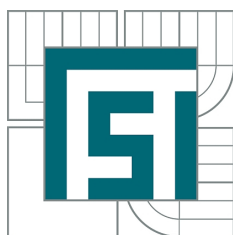


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

HODNOCENÍ TEXTURY POVRCHU KONTAKTNÍ A BEZKONTAKTNÍ METODOU

CONTACT AND NON-CONTACT METHOD OF SURFACE TEXTURE EVALUATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MATEJ HARČARÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. RÓBERT JANKOVÝCH, CSc.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Matej Harčarík

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

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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 bakalářské práce:

Hodnocení textury povrchu kontaktní a bezkontaktní metodou

v anglickém jazyce:

Contact and non-contact method of surface texture evaluation

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zpracování výsledků měření vybraných parametrů drsnosti určených vzorků povrchu kontaktními přístroji a přístrojem Talysurf CCI Lite.

Cíle bakalářské práce:

1. Metrologie textury povrchu - přehled metod
2. Analýza výsledků měření 2D parametrů drsnosti získaných měřením kontaktními přístroji a přístrojem Talysurf CCI Lite
3. Doporučení pro praxi

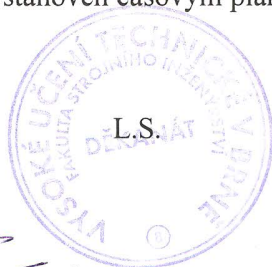
Seznam odborné literatury:

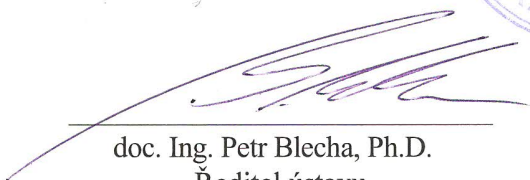
1. Bumbálek, B., Odvody, V. a Ošřádal B., Drsnost povrchu. Praha, SNTL 1989
2. Whitehouse, S.J., Handbook of Surface Metrology. Leicester, Rank Taylor Hobson Ltd 1994
3. Normy o výpočtu a analýze 2D a plošných parametrů textury povrchu


Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Róbert Jankových, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 18.11.2013




doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
Ředitel ústavu


prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

Abstrakt

Úkolem práce bylo zpracovat přehled metod měření textury povrchu, provést analýzu měření získaných kontaktními přístroji a bezkontaktním přístrojem Talysurf CCI Lite a formulovat z nich doporučení pro praxi. Na základě měření byl analyzován vliv nastavení základní délky na měření drsnosti a variabilita měření. Byly identifikovány kroky procesu měření, kterým je potřeba věnovat zvláštní pozornost. Výstupem práce je návrh postupu měření profilových charakteristik drsnosti bezkontaktním přístrojem Talysurf CCI Lite.

Summary

The goal of this thesis was to create an overview of methods of surface texture evaluation, to analyse measurements of roughness profile parameters made with contact instruments and non-contact instrument Talysurf CCI Lite and to deduce practical recommendations from them. Based on measurements made, analyses of influence of cut-off settings on roughness measurement and of measurement variability were performed. Steps of the measurement process requiring special attention were identified. The output of this thesis is a proposal of measurement procedure for Talysurf CCI Lite.

Klíčová slova

metrologie, textura povrchu, profilová metoda, CCI.

Keywords

metrology, surface texture, profile method, CCI.

HARČARÍK, MATEJ. *Hodnocení textury povrchu kontaktní a bezkontaktní metodou.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 40 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Róbert Jankových, CSc..

Já, Matej Harčarík, tímto čestně prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce.

Matej Harčarík



Obsah

Úvod	3
1 Základní pojmy metrologie textury povrchu	4
1.1 Textura povrchu	4
1.2 Přehled metod měření textury povrchu	4
1.2.1 Dotyková (profilová) metoda	5
1.2.2 Koherenčně korelační interferometrie	6
1.2.3 Možnosti zpracování naměřených dat	7
1.3 Základní pojmy profilové metody hodnocení textury povrchu	7
1.4 Definice parametrů profilu povrchu dle ISO 4287	9
2 Postup vyhodnocování drsnosti dle ISO 4288	12
2.1 Odhadování parametrů	12
2.2 Porovnávání měřených hodnot s tolerančními mezemi	12
2.3 Hodnocení parametrů	13
2.4 Pravidla a postupy pro měření parametrů drsnosti dotykovými přístroji . .	13
2.4.1 Postup pro neperiodický profil drsnosti	13
2.4.2 Postup pro periodický profil drsnosti	14
3 Použité měřicí přístroje a vzorky	15
3.1 Mahr Perthometer M2	15
3.2 Taylor Hobson Surtronic 3+	16
3.3 Taylor Hobson Talysurf CCI Lite	17
3.4 Použité vzorky	18
4 Analýza výsledků měření	22
4.1 Vliv základní délky na hodnoty R-parametrů	22
4.2 Dodržení základní a vyhodnocované délky při bezkontaktním měření	24
4.3 Variabilita R-parametrů v rámci jednoho vzorku	27
4.4 Srovnání kontaktních a bezkontaktních metod	28
4.5 Návrh postupu měření bezkontaktním profilometrem	28
5 Závěr	30
Seznam použité literatury	32
Seznam obrázků	34
Seznam tabulek	35
Seznam použitých zkratk a symbolů	36
Seznam příloh	37



A	Návrh postupu měření přístrojem Taylor Hobson Talysurf CCI	38
A.1	Postup pro neperiodický povrch	38
A.2	Postup pro periodický povrch	38
B	Naměřené hodnoty	40



Úvod

Textura povrchu součástí má rozhodující vliv na různé funkční vlastnosti například v oblasti tribologie nebo povrchových úprav. V souvislosti s narůstajícími požadavky na kvalitu povrchů rostou i požadavky na její vyhodnocování a měření.

