ_{err}) byla vypočítána jako rozdíl mezi naměřenou a kalibrovanou hodnotou; opakovatelnost (δ_{repeat}) měřeného etalonu s výškou stupně byla určena jako maximální směrodatná odchylka střední hodnoty vypočtené v každé z deseti poloh uvnitř rozsahu přístroje. Reprodukovatelnost (δ_{reprod}) nebyla určena, protože nebyly dostupné přípravky pro polohování etalonu v celém rozsahu posuvu osy Z. Kalibrační standardní nejistota etalonu

byla uvažována za příspěvek metrologické návaznosti k celkové nejistotě (v tomto případě bylo použito 5 % z výšky stupně 4,875 μm) [6].

Po domluvě s vedoucím práce byla provedena další měření na etalonu Taylor Hobson se dvěma drážkami stanovenou průměrnou hloubkou 2,487 μm s odchylkou $\pm 0,063\mu\text{m}$ u první drážky, a 0,36 μm s odchylkou $\pm 0,012\mu\text{m}$ u druhé drážky (Obr.4.10). Tento etalon pro potřeby práce zapůjčila společnost Imeco TH s.r.o.



Obrázek 4.10 Etalon Taylor Hobson 15892 s kalibrovanými hodnoty 2,47 μm a 0,36 μm

Bylo provedeno měření v deseti polohách po celé délce drážky. V softwaru TalyMap byl povrch vyrovnán ze tří bodů. Ručně byly odstraněny nedokonalosti povrchu, prachové částice apod., které ovlivňovali měření a nepatřily ke geometrii etalonové drážky. Naměřené hodnoty jsou v Tabulkách 4.7, 4.8 a 4.9.

Tabulka 4.7 Naměřené hodnoty výšky stupně a chyby osy Z pro objektiv 10 \times

Etalon	Měřená hodnota, μm	δ_{err}, μm	δ_{repeat}, μm
TH 4.875μm	4,8750	0,0076	0,0040
TH 15892, 2,47μm	2,4700	-0,0064	0,0012
TH15892 - 0,36μm	0,3600	0,0052	0,0005

Tabulka 4.8 Naměřené hodnoty výšky stupně a chyby osy Z pro objektiv 20 \times

Etalon	Měřená hodnota, μm	δ_{err}, μm	δ_{repeat}, μm
TH 4.875 μm	4,8750	0,0180	0,0027
TH 15892, 2,47 μm	2,4700	-0,0013	0,0025
TH15892 - 0,36 μm	0,3600	0,0058	0,0004

Tabulka 4.9 Naměřené hodnoty výšky stupně a chyby osy Z pro objektiv 50×

Etalon	Měřená hodnota, μm	δ_{err} , μm	δ_{repeat} , μm
TH 4.875 μm	4,8750	0,0092	0,0033
TH 15892, 2,47 μm	2,4700	-0,0013	0,0040
TH15892 - 0,36 μm	0,3600	0,0052	0,0005

Koeficient zvětšení lze vypočítat pomocí vzorce (12)

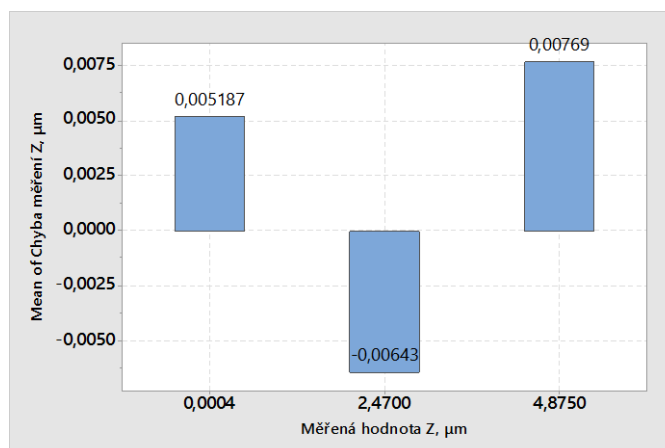
$$\alpha = \frac{\sum_i^n C_i I_i}{\sum_i^n C_i^2} \quad (12)$$

Kde α je koeficient zvětšení, C_i je kalibrovaná hodnota, I_i je indikovaná hodnota a n je počet různých použitých etalonů. Vypočítané hodnoty jsou uvedené v tabulce 4.10.

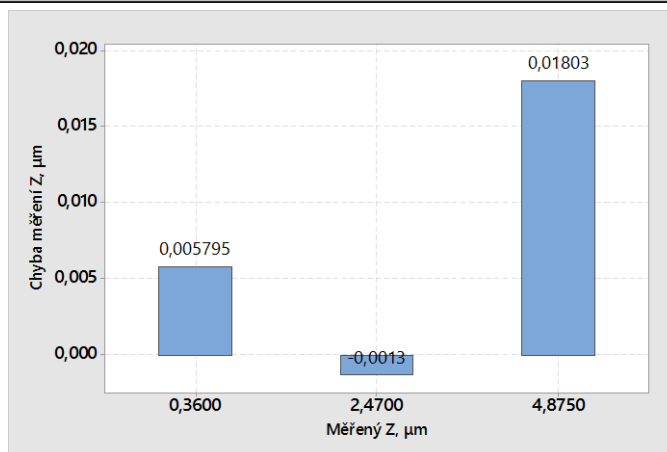
Tabulka 4.10 Výpočet koeficientu zvětšení pro objektivy 10×, 20×, a 50×

Objektiv	TH 4.875 μm	TH 15892, 2,47 μm	TH15892 - 0,36 μm
	αZ , [μm]		
10×	0,4106	0,8087	5,5957
20×	0,4110	0,8095	5,6003
50×	0,4107	0,8095	5,5957

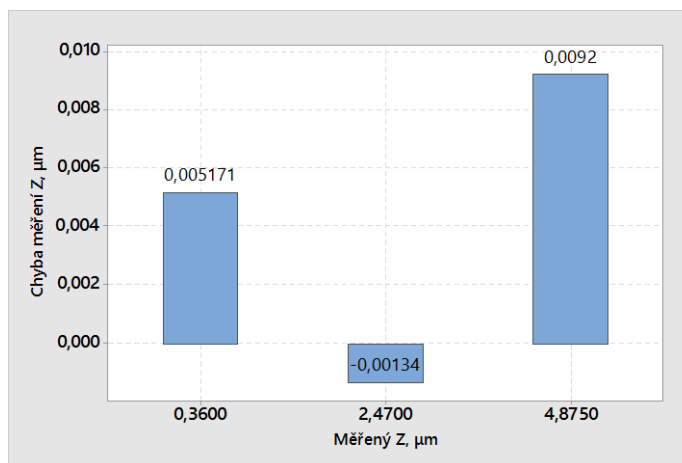
Výsledky kalibrace αZ a $I Z$ objektivů 10×, 20× a 50× jsou uvedeny na obrázcích 4.11, 4.12 a 4.13. Standardní nejistoty jsou vypočteny jako kvadratický součet hodnot opakovatelnosti, reprodukovatelnosti a sledovatelnosti. Volba zvětšovací objektivu neovlivňuje výsledky kalibrace zvětšení a linearitu osy Z, proto může být kalibrace z αZ a $I Z$ provedena pomocí konfigurace s jediným objektivem.



Obrázek 4.11 Kalibrace αZ a $I Z$ použitím zvětšovací objektivu o velikosti 10× - graf chyby měření



Obrázek 4.12 Kalibrace αZ a IZ použitím zvětšovací objektivu o velikosti $20\times$ - graf chyby měření



Obrázek 4.13 Kalibrace αZ a IZ použitím zvětšovací objektivu o velikosti $50\times$ - graf chyby měření

První parametr na grafech je chyba měření výšky stupně na etalonu Taylor Hobson s průměrnou hloubkou $0,36\mu\text{m} \pm 0,012\mu\text{m}$, druhá je pro etalon Taylor Hobson s průměrnou hloubkou $2,487\mu\text{m} \pm 0,063\mu\text{m}$ a třetí je pro etalon s průměrnou hloubkou $4,875\mu\text{m}$.

4.4.1 Výpočet nejistoty

Výpočet standardních nejistot měření spojených s kalibrací výšky osy Z je uveden v tabulkách 4.11, 4.12 a 4.13. Malé výšky kroků (pod $0,360\mu\text{m}$) mohou být měřeny se standardními nejistotami menšími než $0,0144\mu\text{m}$.