První kapitola obsahuje přehled metod měření drsnosti a základní pojmy profilové metody. Ve druhé kapitole jsou uvedeny normalizované postupy měření drsnosti profilovou metodou. Ve třetí kapitole jsou popsány použité přístroje a vzorky.

Zaměření na profilovou metodu hodnocení textury povrchu vychází z toho, že profilová metoda je jednou z nejstarších a nejpoužívanějších metod hodnocení textury povrchu. I když postupný rozvoj přístrojové techniky umožnil vznik mnoha dalších metod, jednoduchost a zaužívanost předurčují profilovou metodu k setrvání v praxi. Vystává proto otázka, jak k ní nejlíp využívat moderní přístrojovou techniku, zejména bezkontaktní přístroje.

Proto bylo jedním z cílů této práce srovnání výsledků získaných kontaktní metodou měření drsnosti s výsledky měření získaných pomocí optické metody koherenční korelační interferometrie. Praktickým výstupem mělo být navržení postupu měření profilových parametrů drsnosti přístrojem Taylor Hobson Talysurf CCI Lite s ohledem zejména na dodržení požadavků normy ISO 4288. Analýza výsledků měření, srovnání kontaktních a bezkontaktních metod a doporučení pro praxi se nachází ve čtvrté kapitole.

Hodnocení povrchů profilovou metodou spadá mezi metrologické metody které upravuje soustava norem ISO GPS. Příslušné normy byly v České republice zavedeny do soustavy ČSN, práce se na ně ale odkazuje pouze zkratkou ISO, když se jedná o obecně platná pravidla, nebo plným označením ČSN, když se jedná o národní specifika dané normy.

Podle pokynů vedoucího práce jsou zkoumány pouze vybrané výškové a délkové parametry profilu dle [14].



1. Základní pojmy metrologie textury povrchu

1.1. Textura povrchu

Anglický termín „surface texture“ z normy ISO 8785 je do češtiny v normách vydaných před r. 2000 překládán jako „struktura povrchu“. V některých normách vydaných po r. 2000 se vyskytuje termín „textura povrchu“, další normy pokračují v používání termínu „struktura povrchu“. Pro srovnání, slovenští normotvůrci používají termín „charakter povrchu“ [15].

Podle Slovníku spisovného jazyka českého pojem struktura popisuje zejména vnitřní uspořádání či skladbu látky, zatím co pojem textura znamená, kromě jiného, „přirozená kresba dřeva patrná zprav. na tangenciálním řezu“ [2]. Pojmy „štruktúra“ a „textúra“ definuje Krátký slovník slovenského jazyka (dále jen KSSJ) podobně [5]. Pojem charakter používaný slovenskými normami je KSSJ definován jako „súhrn charakteristických znakov veci, javu, povaha, ráz“ [5]. Termín „charakter povrchu“ je tedy pravděpodobně obsahově širší než původní anglický termín „surface texture“. Vizuální podobnost mezi geometrickými charakteristikami povrchu a kresbou viditelnou na řezu dřeva navádí k použití termínu textura.

Po dohodě s vedoucím bakalářské práce se v textu této práce používá¹ termín textura povrchu místo termínu struktura povrchu (pokud je tento použit v příslušných normách).

Následující termín textura povrchu nahrazuje původní pojem struktura povrchu dle ČSN EN ISO 8785.

Textura povrchu

opakované nebo náhodné úchytky od geometrického povrchu, které tvoří třírozměrnou topografii povrchu (upraveno dle [17])

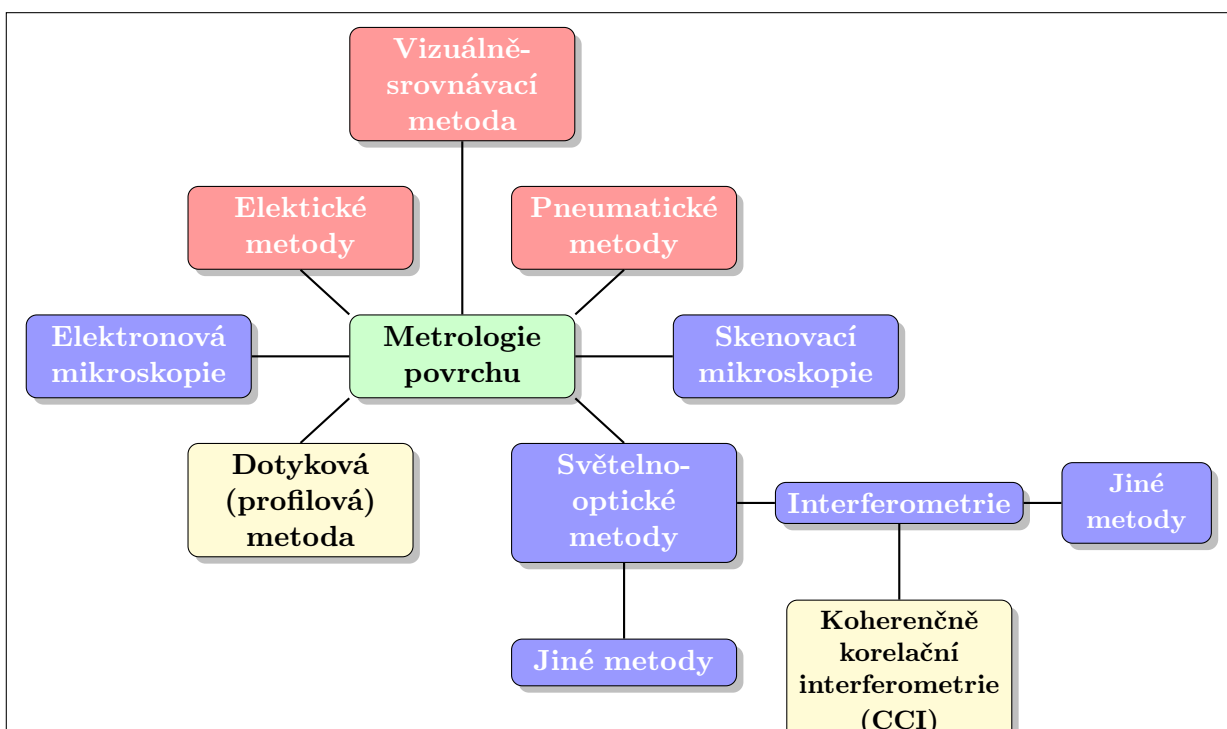
1.2. Přehled metod měření textury povrchu

Metody měření textury povrchu jsou pro potřeby této práce uspořádané dle principu měření na obr. 1.1.

Vizuálně-srovnávací metoda je nejstarším způsobem hodnocení textury povrchu. Zkušený hodnotitel při ní zrakem a přejížděním nehtu po povrchu zkoumané součásti zhodnotí stav povrchu, příp. ho srovná se sadou porovnávacích vzorků [11].

V minulosti byla používána pneumatická metoda, při které se textura povrchu popisovala podle množství vzduchu unikajícího z měřicí hlavy těsně přiložené k povrchu, a metoda elektrická, při které se měřila elektrická kapacita soustavy referenční elektrody a zkoumaného povrchu [11].

¹dle návrhu prof. Bumbálka [3]



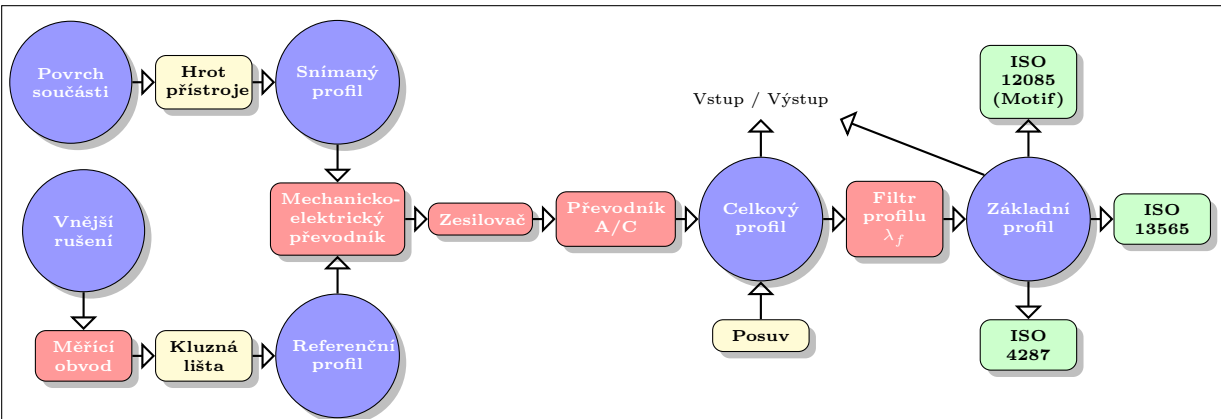
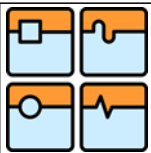
Obrázek 1.1 Přehled metod měření textury povrchu (upraveno dle [6])

Skenovací mikroskopie je metoda, při které je povrch bezkontaktně snímán přesným hrotem, který se zkoumaným povrchem interaguje na kvantové úrovni. Mezi nejpřesnější metody měření textury povrchu patří elektronová mikroskopie, při které je optická soustava nahrazena elektromagnetickou čočkou a světlo elektronovým paprskem [11].

Dobrý poměr přesnosti k náročnosti měření poskytují dotyková metoda a světelné-optické metody. Po dohodě s vedoucím práce je v této práci položen důraz právě na dotykovou (profilovou) metodu a jednu ze světelné-optických metod, koherenční korelační interferometrii.

1.2.1. Dotyková (profilová) metoda

Měření povrchu kontaktní metodou probíhá tažením ramínka snímače s kuželovým hrotem se zakulacenou špičkou z tvrdého materiálu (zpravidla diamantu) přitlačovaného k povrchu definovanou silou po definované dráze (viz kap. 2.4). Změna pořadnice z snímacího hrotu se pomocí různých druhů elektronických snímačů převádí na signál, který je zpravidla zpracován počítačem nebo elektronikou samotného měřicího přístroje. Při jednom měření je snímán jeden profil povrchu, proto jsou kontaktní metody citlivé na lokální vady povrchu a nehodí se pro měření plošných parametrů povrchu. Naměřený profil se dále vyhodnocuje různými způsoby (viz kap. 1.2.3). Proces měření a vyhodnocování textury povrchu dotykovým přístrojem je znázorněn na obr. 1.2.