Tabulka 4.11 Koeficienty zvětšení a linearitý přispívá k nejistotě měření osy Z pro $10\times$

Etalon	U_{error} , nm	U_{repeat} , nm	$U_{traceability}$, nm	u_{T-z} , nm
TH 4.875μm	0,02	0,02	195,00	195,00
TH 15892, 2,47μm	0,01	0,01	99,48	99,48

TH15892 - 0,36μm	0,01	0,01	14,40	14,40
--	------	------	-------	--------------

Tabulka 4.12 Koeficienty zvětšení a linearitý přispívá k nejistotě měření osy Z pro 20 \times

Etalon	U_{error}, nm	U_{repeat}, nm	$U_{traceability}$, nm	u_{T-z}, nm
TH 4.875μm	0,11	0,01	195,00	195,00
TH 15892, 2,47μm	0,02	0,01	99,48	99,40
TH15892 - 0,36μm	0,01	0,01	14,40	14,40

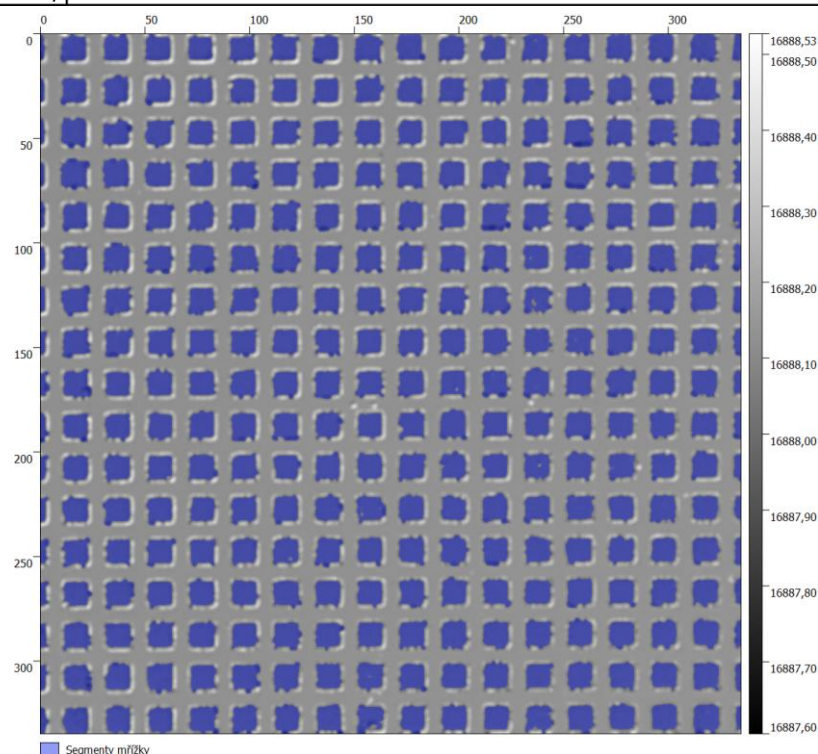
Tabulka 4.13 Koeficienty zvětšení a linearitý přispívá k nejistotě měření osy Z pro 50 \times

Etalon	U_{error}, nm	U_{repeat}, nm	$U_{traceability}$, nm	u_{T-z}, nm
TH 4.875μm	0,04	0,01	19,50	195,01
TH 15892, 2,47μm	0,05	0,01	99,52	99,52
TH15892 - 0,36μm	0,01	0,01	14,41	14,45

4.5 Kalibrace os X a Y

Obdobně jako při kalibraci osy Z, ale s jiným etalonem, mohou být kalibrovány osy X a Y. Koeficienty zvětšení αX a αY , chyby linearitý lX a lY a odchylku kolmosti Δ_{PER} lze měřit pomocí etalonu typu ACG (viz obrázek 4.14). Pro měření zvětšení a linearitý bočních os může být použito vyhodnocení poloh těžišť čtverců křížové mřížky. Odchylka kolmosti os X a Y může být určena měřením úhlu mezi dvěma nominálně ortogonálními řadami čtvercových otvorů. Orientace každé řady čtvercových otvorů může být vypočtena přeložením přímky těžištěmi odpovídajících čtverců. Naměřená topografie by měla být vyrovnána. Pro izolaci čtvercových otvorů by měl být použit algoritmus identifikace prvku. Vzhledem k tomu, že TalyMap neobsahuje požadovanou funkci výpočtu poloh čtverců, byl pro tuto kalibraci použit software Gwyddon [6].

Obrázek 4.14 ukazuje naměřenou topografii po použití vyrovnání a identifikování jednotlivých prvků mřížky.

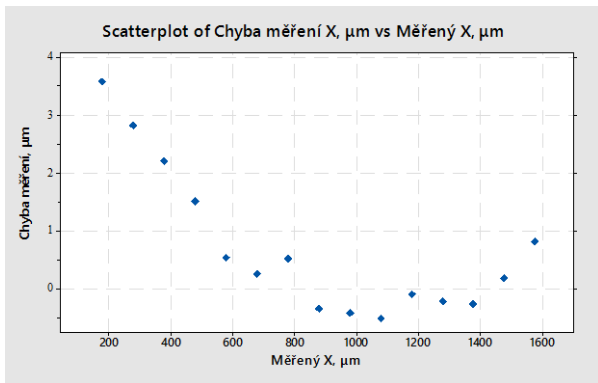


Obrázek 4.14 Křížová mřížka 20 μ m

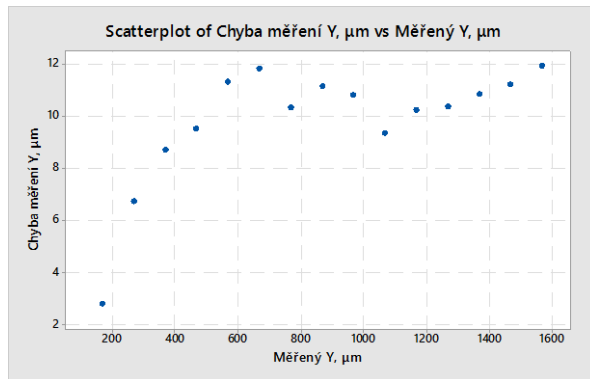
Aby se minimalizoval vzájemný vliv os X a Y , byly křížové mřížky orientovány tak, že řady čtverců byly co nejvíce rovnoběžné s osami X a Y . Maximální 5° vychýlení osy křížové mřížky od osy X nebo Y zkoušeného přístroje má pouze nepatrný účinek, pokud jde o příspěvek jedné osy k nejistotě měření ve druhé ose. To neznamená, že příspěvek jedné osy, například osy Y , musí být úplně vyloučen z měření křížové mřížky podél druhé osy, např. osy X a naopak. Délka podél jedné z os se musí vypočítat pomocí měření v obou osách najednou [6].

Naměřené topografie byly filtrované pomocí Gaussova filtru s cut-off rovným desetina jmenovitých rozměrů rozteče mřížky. Tímto způsobem byl minimalizován účinek šumu a případných chyb snímání [6].

Výsledné hodnoty α_X , α_Y , l_X a l_Y pro zvětšovací objektiv o velikosti 10 \times jsou uvedené na obrázcích 4.15 a 4.16. Standardní chybové tečky jsou kombinací Y reprodukovatelnosti měření a kalibrační standardní nejistoty etalonu.

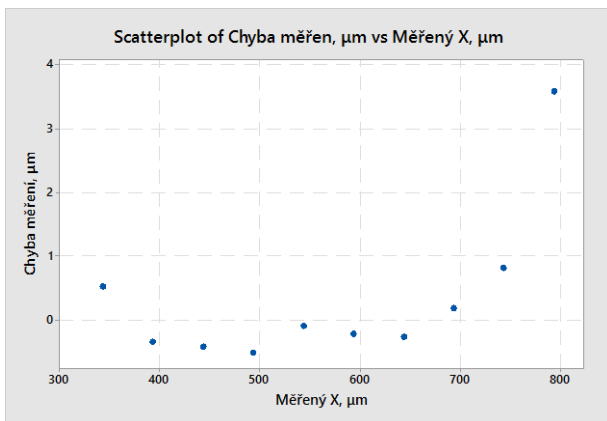


Obrázek 4.15 Graf αY a $l Y$ výsledků kalibrace přístroje vybaveného 10 \times zvětšovacím objektivem - standardní chyba měření

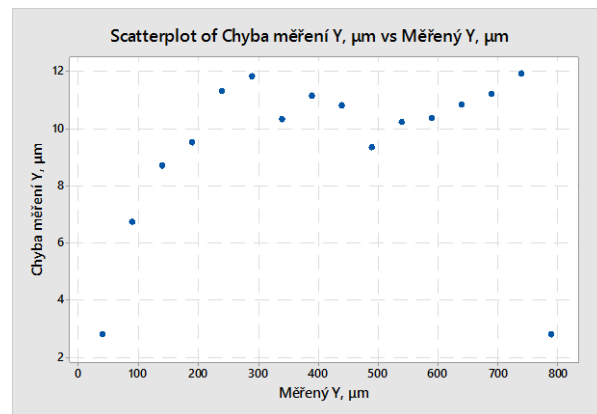


Obrázek 4.16 Graf αY a $l Y$ výsledků kalibrace přístroje vybaveného 10 \times zvětšovacím objektivem - standardní chyba měření

Obrázky 4.17 a 4.18 popisuje výsledky kalibrace αX , αY , $l X$ a $l Y$ pro zvětšovací objektiv o velikosti 20 \times .

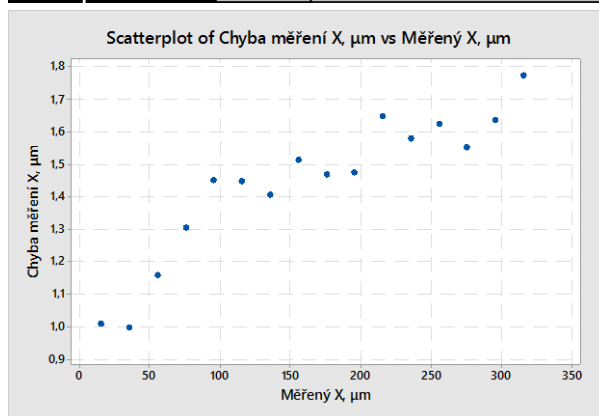


Obrázek 4.17 Graf αY a $l Y$ výsledků kalibrace přístroje vybaveného 20 \times zvětšovacím objektivem - standardní chyba měření

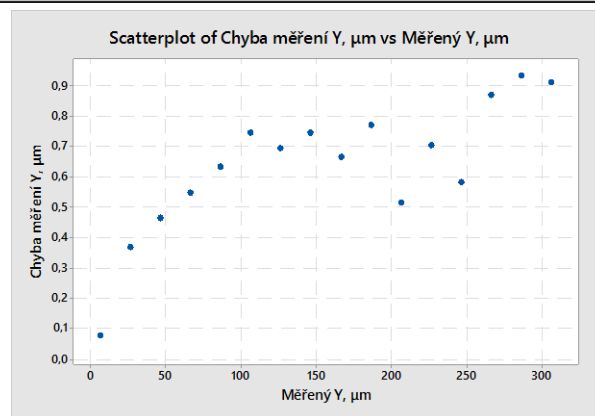


Obrázek 4.18 Graf αY a $l Y$ výsledků kalibrace přístroje vybaveného 20 \times zvětšovacím objektivem - standardní chyba měření

Výsledky kalibrace αX , αY , $l X$ a $l Y$ pro zvětšovací objektiv o velikosti 50 \times s popisem závislosti chyby měření X a Z od měřené veličiny X a Z uvedeny na obrázcích 4.19 a 4.20



Obrázek 4.19 Graf α_Y a I_Y výsledků kalibrace přístroje vybaveného 50× zvětšovacími objektivem - standardní chyba měření



Obrázek 4.20 Graf α_Y a I_Y výsledků kalibrace přístroje vybaveného 50× zvětšovacími objektivem - standardní chyba měření

Chyby linearit a zvětšení jsou menší nebo alespoň srovnatelné s velikostí pixelů nebo optickým rozlišením přístroje [6].