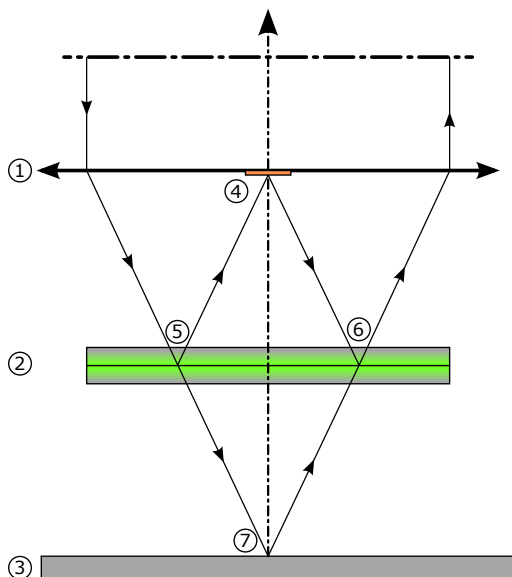


Obrázek 1.2 Blokové schéma dotykového přístroje (upraveno dle [6])

Požadavky na kontaktní profilometry definuje norma ISO 3274. Podle této normy platí například pro poloměr zaoblení špičky hrotu $r_{tip} = 2\mu m; 5\mu m$ nebo $10\mu m$ a vrcholový úhel kužele hrotu se volí z hodnot 60° nebo 90° .

1.2.2. Koherenčně korelační interferometrie

Metod bezkontaktního měření textury povrchu existuje několik, dále je popsána pouze koherenční korelační interferometrie, protože tuto metodu využívá použitý přístroj Taylor Hobson Talysurf CCI Lite. Princip metody je vysvětlen na objektivu typu Mirau (obr. 1.3), protože všechny použité objektivy jsou této konstrukce.



Obrázek 1.3 Princip činnosti interferometrického objektivu Mirau[18]

Koherenční korelační interferometrie využívá k získání dat o povrchu interferenci koherentního světla. V objektivu typu Mirau paprsek světla ze zdroje prochází čočkou objektivu ① a jeho část je polopropustným zrcadlem ② odražena na referenční zrcadlo ④, zpátky na polopropustné zrcadlo ② a odtud na snímač obrazu. Světlo, které je zrcadlem propuštěno, dopadá na povrch měřené součásti ③. Odtud je jeho část odražena přes



objektiv ① na snímač, kde interferuje se světlem odraženým na snímač ze zdroje. Na podobném principu je založen i objektiv typu Michelson, který se od objektivu Mirau odlišuje konstrukcí a dosahovaným zvětšením.

Přístroj nejdříve postupně vytvoří sérii snímků ve výškovém rozsahu definovaném uživatelem. Následně pomocí korelačního algoritmu vyhodnotí polohu interferenčních obrazců a na jejím základě vytvoří třírozměrný model měřeného povrchu. S tímto modelem je možné dál pracovat pomocí příslušného softwaru.

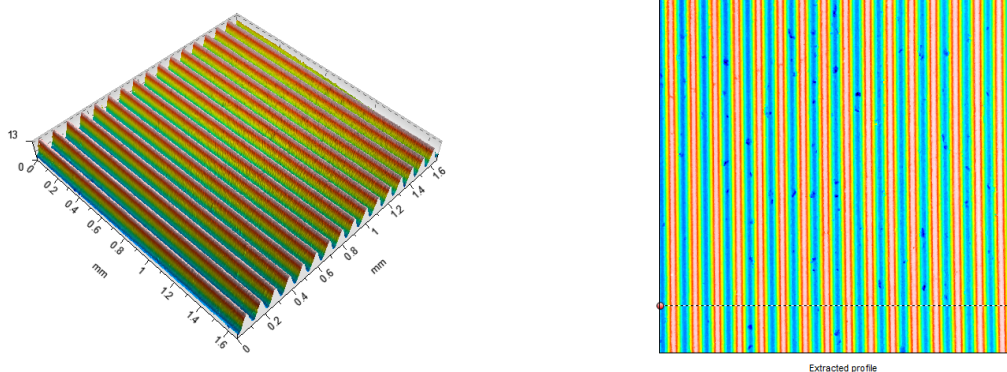
1.2.3. Možnosti zpracování naměřených dat

Údaje získány měřením je možné zpracovat mnohými způsoby. Charakteristiky profilu povrchu se běžně vyhodnocují pomocí parametrů dle ISO 4287. V automobilovém průmyslu se využívá charakteristik dle norem ISO 13565-1, 13565-2 a 13565-3. Ve Francii a firmách s francouzskými zákazníky se zas využívají parametry Motif. Komplexnější analýzu profilu lze provést pomocí autokorelační funkce, funkce výkonové spektrální hustoty nebo funkce pravděpodobnostního rozdělení. Zpracováním plošných dat se zabývají normy ISO 25178-1 až 25178-6.

Protože je problematika vyhodnocování měření textury povrchu velice obsáhlá, tato práce se po dohodě s vedoucím zabývá profilovými parametry drsnosti dle ISO 4287.

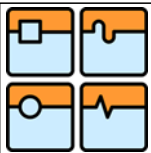
1.3. Základní pojmy profilové metody hodnocení textury povrchu

Kvůli názornosti jsou vybrané pojmy a parametry profilové metody ilustrovány na profilu skutečného povrchu etalonu Mitutoyo (obr. 1.4). Ilustrace byly vytvořeny z údajů exportovaných z přístroje Taylor Hobson Talysurf CCI Lite do grafického softwaru gnuplot [12].



Obrázek 1.4 3D model povrchu etalonu Mitutoyo a poloha použitého profilu, objektiv 10x

Hodnocení textury povrchu profilovou metodou je založeno na statistickém vyhodnocení základního profilu, který vzniká úpravou úplného profilu sejmutého ze skutečného povrchu zkoumané součásti.



Souřadnicový systém, ve kterém se při vyhodnocování textury povrchu pracuje, je dle normy ISO 4287 pravouhlý souřadnicový systém, pro který platí, že osa X vede ve směru snímání a je střední čarou snímaného profilu. Osa Y je na ní kolmá a je taky rovnoběžná s povrchem zkoumané součásti. Osa Z , kolmá na osy X a Y , směřuje z materiálu do volného prostoru [14].

Profil povrchu představuje křivka, která vzniká jako průsečnice povrchu zkoumané součásti a myšlené roviny XZ [14].

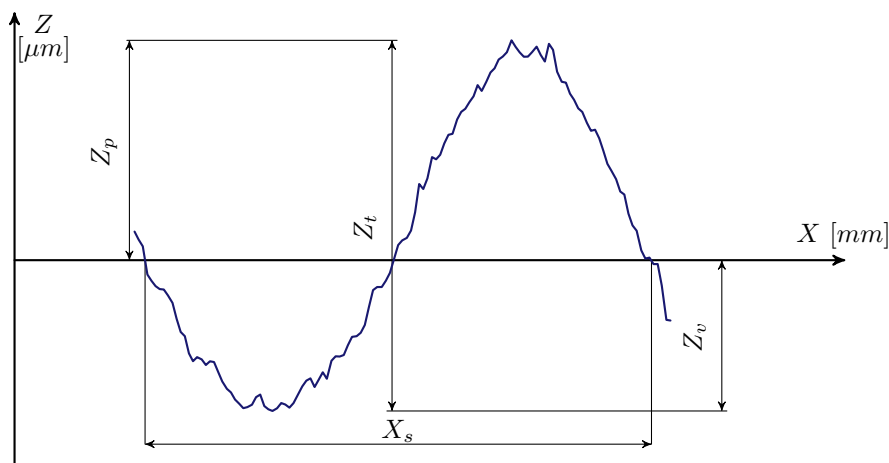
Při snímání povrchu kontaktním přístrojem vzniká úplný profil jako číslicové vyjádření polohy snímače (tzv. snímaný profil) vzhledem ke dráze, po které je snímač veden (tzv. referenční profil) [13]. Základní profil je z úplného profilu vytvořen aplikací krátkovlnného filtru λ_s . Jeho střední čára je čára vytvořena metodou nejmenších čtverců přiléhající jmenovitému tvaru základního profilu [14].

Od základního profilu jsou odvozeny profily drsnosti a vlnitosti. Profil drsnosti vzniká ze základního profilu potlačením dlouhovlnných složek profilu pomocí filtru λ_c . Střední čára profilu drsnosti odpovídá dlouhovlnné složce profilu potlačené filtrem λ_c [14].

Pro získání profilu vlnitosti jsou nejdřív potlačeny dlouhovlnné složky profilu filtrem λ_f , načež jsou filtrem λ_c potlačeny krátkovlnné složky profilu. Střední čára profilu vlnitosti odpovídá dlouhovlnné složce potlačené filtrem λ_f [16].

Profilové parametry textury povrchu se vyhodnocují na základním profilu (tzv. P-parametry), nebo na profilu drsnosti (R-parametry) či vlnitosti (W-parametry). Norma [14] u každého parametru definuje, zda se vyhodnocuje na základní délce nebo na vyhodnocované délce. Vyhodnocovaná délka ln je délka profilu ve směru X použita pro posouzení vyhodnocovaného profilu, zatím co základní délka lp , lr nebo lw je délka ve směru osy X použita pro rozpoznání nerovností charakterizujících vyhodnocovaný povrch [14]. Pro P-parametry je vyhodnocovaná délka rovna základní délce, pro R-parametry může obsahovat jednu nebo více základních délek, pro W-parametry není vztah mezi základní a vyhodnocovanou délkou definován [16].

Na každém profilu lze vzhledem ke střední čáře definovat výstupky, prohlubně a prvky profilu. Výstupkem se rozumí část profilu spojující dva průsečíky profilu s osou X vystupující z materiálu do okolního prostředí. Analogicky je prohlubeň částí profilu spojující dva průsečíky profilu s osou X vstupující do materiálu z okolního prostředí. Výstupek a prohlubeň jsou charakterizovány výškou výstupku Zp , resp. hloubkou prohlubně Zv . Platí, že se za výstupek nebo prohlubeň považuje jenom taková nerovnost profilu, která přesahuje výšku nebo hloubku stanovenou omezením výšky, typicky danou v procentech Rz , Wz nebo Pz [14].

**Obrázek 1.5** Prvek profilu etalonu Mitutoyo

Prvek profilu (obr. 1.5) je tvořen výstupkem profilu a přilehlou prohlubní. Charakterizován je výškou prvku profilu Z_t (která je součtem výšky výstupku Z_p a hloubky prohlubně Z_v , které daný prvek tvoří) a šířkou prvku profilu X_s , která je dána jako délka úseku osy X protínající prvek profilu [14].