Podrobné výsledky kalibrace os X a Y jsou uvedené v Příloze C v tabulkách C.1, C.2 a C.3.

4.5.1 Výpočet nejistoty

Vypočet nejistot měření, spojených s měřeními X a Y , je uveden v tabulkách 4.14, 4.15 a 4.16 odpovídající 50×, 20× a 10× objektivům.

Tabulka 4.14 Koefficienty zvětšení a linearit a příspěvky k nejistotě měření os XY objektivu 10×

Nominální hodnota, μm	$u_{error}, \mu\text{m}$		$u_{repeat}, \mu\text{m}$		$u_{T-x}, \mu\text{m}$	$u_{T-y}, \mu\text{m}$
	X	Y	X	Y		
172,5855	56,3306	56,5925	0,7158	0,7662	56,4770	56,7389
272,5855	89,9168	88,6126	0,6543	1,1322	90,0081	88,7101
372,5855	123,4595	121,2892	0,4800	0,8259	123,5253	121,3579
472,5855	157,0232	154,3573	0,3775	0,3257	157,0746	154,4095
572,5855	190,6783	187,0840	0,3113	0,3718	190,7205	187,1272
672,5855	224,1064	220,2469	0,3709	0,4846	224,1424	220,2837
772,5855	257,3525	254,0830	0,5417	0,2060	257,3841	254,1146
872,5855	290,9717	287,1384	0,2268	0,3886	290,9993	287,1665
972,5855	324,3352	320,5904	0,1873	0,3434	324,3599	320,6155
1072,5855	357,6977	354,4119	0,4609	0,4891	357,7204	354,4348
1172,5855	390,8900	387,4534	0,4795	0,3635	390,9108	387,4742
1272,5855	424,2642	420,7392	0,5394	0,4455	424,2834	420,7585
1372,5855	457,6173	453,9109	0,5615	0,4214	457,6351	453,9287
1472,5855	490,7971	487,1159	0,6579	0,4925	490,8138	487,1325
1572,5855	523,9206	520,2167	0,7268	0,5362	523,9364	520,2324

$u_{\text{traceability}}$ pro daný objektiv byl odhadnut jako 4% podíl jmenovité rozteče mřížky, v tomto případě 4 μm .

Tabulka 4.15 Koeficienty zvětšení a linearity a příspěvky k nejistotě měření os XY objektivu 20 \times

Nominální hodnota, μm	$u_{\text{error}}, \mu\text{m}$		$u_{\text{repeat}}, \mu\text{m}$		$u_{T-x}, \mu\text{m}$	$u_{T-y}, \mu\text{m}$
	X	Y	X	Y		
41,7805	13,1003	13,9222	0,4826	0,2542	13,2609	14,0674
91,7805	29,7318	30,5457	0,4366	0,3140	29,8022	30,6127
141,7805	46,3476	47,2858	0,4961	0,2296	46,3934	47,3286
191,7805	62,9638	63,9531	0,3850	0,2986	62,9967	63,9850
241,7805	79,5890	80,6383	0,4547	0,2478	79,6155	80,6634
291,7805	96,2862	97,3267	0,4595	0,3063	96,3080	97,3477
341,7805	112,9928	114,0650	0,3904	0,2575	113,0112	114,0829
391,7805	129,8165	130,8130	0,4159	0,3011	129,8326	130,8286
441,7805	146,5859	147,5915	0,3799	0,3385	146,6000	147,6054
491,7805	163,3972	164,4083	0,3069	0,3597	163,4097	164,4208
541,7805	180,1042	181,1430	0,3176	0,4014	180,1155	181,1545
591,7805	196,8152	197,8918	0,3786	0,4460	196,8257	197,9024
641,7805	213,5023	214,4992	0,4097	0,4795	213,5121	214,5091
691,7805	230,2059	231,1638	0,4707	0,4789	230,2151	231,1730
741,7805	246,9163	247,7379	0,3987	0,4756	246,9247	247,7464
791,7805	263,5716	264,4559	0,4074	0,5013	263,5795	264,4639

$u_{\text{traceability}}$ pro daný objektiv byl odhadnut dle postupu popsaného pro objektiv s 10 \times zvětšením, s hodnotou 2 μm .

Tabulka 4.16 Koeficienty zvětšení a linearity a příspěvky k nejistotě měření os XY objektivu 50 \times

Nominální hodnota, μm	$u_{\text{error}}, \mu\text{m}$		$u_{\text{repeat}}, \mu\text{m}$		$u_{T-x}, \mu\text{m}$	$u_{T-y}, \mu\text{m}$
	X	Y	X	Y		
11,1450	3,3788	3,6891	0,3060	0,1385	3,4857	3,7774
31,1450	10,0494	10,2584	0,2435	0,0921	10,0841	10,2899
51,1450	16,6617	16,8931	0,2293	0,1274	16,6825	16,9125
71,1450	23,2797	23,5320	0,1782	0,1732	23,2942	23,5462
91,1450	29,8978	30,1702	0,2091	0,1853	29,9092	30,1813
111,1450	36,5651	36,7994	0,2068	0,1925	36,5744	36,8086
131,1450	43,2463	43,4832	0,2399	0,1654	43,2543	43,4908
151,1450	49,8764	50,1332	0,1804	0,1548	49,8831	50,1399
171,1450	56,5583	56,8258	0,2063	0,1578	56,5644	56,8316
191,1450	63,2226	63,4578	0,1928	0,3083	63,2280	63,4636
211,1450	69,8316	70,2090	0,1536	0,1756	69,8364	70,2137
231,1450	76,5219	76,8134	0,2467	0,1930	76,5265	76,8179
251,1450	83,1727	83,5206	0,1919	0,5069	83,1768	83,5260
271,1450	89,8641	90,0913	0,2451	0,1489	89,8680	90,0950

291,1450	96,5026	96,7367	0,2364	0,1945	96,5062	96,7402
311,1450	103,1231	103,4104	0,1920	0,2073	103,1263	103,4137

$u_{\text{traceability}}$ pro daný objektiv byl analogicky jako u předešlých objektivů odhadnut jako 0,8 μm .

U objektivu s 10 \times zvětšením dosáhla maximální u_{T-x} a u_{T-y} 523 μm . U objektivu s 20 \times zvětšením dosáhla maximální hodnota u_{T-x} a u_{T-y} 265 μm a pro objektiv 50 \times je maximální hodnota u_{T-x} a u_{T-y} 103 μm .

4.6 Rozlišení

Měření rozlišení osy Z bylo provedeno na drážkách, které jsou několikrát širší než boční rozlišení přístroje, čímž se vyloučí vliv bočního rozlišení na měření hloubky drážek. Při měření reálné geometrie však může mít boční rozlišení významný vliv na měření v ose Z.

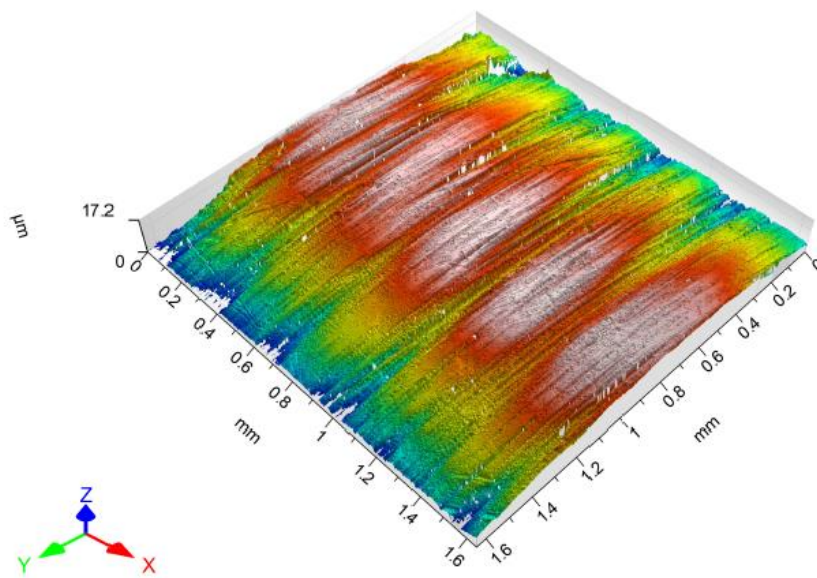
U běžných 2D mikroskopů se jako rozlišení označuje nejmenší boční vzdálenost mezi dvěma body, při které je lze od sebe rozlišit. Nicméně při měření plošné textury povrchu může vzdálenost mezi dvěma body ovlivnit jejich vnímaný výškový rozdíl. Proto je nutné rozlišení 3D optických přístrojů posuzovat jinak. Normou ISO 25178-3 byl proto zaveden pojem boční mezní hodnota. Tento pojem označuje periodu sinusoidy, při které je zaznamenán pokles optické odezvy o 50% [28]. Teoreticky je hodnota bočního mezní hodnoty minimálně dvojnásobkem hodnoty optického bočního rozlišení, stanoveného pomocí Rayleighova kritéria [6].

Pro komplexní posouzení rozlišení 3D optických profilometrů způsobem využívajícím boční mezní hodnotu lze použít etalony ASG. ASG etalony jsou etalony hvězdicových drážek. Výhodou použití typu ASG etalonů namísto tradiční mřížky je to, že ASG poskytuje kontinuální rozsah různých roztečí. Hvězdy jsou často posuzovány pomocí kruhových profilů různých průměrů se středem ve vrcholu hvězdy [6]. Ale obtížnost tkví v tom, že ve středu tento etalon musí být co nejpřesnější, aby byla zajištěna přesná kalibrace přístrojů s objektivy s velmi vysokým zvětšením. To vše vede k zvýšení ceny etalonu.

Hvězdicový etalon není dostupný v laboratoři praktické a experimentálně metrologie FSI VUT, a proto kalibrace prostorového rozlišení přístroje nemohla být provedena.

5 URČENÍ NEJISTOTY MĚŘENÍ VYBRANÝCH PARAMETRŮ TEXTURY POVRCHU

V následující kapitole je uveden příklad využití výsledků kalibrace pro určení nejistoty konkrétního měření. Měření bylo provedeno na broušeném vzorku číslo 467 (Obr. 5.1) ze vzorkovnice drsnosti povrchu z bývalé Zbrojovky Brno dostupné v laboratoři.



Obrázek 5.1 3D model povrchu vzorku č. 467, objektiv 10×

Měření bylo provedeno ve třech různých polohách vzorku. Vzhledem k tomu, že vzorek nemá rovinný povrch, bylo v softwaru TalyMap provedeno vyrovnání povrchu a odstranění jmenovitého tvaru válce. Z výsledných hodnot parametrů Sq , Sa a Sz byly vypočtené průměry a směrodatné odchylky a vypočtené parametry pro objektivy 10×, 20× a 50× jsou uvedené v tabulce 5.1.

Tabulka 5.1 Vypočet nejistoty typu A z tří měření

č.m.	Sa, µm	Sq, µm	Sz, µm
10x			
1	0,8408	1,0858	8,2081
2	0,8053	1,0602	9,2142
3	0,8263	1,1955	10,5030
Průměr	0,8241	1,1138	9,3084
uA	0,0103	0,0415	0,6641
20x			
1	0,9148	1,1527	6,6837
2	0,7322	0,9214	10,5140
3	0,8635	0,9049	6,4846
Průměr	0,8369	0,9930	7,8941
uA	0,0543	0,0799	1,3112

50x			
1	0,4811	0,6222	5,3976
2	0,7821	0,9356	5,1355
3	0,6472	0,8542	6,5180
Průměr	0,6368	0,8040	5,6837
uA	0,0870	0,0938	0,4239

Shrnutí výsledků kalibrace je uvedeno v tabulkách 5.2, 5.3 a 5.4.

Tabulka 5.2 Základní komponenty celkové nejistoty pro objektiv se zvětšením 10×

Součást nejistoty (jednotka)	Komentáře	Hodnota / jednotka	Koeficient citlivosti / Jednotka	Příspěvek k nejistotě / jednotka
Měření šumu a odchyly rovinnosti, nm	Použitá metoda: <i>Ploché měření</i> Použité etalony: <i>Pro šum - Taylor Hobson,</i> <i>Pro rovinnost - malý válec</i> Kalibrovaný: <i>Ne</i>	0,0002	0,1417	0,00003
Koeficient zesílení a linearita osy Z, nm	Použitá metoda: <i>Ploché měření</i> Použité etalony: <i>Taylor Hobson 4.875μm</i> Kalibrovaný: <i>Ne</i>	8,6039	1,0000	8,60390
Nejistota typu A, μm	Vzorkovnice drsnosti povrchu AMV 467 broušený			0,01031

Tabulka 5.3 Základní komponenty celkové nejistoty pro objektiv se zvětšením 20×

Součást nejistoty (jednotka)	Komentáře	Hodnota / jednotka	Koeficient citlivosti / Jednotka	Příspěvek k nejistotě / jednotka
Měření šumu a odchyly rovinnosti, nm	Použitá metoda: <i>Ploché měření</i> Použité etalony: <i>Pro šum - Taylor Hobson</i> <i>Pro rovinnost - malý válec</i> Kalibrovaný: <i>Ne</i>	0,0002	0,1056	0,00002
Koeficient zesílení a linearita osy Z, nm	Použitá metoda: <i>Ploché měření</i> Použité etalony: <i>Taylor Hobson 4.875μm,</i> Kalibrovaný: <i>Ne</i>	3,4552	1,0000	3,45520
Nejistota typu A, μm	Vzorkovnice drsnosti povrchu AMV 467 broušený			0,05437

Tabulka 5.4 Základní komponenty celkové nejistoty pro objektiv se zvětšením 50×

Součást nejistoty (jednotka)	Komentáře	Hodnota / jednotka	Koeficient citlivosti / Jednotka	Příspěvek k nejistotě / jednotka
Měření šumu a odchylky rovinnosti, nm	Použitá metoda: <i>Ploché měření</i> Použité etalony: <i>Pro šum - Taylor Hobson</i> <i>Pro rovinnost - malý válec</i> Kalibrovaný: <i>Ne</i>	0,0002	0,0815	0,00002
Koeficient zesílení a linearita osy Z, nm	Použitá metoda: <i>Ploché měření</i> Použité etalony: <i>Taylor Hobson 4.875μm</i> Kalibrovaný: <i>Ne</i>	8,5066	1,0000	8,50660
Nejistota typu A, μm	Vzorkovnice drsnosti povrchu AMV 467 broušený			0,09387

5.1 Výpočet celkové nejistoty pro parametr Sq

Pomocí vypočtené nejistoty typu A a složek, z kterých se skládá nejistota typu B, byla stanovena celková nejistota pro parametr Sq .

Nejistota typu B pro Sq spočítá

$$u_B = \frac{S_a}{S_q} \sqrt{u_{NF}^2 + u_{T-z}^2} \quad (13)$$

Kombinovaná nejistota Sq :

Pro objektiv se zvětšením 10×:

$$u_c^2 = u_A^2 + u_B^2 = \left[0,01031^2 + \frac{0,82415^2}{1,11383^2} (0,195^2 + 0,0086^2) \right] = 0,0407^2 \mu m^2 \quad (14)$$

Pro objektiv se zvětšením 20×:

$$u_c^2 = u_A^2 + u_B^2 = \left[0,05437^2 + \frac{0,83691^2}{0,99300^2} (0,195^2 + 0,00345^2) \right] = 0,0030^2 \mu m^2 \quad (15)$$

Pro objektiv se zvětšením 50×:

$$u_c^2 = u_A^2 + u_B^2 = \left[0,08704^2 + \frac{0,63684^2}{0,80404^2} (0,195^2 + 0,00850^2) \right] = 0,0089^2 \mu m^2 \quad (16)$$

5.1.1 Rozšířená nejistota Sq

Výpočet rozšířené nejistoty vyžaduje hodnotu faktoru pokrytí (k) s požadovanou úrovní spolehlivosti. Pro hladinu spolehlivosti 95% se $k=2$.

Po zvolení hodnot k lze vypočítat rozšířenou nejistotu pro parametr Sq :

Pro objektiv se zvětšením 10×:

$$S_q = (1,1138 \pm 0,0941)\mu m, (k = 2) \quad (17)$$

Pro objektiv se zvětšením 20×:

$$S_q = (0,9930 \pm 0,0060)\mu m, (k = 2) \quad (18)$$

Pro objektiv se zvětšením 50×:

$$S_q = (0,8040 \pm 0,0178)\mu m, (k = 2) \quad (19)$$

5.2 Výpočet celkové nejistoty pro parametr S_z

Pomocí vypočtené nejistoty typu A a složek, z kterých se skládá nejistota typu B, byla stanovena celková nejistota pro parametr S_z .

Nejistota typu B pro S_z spočítá

$$u_B = \sqrt{u_{NF}^2 + u_{T-z}^2} \quad (20)$$

Kombinovaná nejistota S_z :

Pro objektiv se zvětšením 10×:

$$u_c^2 = u_A^2 + u_B^2 = [0,01031^2 + (0,195^2 + 0,0086^2)] = 0,0382^2 \mu m^2 \quad (21)$$

Pro objektiv se zvětšením 20×:

$$u_c^2 = u_A^2 + u_B^2 = [0,05437^2 + (0,195^2 + 0,00345^2)] = 0,0409^2 \mu m^2 \quad (22)$$

Pro objektiv se zvětšením 50×:

$$u_c^2 = u_A^2 + u_B^2 = [0,08704^2 + (0,195^2 + 0,00850^2)] = 0,0456^2 \mu m^2 \quad (23)$$

5.2.1 Rozšířená nejistota S_z

Výpočet rozšířené nejistoty vyžaduje hodnotu faktoru pokrytí (k) s požadovanou úrovní spolehlivosti. Pro hladinu spolehlivosti 95% se $k=2$.