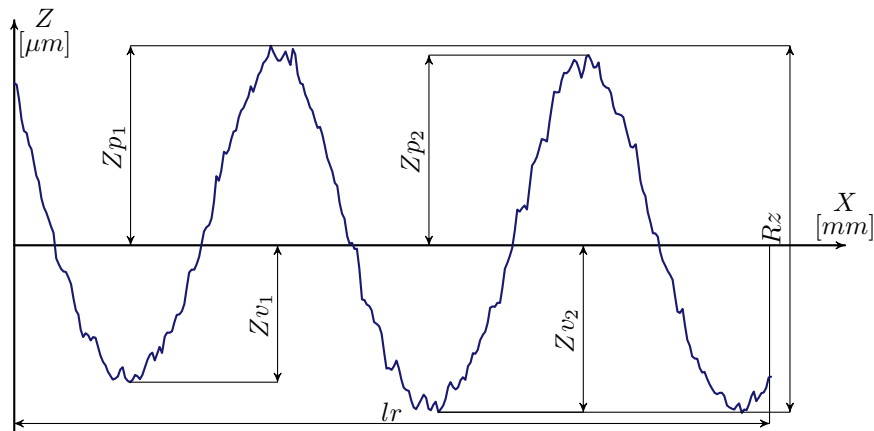
V definicích parametrů profilu povrchu se dále využívá pojmů hodnota pořadnice, místní sklon a materiálová délka profilu. Hodnota pořadnice $Z(x)$ je výška profilu v libovolné poloze X , místní sklon dz/dx je sklon profilu v dané poloze X a materiálová délka profilu na úrovni c $Ml(c)$ je součet délek úseků získaných protnutím profilu čarou rovnoběžnou s osou X v dané úrovni c [14].

1.4. Definice parametrů profilu povrchu dle ISO 4287

Norma ISO 4287 definuje šestnáct parametrů a křivek profilu. Parametry se dělí na výškové, délkové a tvarové. Každý parametr lze vyhodnotit na základním profilu, profilu drsnosti, nebo profilu vlnitosti.

Tato práce se dle pokynů vedoucího zabývá jenom parametry drsnosti Rz , Ra , Rq a RSm , proto zde nejsou ostatní definovány.

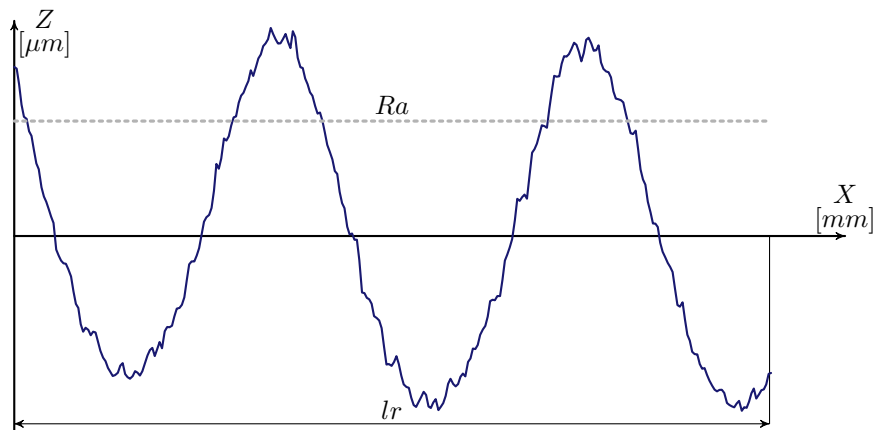
Největší výška profilu drsnosti Rz (obr. 1.6) je výškový parametr výstupků a prohlubní definován jako součet výšky největšího výstupku profilu drsnosti Z_p a hloubky největší prohlubně profilu drsnosti Z_v v rozsahu základní délky [14].



Obrázek 1.6 Parametr Rz vyhodnocen na základní délce profilu etalonu Mitutoyo

Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu drsnosti Ra (obr. 1.7) je výškový parametr průměrných hodnot pořadnic definován jako aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky [14].

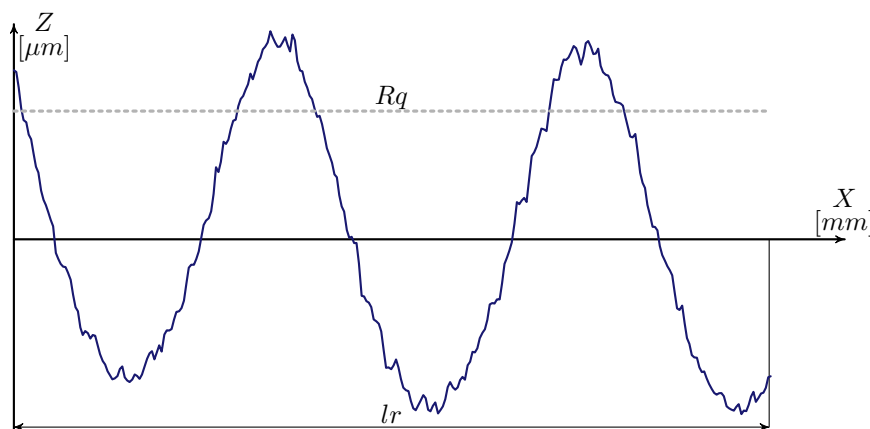
$$Ra = \frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z(x)| dx \quad (1.1)$$



Obrázek 1.7 Parametr Ra vyhodnocen na základní délce profilu etalonu Mitutoyo

Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu drsnosti Rq (obr. 1.8) se definuje jako kvadratický průměr² pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky [14].