Po zvolení hodnot k lze vypočítat rozšířenou nejistotu pro parametr S_z :

Výpočet rozšířené nejistoty S_z :

Pro objektiv 10×:

$$S_z = (9,3084 \pm 0,0814)\mu m, (k = 2) \quad (24)$$

Pro objektiv 20×:

$$S_z = (7,8941 \pm 0,0818)\mu m, (k = 2) \quad (25)$$

Pro objektiv 50×:

$$S_z = (5,6837 \pm 0,0912)\mu m, (k = 2) \quad (26)$$

ZÁVĚR

V této diplomové práci se rozepsán proces kalibrace koherenčního rastrovacího interferometru Talysurf CCI Lite pro objektivy se zvětšením 10×, 20× a 50×. Cílem práce bylo popsat tento přístroj a kroky jeho kalibrace a na základě těchto informací provést samotnou kalibraci.

První kapitola objasňuje základní pojmy z oblasti hodnocení textury povrchu. Je v ní popsána profilová metoda, její parametry a kroky jejich vyhodnocení. Obdobným způsobem je charakterizována i plošná metoda.

První z cílů diplomové práce je splněn v kapitole 2. V ní je popsán přístroj Talysurf CCI Lite, jeho funkční princip, konstrukce a obsluha. Dále jsou v ní uvedené informace o softwarových nástrojích použitých pro zpracování naměřených dat.

Druhým cílem byl popis kalibračních kroků. Ten je uveden v kapitole 3. Vzhledem k tomu, že zatím neexistuje mezinárodní norma, která by stanovila přesné kroky procesu kalibrace, bylo nutné tento postup popsat na základě jiných zdrojů. Jako první byl popsán postup kalibrace stanovený výrobcem přístroje, tak jak jej publikoval Barman. Ukázalo se, že tento postup nevede ke stanovení úplného výsledku měření včetně nejistoty a tedy nesplňuje definici *kalibrace* dle Mezinárodního metrologického slovníku. Z tohoto důvodu byl dále popsán postup kalibrace dle anglického NPL, který již obsahuje i kroky vedoucí ke stanovení nejistoty měření.

Posledním a hlavním cílem práce bylo provedení kalibrace přístroje Talysurf CCI Lite v Laboratoři praktické a experimentální metrologie FSI VUT. Splnění tohoto cíle je popsáno v kapitole 4. Byl využit kalibrační postup vycházející s postupu dle NPL, přizpůsoben místním podmínkám a možnostem.

Jako první byla provedena kalibrace šumu přístroje. NPL doporučuje provádět měření šumu na etalonu s maximální výškou posuzované plochy 30nm bez použití filtrů, ale takový etalon nebyl dostupný. Proto bylo provedeno měření dle postupů nezávislých na měření topografií. Pro ověření nezávislosti výsledků na topografii byla měřena rovná plocha etalonu pro kalibraci výšky stupně Taylor Hobson a povrchy etalonů rozteče Mahr a Somet. Rovněž byly použity obě metody – metoda odečítání po sobě následujících měření a metoda průměrování dvou, čtyř, osmi nebo šestnácti měření.

Metoda průměrování vychází z předpokladu, že průměr z několika měření musí být menší než výsledek měření bez průměrování. Tento rozdíl by měl růst s počtem průměrovaných měření. V některých případech však naměřené průměrované hodnoty překonaly hodnoty bez průměrovaných. Toto může být způsobeno tím, že měření šumu s průměrováním vyžaduje více času, za který mohou vlivy prostředí (vibrace, teplotní změny) způsobit odchylky měření. Tyto vlivy mohou být v Laboratoři praktické a experimentální metrologie významné z důvodu aktuálního nedokonalého stavu laboratorního prostředí.

Pro jednotlivé objektivy byly naměřeny následující hodnoty šumu vyjádřené metodou průměrování jako Sq_{noise} pro etalon Taylor Hobson: pro objektiv se zvětšením 10× je $Sq_{noise} = 0,2768\text{nm}$, pro objektiv se zvětšením 20× $Sq_{noise} = 0,5354\text{nm}$ a pro objektiv 50× $Sq_{noise} = 0,4316\text{nm}$ a pro etalony Mahr a Somet Sq_{noise} : pro objektiv se zvětšením 10× nebylo

možné hodnotu stanovit, pro objektiv se zvětšením 20× byla výsledná hodnota $Sq_{noise} = 0,0019 \mu\text{m}$ a pro objektiv 50× $Sq_{noise} = 0,0046 \mu\text{m}$.

Metodou odečítání byl dosažen Sq_{noise} pro etalon Taylor Hobson pro objektiv se zvětšením 10× je $Sq_{noise} = 0,2135\text{nm}$, pro objektiv se zvětšením 20× $Sq_{noise} = 0,9384\text{nm}$ a pro objektiv 50× $Sq_{noise} = 0,6691\text{nm}$ a pro etalony Mahr a Somet Sq_{noise} : pro objektiv se zvětšením 10× je $Sq_{noise} = 0,0545\mu\text{m}$, pro objektiv se zvětšením 20× $Sq_{noise} = 0,0543 \mu\text{m}$ a pro objektiv 50× $Sq_{noise} = 0,0756 \mu\text{m}$.

Dále bylo provedeno měření rovinnosti. To slouží k posouzení kvality referenční plochy přístroje. Může být negativně ovlivněno chybami optických komponentů, prachem, škrábanci, nečistotou apod. Ty vedou k výskytu významných výškových odchylek naměřené topografie, na které je parametr Sq velice citlivý. Aby byl odstraněn jejich vliv na měření, byla měření provedena na různých místech na povrchu etalonu a zpracováním z nich byly odstraněny odlehle hodnoty. Měřením malého válci byly dosaženy: pro objektiv 10 je $Sz = 29,5394 \text{ nm}$, pro zvětšení 20× hodnota Sz je $10,9763 \text{ nm}$, $Sz = 28,8222 \text{ nm}$ pro objektiv zvětšením 50×.

Z výsledků měření měřicího šumu a rovinnosti referenční plochy byly stanoveny jejich příspěvky k nejistotě měření pro každý objektiv. Při měření na malém válci a na etalonu Taylor Hobson byl příspěvek šumu a rovinnosti k nejistotě U_{nf} pro 10× objektiv je $8,6039\text{nm}$, pro objektiv 20× $U_{nf} = 3,4552\text{nm}$ a pro 50× objektiv $8,5066\text{nm}$. Při měření na malém válci a na etalonech Mahr a Somet byl příspěvek šumu a rovinnosti k nejistotě U_{nf} pro 10× objektiv je -nm, pro objektiv 20× $U_{nf} = 0,0034 \mu\text{m}$ a pro 50× objektiv $0,0104 \mu\text{m}$.

Následně byla provedena kalibrace v ose Z pomocí několika etalonů výšky stupně. Byl určen koeficient zvětšení αZ každého z objektivů. Pro objektiv se zvětšením 10×: na etalonu Taylor Hobson $4,875\mu\text{m}$ je $195,00 \text{ nm}$, pro Taylor Hobson $2,47 \mu\text{m}$ je $99,48 \text{ nm}$, pro etalon Taylor Hobson $0,36 \mu\text{m}$ je $14,40 \text{ nm}$. Pro objektiv se zvětšením 20×: na etalonu Taylor Hobson $4,875\mu\text{m}$ je $195,00 \text{ nm}$, pro Taylor Hobson $2,47 \mu\text{m}$ je $99,40 \text{ nm}$, pro etalon Taylor Hobson $0,36 \mu\text{m}$ je $14,40 \text{ nm}$. Pro objektiv se zvětšením 50×: na etalonu Taylor Hobson $4,875\mu\text{m}$ je $195,04 \text{ nm}$, pro Taylor Hobson $2,47 \mu\text{m}$ je $99,52 \text{ nm}$, pro etalon Taylor Hobson $0,36 \mu\text{m}$ je $14,45 \text{ nm}$.

Chyba linearity Iz nebyla vyhodnocena z důvodu nedostupnosti vhodného polohovacího vybavení.

Pro kalibraci os X a Y byly měřené polohy těžišť čtverců etalonové mřížky. Měřením etalonu od výrobce bylo zjištěno, že chyby linearity a zvětšení jsou menší nebo alespoň srovnatelné s velikostí pixelů nebo optickým rozlišením přístroje. Pro objektiv se zvětšením 10× maximální u_{T-x} a u_{T-y} je $523 \mu\text{m}$, pro objektiv se zvětšením 20× maximální u_{T-x} a u_{T-y} je $265 \mu\text{m}$ a pro objektiv 50× maximální u_{T-x} a u_{T-y} je $103 \mu\text{m}$.

Vyhodnocení prostorového rozlišení dle postupu NPL nebylo možné vykonat z důvodu nedostupnosti vhodného etalonu. Rozlišení přispívá k nejistotě měření v osách X a Y, které nejsou klíčové pro vyhodnocení parametrů použitých v této práci. Proto byl jeho příspěvek k nejistotě zanedbán.

Poslední kapitola demonstruje využití výsledků kalibrace pro určení nejistoty měření plošných parametrů textury povrchu na vzorku broušeného povrchu. Nejistoty jsou zde určeny pro parametry Sq a Sz .

S_q pro objektiv se zvětšením $10\times$ je $S_q = (1,1138 \pm 0,0941)\mu m$, pro $20\times$ je $S_q = (0,9930 \pm 0,0060)\mu m$ a pro $50\times$ je $S_q = (0,8040 \pm 0,0178)\mu m$.

S_z pro objektiv se zvětšením $10\times$ je $S_z = (9,3084 \pm 0,0814)\mu m$, pro objektiv $20\times$ je $S_z = (7,8941 \pm 0,0818)\mu m$ a pro $50\times$ je $S_z = (5,6837 \pm 0,0912)\mu m$.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BARKER, Alexander, Wahyudin P. SYAM a Richard LEACH. Measurement noise of a coherence scanning interferometer in an industrial environment. *31th ASPE Annual Meeting*. Portlan, Oregon, USA, 2016, **2016**(-), 6. Dostupné z: http://eprints.nottingham.ac.uk/38454/1/Measurement%20of%20CSI%20noise%20in%20an%20industrial%20environment_extended%20abstract_ASPE%202016%20ver%202013-FINAL.pdf
- [2] BARMAN, Swapan. Performance Verification of High Precision Optical 3D Surface Profiler through Error Measurement. *2nd National Conference on Advances in Metrology (AdMet-2012)*, At Feb. India, 2012, -(Paper No. SM 001), 6. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/272997873_Performance_Verification_of_High_Precision_Optical_3D_Surface_Profiler_through_Error_Measurement?sg=vbqS10okTF16FTCIU0i2upoWTOdKMLB_WzBR34tXIRmcSXksQKXI5R1OjbuX9-sWNnf1h9FInnc514HaxwFA4w
- [3] BRENNAN, James K., Andrew CRAMPTON, X JIANG, Richard K LEACH a P HARRIS. Approximation of surface texture profiles. *Journal of Physics: Conference Series*. Institute of Physics Publishing, 2005, **2005**(13), 5. DOI: 10.1088/1742-6596/13/1/062. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/13/1/062/pdf>
- [4] BUMBÁLEK, Bohumil, Vladimír ODVODY a Bohuslav OŠŤÁDAL. *Drsnost povrchu*. 1989. Praha: SNTL, 1989. ISBN nepřiděleno.
- [5] Coherence Scanning Interferometry. DE GROOT, Peter. *Optical Measurement of Surface Topography*. 1. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2011, s. 187-208. DOI: 10.1007/978-3-642-12012-1_9. ISBN 978-3-642-12012-1. Dostupné z: https://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwif_9O0l_XTAhVBD5oKHcpCCwwQFggmMAA&url=https%3A%2F%2Fwww.zygo.com%2Flibrary%2Fpapers%2FISBN3642120113_Ch9.pdf&usq=AFQjCNEu3ACaaTyhcqhdsqz3H2G3XHBTTg&sig2=g0YfqRZqSiHtcionS1AbeQ
- [6] GIUSCA, Claudiu L a Richard K LEACH. Calibration of the metrological characteristics of Coherence Scanning Interferometers (CSI) and Phase Shifting Interferometers (PSI). *Measurement Good Practice Guide*. 2013, **2013**(217), 72. ISSN 1368-6550. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/263238255_Calibration_of_the_metrological_characteristics_of_Coherence_Scanning_Interferometers_CSI_and_Phase_Shifting_Interferometers_PSI
- [7] GIUSCA, Claudiu, Han HAITJEMA, Chris J. EVANS a X. JIANG. Calibration and verification of areal surface texture measuring instruments. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2015, -(Volume 64, 2), 797–813. DOI: 10.1016/j.cirp.2015.05.010. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/278242426_Calibration_and_verification_of_areal_surface_texture_measuring_instruments
- [8] GIUSCA, Claudiu, Richard K LEACH, Frank HELERY a Tadas GUTAUSKAS. Calibration of the geometrical characteristics of areal surface topography measuring instruments. *Journal of Physics: Conference Series*. 2011, **2011**(311), 7. DOI: 10.1088/1742-6596/311/1/012005. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/230919297_Calibration_of_the_geometrical_characteristics_of_areal_surface_topography_measuring_instruments

- [9] GIUSCA, Claudiu, Richard LEACH, Franck HELARY, Tadas GUTAUSKAS a Lakshmi NIMISHAKAVI. Calibration of the scales of areal surface topography-measuring instruments: part 1. Measurement noise and residual flatness. *MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY*. IOP PUBLISHING, 2012, **2012**(23), 11. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/230993635_Calibration_of_the_scales_of_areal_surface_topography-measuring_instruments_Part_1_Measurement_noise_and_residual_flatness
- [10] GIUSCA, Claudiu, Richard LEACH a Franck HELARY. Calibration of the scales of areal surface topography measuring instruments: Part 2. Amplification, linearity and squareness. *Measurement Science and Technology*. 2012, **2012**(23), 12. DOI: 10.1088/0957-0233/23/6/065005. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/231085395_Calibration_of_the_scales_of_areal_surface_topography_measuring_instruments_Part_2_Amplification_linearity_and_squareness
- [11] HARČARÍK, Ing. Matej. *Měření parametrů textury povrchu výrobků kontaktní a bezkontaktní metodou: Diplomová práce* [online]. Brno, 2014 [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=127372. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Doc. Ing. Róbert Jankových, CSc.
- [12] JANKOVÝCH, Robert. *Metrologie textury povrchu* [autor]. Brno, 2013 [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: -. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [13] KAPLONEK, Wojciech a Czeslaw LUKIANOWICZ. Coherence Correlation Interferometry in Surface Topography Measurements. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2012, **2012**(86(10):1-27), 27. DOI: 10.5772/35059. Dostupné z: <http://cdn.intechopen.com/pdfs/33093.pdf>
- [14] KUBEČEK DRSC., Prof. Ing. Václav. *4. přednáška Momenty intenzity a šíření svazků, stigmatické a astigmatické svazky. Kvalita svazku. Koherence*. [online]. Praha, 2012 [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: <http://people.fjfi.cvut.cz/kubecvac/ORE/P4-ORE.pdf>. FJFI ČVUT. <http://people.fjfi.cvut.cz/kubecvac/ORE/P4-ORE.pdf>
- [15] LEACH, Richard K. The Measurement of Surface Texture using Stylus Instruments. *Good Practice Guide*. Hampton Road, Teddington, Middlesex,,: National Physical Laboratory, 2014, **2**(37), 112. ISSN 1368-6550. Dostupné z: http://publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/mgpg37.pdf
- [16] LEACH, Richard K. *Optical Measurement of Surface Topography*. 1. Berlin: 1 Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. ISBN 978-3-642-12011-4. Dostupné z: http://opac.vimaru.edu.vn/edata/EBook/NH2014/CSDL_CS2014_2/HH0048.pdf
- [17] NEMOTO, Kentaro, Kazuhisa YANAGI, Masato AKETAGAWA, Ichiro YOSHIDA, Michimasa UCHIDATE, Takashi MIYAGUCHI a Hideki MARUYAMA. Development of a roughness measurement standard with irregular surface topography for improving 3D surface texture measurement. *MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY*. IOP PUBLISHING, 2009, **-(20)**, 8. DOI: 10.1088/0957-0233/20/8/084023. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/20/8/084023/pdf>
- [18] NOVÁK, Zdeněk. PROSTOROVÉ MĚŘENÍ A HODNOCENÍ TEXTURY POVRCHU PŘÍSTROJI TAYLOR HOBSON Ltd. *Konference kvalita a GPS* [online].

- 2008, -(-), 17 [cit. 2017-05-03]. Dostupné z: http://gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/2_Novak_3D_mereni_textury.pdf
- [19] PETZING, Jon N., Jeremy M. COUPLAND a Richard K. LEACH. The measurement of rough surface topography using coherence scanning interferometry. *NPL Measurement Good Practice Guide*. 2010, -(116), 133. Dostupné z: <https://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/bitstream/2134/13271/3/GPG%2B116v10%5B1%5D.pdf>
- [20] WHITEHOUSE, David J. *Handbook of Surface and Nanometrology, Second Edition*. 2. FL, USA: CRC Press, 2010. ISBN 9781420082012.
- [21] ČSN 01 0115. Mezinárodní metrologický slovník – Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM). 3. Praha: Český metrologický institut, 2008.
- [22] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. 1. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [23] ČSN EN ISO 5436-1. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda; Měřicí etalony – Část 1: Hmotné míry*. 1. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [24] ČSN EN ISO 8785. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Nedokonalosti povrchu - Termíny, definice a parametry*. 1. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [25] ČSN EN ISO 12179. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Kalibrace dotykových (hrotových) přístrojů*. 1. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [26] ČSN EN ISO 25178-6 (014451). *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha - Část 6: Klasifikace metod měření textury povrchu*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [27] ČSN EN ISO 25178-2. *Geometrické specifikace produktu (GPS) – Textura povrchu: Plocha – Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [28] ČSN EN ISO 25178- 3. *Geometrické specifikace produktu (GPS) – Textura povrchu: Plocha – Část 3: Specifikace operátorů*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [29] ČSN EN ISO 25178-604. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha - Část 604: Jmenovité charakteristiky bezdotykových přístrojů (spojité skenovací interferometry)*. Praha. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví: Český normalizační institut, 2015.
- [30] *Talysurf CCI Lite - bezdotykový 3D profilometr*. 2008, -(Lite10-08). TAYLOR HOBSON PRECISION, 2005, -(Lite 03/05). Dostupné z: http://www.taylorhobson.com.br/pdf/113_espec.pdf
- [31] *Talysurf CCI Lite - bezdotykový 3D profilometr*. 2008, -(Lite10-08).
- [32] Gwyddion. *Gwyddion – Free SPM* [online]. Brno: Department of Nanometrology, Czech Metrology Institute., 2016 [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://gwyddion.net/>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1.1 Složky textury povrchu [10]	11
Obrázek 1.2 Prvek profilu [11]	12
Obrázek 1.36 Odvození aritmetického průměru odchylky [15].....	14
Obrázek 1.4 Největší výška profilu (profil drsnosti) [20].....	15
Obrázek 1.5 Strom volby typu filtru dle [28].....	16
Obrázek 1.6 Obraz topografie získaný metodou topografie povrchu [12].....	17
Obrázek 2.1 Metody měření textury povrchu (dle [20])	19
Obrázek 2.2 Obrazy interferenčních proužků na zakřivené ploše y s nízkou koherence osvětlení [5].....	20
Obrázek 2.3 CSI signál pro jeden pixel ukazuje modulační obálku [5].....	21
Obrázek 2.4 Geometrie interference v CSI [5]	21
Obrázek 2.5 Princip koherence korelační interferometrie dle [13].....	23
Obrázek 2.6 Taylor Hobson Talysurf CCI Lite	24
Obrázek 2.7 Princip objektivu Mirau dle [31]	25
Obrázek 2.8 Objektiv 10×	26
Obrázek 2.9 Objektiv 20×	26
Obrázek 2.10 Objektiv 50×	27
Obrázek 2.11 Zjednodušené schéma, které ukazuje odraz světla procházejícího interferenčním objektivem: a) od šikmé rovinného povrchu, b) z povrchu s krokovou výškou, c) od povrchu s šikmým vybráním [13].....	29
Obrázek 3.1 Kalibrační etalon 5 μ m výšky stupně [31].....	31
Obrázek 3.2 Etalon pro příčnou kalibraci všech objektivů [31]	32
Obrázek 3.3 Kalibrační ploché zrcadlo 0,2nm RMS [31].....	32
Obrázek 3.4 Typ drážky D1 dle [23].	34
Obrázek 4.1 Etalon Mahr	41
Obrázek 4.2 3D topografie neprůměřovaného povrchu etalonu Taylor Hobson pro 10× objektiv.....	42
Obrázek 4.3 3D topografie povrchu metody odečítání na etalonu Taylor Hobson pro 10× objektiv	43
Obrázek 4.4 3D topografie povrchu neprůměřovaných hodnot etalonu Somet pro objektiv 10×	44
Obrázek 4.5 3D topografie povrchu metody odečítání na etalonu Somet s objektivem 10×.....	45
Obrázek 4.6 Plochý skleněný válec	46
Obrázek 4.7 Graf popisující kroky pro použití funkce Thresholding (odstranění prachů).....	47
Obrázek 4.8 Topografie povrchu před zpracováním rovinností a výsledek zpracování se zvětšením 10×	48
Obrázek 4.9 Graf postupu vyhodnocování kalibraci osy Z.....	50
Obrázek 4.10 Etalon Taylor Hobson 15892 s kalibrovanými hodnoty 2,47 μ m a 0,36 μ m.....	51
Obrázek 4.11 Kalibrace aZ a lZ použitím zvětšovací objektivu o velikosti 10× - graf chyby měření.....	52