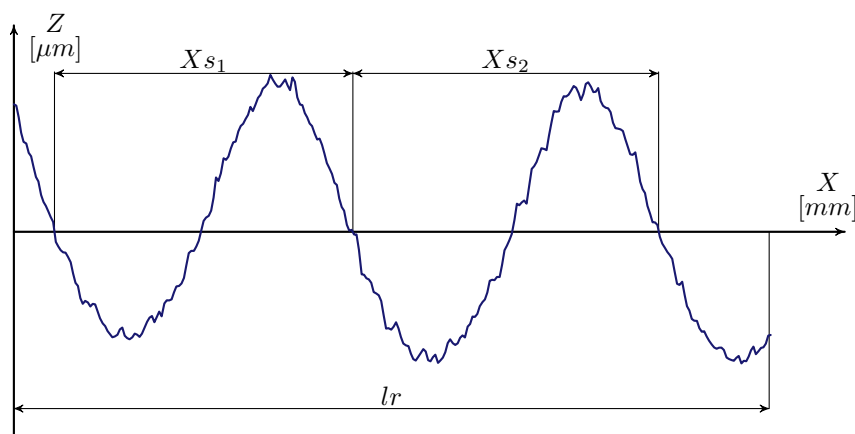
$$Rq = \sqrt{\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^2(x) dx} \quad (1.2)$$



Obrázek 1.8 Parametr Rq vyhodnocen na základní délce profilu etalonu Mitutoyo

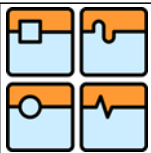
Průměrná šířka prvku profilu drsnosti RSm (obr. 1.9) je délkový parametr definován jako aritmetický průměr šířek prvků profilu drsnosti Xs v rozsahu základní délky [14].

$$RSm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Xs_i \quad (1.3)$$



Obrázek 1.9 Parametr RSm vyhodnocen na základní délce profilu etalonu Mitutoyo

²V normě ČSN EN ISO 4287 je ve vzorci parametru Rq typografická chyba ve znázornění odmocniny a absolutní hodnoty kvadrátu pořadnice $Z(x)$.



2. Postup vyhodnocování drsnosti dle ISO 4288

2.1. Odhadování parametrů

Odhad hodnoty parametru definovaného na základní délce se vypočítá na každé základní délce zkoumaného profilu. Následně se ze všech jednotlivých odhadů vypočítá aritmetický průměr. Pokud byl parametr vyhodnocen na nenormalizovaném počtu základních délek, uvede se jejich počet u značky parametru jako index (např. Ra_1 , RSm_3) [16].

Hodnota parametru definovaného na vyhodnocované délce se odhadne na vyhodnocované délce rovné normalizovanému počtu základních délek [16].

Odhad hodnot křivek a odpovídajících parametrů se vypočítá z dat naměřených z jedné křivky počítané na základě vyhodnocované délky [16].

Podle normy ISO 4288 se P-parametry vyhodnocují na celé délce měřeného prvku a R-parametry zpravidla na pětinasobku normalizované základní délky, o vyhodnocované délce W-parametrů se norma nezmiňuje. Vyhodnocované délky parametrů metody Motif a parametrů podle norem ISO 13565-2 a ISO 13565-3 jsou definovány dalšími předpisy [16].

Aby byla zajištěna úplná shoda výrobku s výrobní dokumentací, je nutné aby naměřené hodnoty textury povrchu byly reprezentativní pro celý povrch výrobku. Pokud se jeví, že povrch výrobku není homogenní, provedou se měření na každé homogenní části povrchu [16].

2.2. Porovnávání měřených hodnot s tolerančními mezemi

Při porovnávání shody vyrobeného povrchu s výrobní dokumentací se použije jedno ze dvou pravidel stanovených normou ISO 4288.

Pravidlo 16 % se použije pro případy, kdy je požadavek na hodnotu parametru specifikován značkou bez indexu „max.“ Povrch se považuje za vyhovující, pokud hodnotu parametru stanovenou horní mezí nepřesáhne více než 16%¹ všech naměřených hodnot na vyhodnocované délce. Podobně pro požadavky stanoveny dolní mezí parametru vyhoví povrch, pokud hodnotu specifikovanou výrobní dokumentací nedosahuje ne více než 16% všech hodnot naměřených na vyhodnocované délce² [16].

Pravidlo maxima se použije, když je požadavek specifikován značkou doplněnou indexem „max.“ Specifikovanou hodnotu nesmí v průběhu kontroly žádná z naměřených hodnot parametru na celém kontrolovaném povrchu přesáhnout [16].

Nejistota měření se určí podle pravidel daných normou ISO 14253-1. V případě použití pravidla 16 % při určování nejistot nebereme do úvahy nehomogenitu povrchu, protože jsou již započítány přídatkem 16% [16].

¹Hodnota vychází z parametrů normálního rozdělení.

²Příloha A normy ČSN EN ISO 4288 obsahuje zjednodušený praktický návod na porovnávání naměřených hodnot s horními a dolními mezemi.



2.3. Hodnocení parametrů

Parametry textury povrchu nejsou vhodné pro popis vad povrchu, proto při hodnocení tyto vady neuvažujeme. Při měření se snažíme místem s vadami vyhnout. Spolehlivost rozhodnutí o shodě výrobku se specifikacemi závisí od počtu základních délek ve vyhodnocované délce a také na počtu měření počtu vyhodnocovacích délek [16].

Pokud se vyhodnocovaná délka pro R-parametry podle ISO 4287 nerovná pěti základním délkám, přepočítá se jejich horní a dolní mez a vztáhne se k vyhodnocované délce rovné pěti základním délkám podle vztahu:

$$\sigma_5 = \sigma_n \sqrt{\frac{n}{5}} \quad (2.1)$$

kde n je počet použitých základních délek [16].

2.4. Pravidla a postupy pro měření parametrů drsnosti dotykovými přístroji

Pokud není základní délka specifikována výrobní dokumentací, zvolí se podle následujícího postupu. Pokud není specifikován směr měření, polohuje se výrobek tak, že směr řezu odpovídá největším hodnotám výšek parametrů drsnosti (R_a , R_z). Tento směr bude kolmý k poloze povrchu³. Při měření na izotropním povrchu může být směr řezu libovolný.