Obrázek 4.12 Kalibrace αZ a $I Z$ použitím zvětšovací objektivu o velikosti $20\times$ - graf chyby měření.....	53
Obrázek 4.13 Kalibrace αZ a $I Z$ použitím zvětšovací objektivu o velikosti $50\times$ - graf chyby měření.....	53
Obrázek 4.14 Křížová mřížka $20\mu\text{m}$	55
Obrázek 4.15 Graf αY a $I Y$ výsledků kalibrace přístroje vybaveného $10\times$ zvětšovacím objektivem - standardní chyba měření.....	56
Obrázek 4.16 Graf αY a $I Y$ výsledků kalibrace přístroje vybaveného $10\times$ zvětšovacím objektivem - standardní chyba měření.....	56
Obrázek 4.17 Graf αY a $I Y$ výsledků kalibrace přístroje vybaveného $20\times$ zvětšovacím objektivem - standardní chyba měření.....	56
Obrázek 4.18 Graf αY a $I Y$ výsledků kalibrace přístroje vybaveného $20\times$ zvětšovacím objektivem - standardní chyba měření.....	56
Obrázek 4.19 Graf αY a $I Y$ výsledků kalibrace přístroje vybaveného $50\times$ zvětšovacím objektivem - standardní chyba měření.....	57
Obrázek 4.20 Graf αY a $I Y$ výsledků kalibrace přístroje vybaveného $50\times$ zvětšovacím objektivem - standardní chyba měření.....	57
Obrázek 5.1 3D model povrchu vzorku č. 467, objektiv $10\times$	60

SEZNAM TABULEK

Tabulka 2.1 Souhrn uznávaných pojmů pro CSI [29].....	22
Tabulka 3.1 Kroky kalibrační a etalony používané pro kalibraci	33
Tabulka 4.1 Parametry metody průměrování pro etalon Taylor Hobson.....	41
Tabulka 4.2 Parametry při použití metody odčítání na etalonu Taylor Hobson	42
Tabulka 4.3 Parametry metody průměrování pro etalony Mahr a Somet	44
Tabulka 4.4 Parametry při použití metody odečítání na etalonu Mahr a Somet.....	45
Tabulka 4.5 Výpočet vlivů nejistot měření šumu etalonu Taylor Hobson a rovinnosti na malém válce při měření osy Z	48
Tabulka 4.6 Výpočet vlivů nejistot měření šumu na etalonech Somet a Mahr a rovinnosti na malém válce při měření osy Z	48
Tabulka 4.7 Naměřené hodnoty výšky stupně a chyby osy Z pro objektiv 10×	51
Tabulka 4.8 Naměřené hodnoty výšky stupně a chyby osy Z pro objektiv 20×	51
Tabulka 4.9 Naměřené hodnoty výšky stupně a chyby osy Z pro objektiv 50×	52
Tabulka 4.10 Výpočet koeficientu zvětšení pro objektivy 10×, 20×, a 50×	52
Tabulka 4.11 Koeficienty zvětšení a linearity přispívá k nejistotě měření osy Z pro 10×	53
Tabulka 4.12 Koeficienty zvětšení a linearity přispívá k nejistotě měření osy Z pro 20×	54
Tabulka 4.13 Koeficienty zvětšení a linearity přispívá k nejistotě měření osy Z pro 50×	54
Tabulka 4.14 Koeficienty zvětšení a linearity a příspěvky k nejistotě měření os XY objektivu 10×	57
Tabulka 4.15 Koeficienty zvětšení a linearity a příspěvky k nejistotě měření os XY objektivu 20×	58
Tabulka 4.16 Koeficienty zvětšení a linearity a příspěvky k nejistotě měření os XY objektivu 50×	58
Tabulka 5.1 Výpočet nejistoty typu A z tří měření	60
Tabulka 5.2 Základní komponenty celkové nejistoty pro objektiv se zvětšením 10× .	61
Tabulka 5.3 Základní komponenty celkové nejistoty pro objektiv se zvětšením 20× .	61
Tabulka 5.4 Základní komponenty celkové nejistoty pro objektiv se zvětšením 50× .	61
Tabulka A.1 Parametry naměřené pomocí etalonu Taylor hobson pro 10× objektiv zvětšení	78
Tabulka A.2 Parametry naměřené pomocí etalonu Taylor hobson pro 20× objektiv zvětšení	78
Tabulka A.3 Parametry naměřené pomocí etalonu Taylor hobson pro 50× objektiv zvětšení	78
Tabulka A.4 Naměřené parametry pomocí etalonu Somet 10× objektivem.....	79
Tabulka A.5 Měření na etalonu Mahr objektivem zvětšení 20×.....	79
Tabulka A.6 Měření na etalonu Mahr objektivem zvětšení 20×.....	79
Tabulka B.1 Parametr Sz pro objektivy 10×, 20× a 50× zvětšení.....	80
Tabulka C.1 Naměřené a vypočtené parametry osy X a Y objektivem se zvětšením 10×	81
Tabulka C.2 Naměřené a vypočtené parametry os X a Y objektivem se zvětšením 20×	82

Tabulka C.3 Naměřené a vypočtené parametry os X a Y objektivem se zvětšením $50\times$	83
--	----

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

λ_s	krátkovlnný filtr, při jeho použití na celý profil vzniká základní profil
λ_c	filtr který se dělí profil drsnosti od složek s většími vlnovými délkami
x_s	šířka prvku profilu
z_t	výška prvku profilu
z_p	výška výstupku profilu
z_v	hloubka prohlubně profilu
Ra	průměrná odchylka profilu od referenční čáry
Rz	nejvyšší výška profilu
Sq	průměrná kvadratická výška posuzované plochy
Sa	průměrná aritmetická výška posuzované plochy
Sz	maximální výška posuzované plochy
CCI	coherence correlation interferometry, koherenční rastrovací interferometrii
NPL	National Physical Laboratory, UK
CSIR	Central Mechanical Engineering Research Institute, India
UKAS	United Kingdom Accreditation Service
$S_{q_{noise}}$	měřicí šum
S_{q_n}	naměřená průměrná kvadratická odchylka posuzovaného profilu průměrného povrchu
Sq	naměřená průměrná kvadratická odchylka posuzovaného profilu po jednom měření
u_{NF}	standardní nejistota měření rovinnosti a šumu
$S_{z_{flatness}}$	zbytková rovinnost
u_{error}	příspěvek chyby linearity k nejistotě měření
u_{repeat}	příspěvek opakovatelnosti
u_{reprod}	příspěvek reprodukovatelnosti
$u_{traceability}$	příspěvek sledovatelnosti
U_{T-x}, u_{T-y} a u_{T-z}	kombinovaný účinek chyby měření
u_{res}	nejistota měření příčného rozlišení
Res	příční obdobní mez
u	kombinovaná standardní nejistota
u_A	standardní nejistota typu A
u_B	standardní nejistota typu B

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A Naměřené parametry šumu

Příloha B Naměřené parametry rovinnosti

Příloha C Naměřené parametry kalibraci osy *XY*

A Naměřené hodnoty měřicího šumu

Tabulka A.1 Parametry naměřené pomocí etalonu Taylor Hobson pro 10× objektiv zvětšení

Č.m.	Average 1	Average 2	Average 4	Average 8	Average 16	Odčítání
	Sq [nm]					Sqmean [nm]
1	3,0750	3,0662	3,0606	3,0557	3,0669	0,2409
2	3,0711	3,0678	3,0591	3,0602	3,0719	0,2595
3	3,0681	3,0616	3,0617	3,0599	3,0713	0,2029
4	3,0713	3,0596	3,0598	3,0683	3,0763	0,1884
5	3,0700	3,0701	3,0625	3,0605	3,0828	0,1756
\bar{x}	3,0711	3,0650	3,0607	3,0609	3,0738	

Tabulka A.2 Parametry naměřené pomocí etalonu Taylor hobson pro 20× objektiv zvětšení

Č.m.	Average 1	Average 2	Average 4	Average 8	Average 16	Odčítání
	Sq [nm]					Sqmean [nm]
1	2,3245	2,4024	2,3043	2,3103	2,2880	0,9148
2	2,4542	2,4262	2,3082	2,2874	2,2779	0,9027
3	2,4206	2,404	2,2947	2,3338	2,3347	1,0264
4	2,3045	2,3997	2,3244	2,3209	2,3178	0,9271
5	2,3365	2,3044	2,3200	2,3457	2,3752	0,9208
\bar{x}	2,3680	2,3873	2,3103	2,3196	2,3187	

Tabulka A.3 Parametry naměřené pomocí etalonu Taylor hobson pro 50× objektiv zvětšení

Č.m.	Average 1	Average 2	Average 4	Average 8	Average 16	Odčítání
	Sq [nm]					Sqmean [nm]
1	2,4110	2,3901	2,3495	2,3351	2,3315	0,7247
2	2,3468	2,3522	2,3512	2,3387	2,3245	0,6828
3	2,3078	2,3411	2,3336	2,3397	2,3174	0,6450
4	2,3774	2,3836	2,3318	2,3212	2,3118	0,6680
5	2,3817	2,3788	2,3352	2,3261	2,3070	0,6246
\bar{x}	2,3649	2,3691	2,3402	2,3321	2,3184	

Tabulka A.4 Naměřené parametry pomocí etalonu Somet 10× objektivem

Č.m.	Average 1	Average 2	Average 4	Average 8	Average 16	Odčítání
	<i>Sq</i> [μm]					<i>Sqmean</i> [μm]
1	1,0981	1,0983	1,0985	1,0988	1,0986	0,0545
2	1,0977	1,0979	1,0983	1,0988	1,0985	0,0543
3	1,0977	1,0979	1,0982	1,0987	1,0986	0,0544
4	1,0979	1,0980	1,0982	1,0986	1,0986	0,0546
5	1,0982	1,0978	1,0981	1,0986	1,0986	0,0544
\bar{x}	1,0979	1,0979	1,0982	1,0987	1,0985	

Tabulka A.5 Měření na etalonu Mahr objektivem zvětšení 20×

Č.m.	Average 1	Average 2	Average 4	Average 8	Average 16	Odčítání
	<i>Sq</i> [μm]					<i>Sqmean</i> [μm]
1	1,0216	1,0211	1,0208	1,0213	1,0212	0,0544
2	1,0216	1,0212	1,0211	1,0212	1,0212	0,0541
3	1,0203	1,0212	1,0212	1,0212	1,0212	0,0542
4	1,0215	1,0212	1,0213	1,0212	1,0211	0,0544
5	1,0212	1,0212	1,0212	1,0211	1,0212	0,0544
\bar{x}	1,0212	1,0212	1,0211	1,0212	1,0212	

Tabulka A.6 Měření na etalonu Mahr objektivem zvětšení 20×

Č.m.	Average 1	Average 2	Average 4	Average 8	Average 16	Odčítání
	<i>Sq</i> [μm]					<i>Sqmean</i> [μm]
1	0,9962	0,9965	0,9957	0,9948	0,9947	0,0757
2	0,9958	0,9958	0,9954	0,9950	0,9947	0,0756
3	0,9960	0,9965	0,9950	0,9948	0,9946	0,0756
4	0,9963	0,9964	0,9960	0,9952	0,9946	0,0756
5	0,9961	0,9963	0,9961	0,9949	0,9949	0,0756
\bar{x}	0,9961	0,9963	0,9957	0,9949	0,9947	

B Naměřené odchytky rovinnosti

Tabulka B.1 Parametr S_z pro objektivy 10×, 20× a 50× zvětšení

č.m.	10× objektiv	20× objektiv	50× objektiv
	S_z , nm	S_z , nm	S_z , nm
1	22,3120	8,6122	24,5400
2	25,6170	11,7690	25,3410
3	23,9840	10,1110	25,6390
4	42,3050	12,6720	33,2090
5	25,2400	14,6830	16,9430
6	31,4220	11,5370	25,4620
7	25,7410	11,2260	31,4650
8	43,0880	11,2260	24,2850
9	25,7690	6,5199	44,1570
10	29,9160	11,4070	37,1810
	29,5394	10,9763	28,8222

C Naměřené hodnoty z kalibrace os XY

Tabulka C.1 Naměřené a vypočtené parametry osy X a Y objektivem se zvětšením 10×

č.m	Měřený X	Průměr. odch X	S odch X	č.m	Měřený Y	Průměr. odch Y	S odch Y
	μm				μm		
1	176,7970	3,5937	1,4316	1	168,3740	2,8080	1,5323
2	276,7970	2,8350	1,3086	2	268,3740	6,7477	2,2643
3	376,7970	2,2069	0,9600	3	368,3740	8,7179	1,6519
4	476,7970	1,5160	0,7549	4	468,3740	9,5136	0,6514
5	576,7970	0,5506	0,6226	5	568,3740	11,3334	0,7435
6	676,7970	0,2662	0,7419	6	668,3740	11,8449	0,9691
7	776,7970	0,5281	1,0834	7	768,3740	10,3364	0,4120
8	876,7970	-0,3297	0,4537	8	868,3740	11,1703	0,7772
9	976,7970	-0,4201	0,3746	9	968,3740	10,8144	0,6868
10	1076,7970	-0,5076	0,9219	10	1068,3740	9,3497	0,9782
11	1176,7970	-0,0845	0,9589	11	1168,3740	10,2254	0,7269
12	1276,7970	-0,2070	1,0789	12	1268,3740	10,3679	0,8911
13	1376,7970	-0,2664	1,1229	13	1368,3740	10,8529	0,8428
14	1476,7970	0,1942	1,3159	14	1468,3740	11,2379	0,9850
15	1576,7970	0,8236	1,4536	15	1568,3740	11,9354	1,0724

Tabulka C.2 Naměřené a vypočtené parametry os X a Y objektivem se zvětšením 20×

č.m	Měřený X	Průměr. odch X	S odch X	č.m	Měřený X	Průměr. odch X	S odch X
	μm				μm		
1	43,8877	2,4795	0,9652	1	39,6733	0,0140	0,5085
2	93,8877	2,5850	0,8732	2	89,6733	0,1433	0,6279
3	143,8877	2,7376	0,9922	3	139,6733	-0,0768	0,4591
4	193,8877	2,8892	0,7699	4	189,6733	-0,0787	0,5973
5	243,8877	3,0134	0,9093	5	239,6733	-0,1343	0,4957
6	293,8877	2,9221	0,9191	6	289,6733	-0,1995	0,6127
7	343,8877	2,8021	0,7807	7	339,6733	-0,4146	0,5150
8	393,8877	2,3310	0,8319	8	389,6733	-0,6584	0,6023
9	443,8877	2,0228	0,7597	9	439,6733	-0,9940	0,6771
10	493,8877	1,5890	0,6139	10	489,6733	-1,4444	0,7195
11	543,8877	1,4681	0,6353	11	539,6733	-1,6484	0,8029
12	593,8877	1,3350	0,7573	12	589,6733	-1,8950	0,8920
13	643,8877	1,2735	0,8193	13	639,6733	-1,7171	0,9590
14	693,8877	1,1628	0,9415	14	689,6733	-1,7110	0,9579
15	743,8877	1,0316	0,7974	15	739,6733	-1,4332	0,9511
16	793,8877	1,0657	0,8147	16	789,6733	-1,5872	1,0025

Tabulka C.3 Naměřené a vypočtené parametry os X a Y objektivem se zvětšením 50×

č.m	Měřený X	Průměr. odch X	S odch X	č.m	Měřený X	Průměr. odch X	S odch X
1	15,7227	1,0086	0,6121	1	6,5672	0,0777	0,2770
2	35,7227	0,9968	0,4869	2	26,5672	0,3698	0,1842
3	55,7227	1,1599	0,4587	3	46,5672	0,4655	0,2548
4	75,7227	1,3057	0,3564	4	66,5672	0,5490	0,3464
5	95,7227	1,4517	0,4182	5	86,5672	0,6344	0,3706
6	115,7227	1,4497	0,4137	6	106,5672	0,7467	0,3850
7	135,7227	1,4061	0,4797	7	126,5672	0,6955	0,3307
8	155,7227	1,5159	0,3608	8	146,5672	0,7452	0,3096
9	175,7227	1,4700	0,4126	9	166,5672	0,6676	0,3156
10	195,7227	1,4771	0,3857	10	186,5672	0,7715	0,6166
11	215,7227	1,6501	0,3073	11	206,5672	0,5180	0,3512
12	235,7227	1,5793	0,4934	12	226,5672	0,7046	0,3861
13	255,7227	1,6268	0,3839	13	246,5672	0,5832	1,0139
14	275,7227	1,5527	0,4902	14	266,5672	0,8710	0,2977
15	295,7227	1,6372	0,4729	15	286,5672	0,9348	0,3889
16	315,7227	1,7758	0,3840	16	306,5672	0,9138	0,4146