Měření se vykoná na té části povrchu, na které se dají očekávat kritické hodnoty; to je možné posoudit vizuálním pozorováním. Jednotlivá měření jsou na této části povrchu rozdělena rovnoměrně, aby se získali nezávislé výsledky.

Při určování hodnot parametrů drsnosti je nejdříve nutné rozhodnout, zda je profil drsnosti periodický nebo neperiodický. Na základě toho se zvolí jedna ze dvou variant postupu kontroly. Použije-li se jiný postup měření, je nutné jej popsat ve specifikacích a v protokolu o měření [16].

Následující postupy měření a volby hodnoty základní délky byly do zjednodušené formy upraveny podle normy ČSN EN ISO 4288.

2.4.1. Postup pro neperiodický profil drsnosti

1. Libovolným způsobem se odhadne hodnota parametru R_a , R_z , $Rz1max$ nebo RSm a pro odhadnutou hodnotu parametru se z tabulky 2.1 vyberou příslušné hodnoty základní a vyhodnocované délky.
2. Měřicím přístrojem se základní délkou nastavenou na hodnotu získanou v kroku 1 se provede reprezentativní měření R_a , R_z , $Rz1max$ nebo RSm . Naměřené hodnoty se porovnají s hodnotami v tabulce 2.1 a ověří se, zda odpovídají zvolené hodnotě základní délky. Pokud tomu tak není, zvolí se jiná hodnota základní délky. Cílem je dosáhnout kombinace hodnot parametrů a základní délky uvedené v 2.1.

³V praxi to znamená, že řez by měl být veden kolmo na převládající směr nerovností povrchu.



3. Měření se zopakuje se základní délkou nastavenou na hodnotu kratší než v kroku 2. Naměřená hodnota se porovná s tabulkou 2.1.
4. Pokud souhlasí s tabulkou 2.1 pouze hodnoty parametrů získané v kroku 2, jsou tyto hodnoty správné. Pokud hodnoty získané v kroku 3 taky tvoří kombinaci uvedenou v tabulce 2.1, pak je správná tato kombinace základní délky a hodnot.

2.4.2. Postup pro periodický profil drsnosti

1. Graficky se odhadne hodnota parametru RSm .
2. Pro odhadnutý parametr RSm se z tabulky 2.1 určí doporučená hodnota základní délky.
3. Ak je to nutné, t.j. ve sporném případě, změří se hodnota RSm za použití hodnoty základní délky určené podle 2.
4. Ak hodnota RSm z kroku 3 odpovídá větší nebo menší hodnotě základní délky, než byla zvolena v kroku 2, použije se právě odpovídající hodnota základní délky.
5. Získá se reprezentativní měření žádaných parametrů při použití hodnoty základní délky odhadnuté v předešlých krocích.

Tabulka 2.1 Přehled kritérií pro výběr základní délky drsnosti

Ra [μm]; Rz [μm]; RSm [mm] ⁴	Základní délka drsnosti lr [mm]	Vyhodnocovaná délka drsnosti ln [mm]
$0,006 < Ra \leq 0,02$; $0,025 < Rz, Rz1max \leq 0,1$; $0,013 < RSm \leq 0,04$	0,08	0,4
$0,02 < Ra \leq 0,1$; $0,1 < Rz, Rz1max \leq 0,5$; $0,04 < RSm \leq 0,13$	0,25	1,25
$0,1 < Ra \leq 2$; $0,5 < Rz, Rz1max \leq 10$; $0,13 < RSm \leq 0,4$	0,8	4
$2 < Ra \leq 10$; $10 < Rz, Rz1max \leq 50$; $0,4 < RSm \leq 1,3$	2,5	12,5
$10 < Ra \leq 80$; $50 < Rz, Rz1max \leq 200$; $1,3 < RSm \leq 4$	8	40

⁴V normě [16] je na str. 11 v tabulce 3 u RSm nesmyslná jednotka μmm .



3. Použité měřicí přístroje a vzorky

Při měřeních pro potřeby této práce byly použity dva dotykové profilometry (Mahr Perthometer M2 a Taylor Hobson Surtronic 3+) a bezkontaktní měřicí přístroj Taylor Hobson Talysurf CCI Lite.

3.1. Mahr Perthometer M2

Mahr Perthometer M2 (obr. 3.1) je dílenský kontaktní profilometr s indukčním snímačem. Jeho měřicí hrot je diamantový kužel s poloměrem zaoblení špičky $r_{tip} = 2 \mu m$ a vrcholovým úhlem 90° . K povrchu je měřicí hrot přitlačován měřicí silou $0,7 mN$, v souladu s normou ISO 3274.[7]

Přístroj umožňuje přímé vyhodnocování parametrů drsnosti, přímý tisk protokolu o měření a export výsledků většího množství měření do počítače ve formátu CSV. Při měření lze použít jednu ze třech přednastavených základních délek (0,25; 0,8 a 2,5 mm) a odpovídající vyhodnocované délky.[7]

Uživatel může provést kalibraci vertikálního rozsahu pomocí proměření etalonu se známou hodnotou Rz, kalibraci v horizontálním směru přístroj uživateli neumožňuje.



Obrázek 3.1 Mahr Perthometer M2

Postup měření přístrojem Mahr Perthometer M2

Před samotným měřením je nutné nastavit parametry, které budou zahrnuty v protokolu o měření (nastavení platí pro papírovou i elektronickou verzi protokolu). Ze tří možností se nastaví základní délka a jí odpovídající vyhodnocovaná délka. Následně je možné spustit ukládání dat pro elektronickou verzi protokolu. Vzorek se umístí pod snímač přístroje a spustí se měření. Tištěný protokol je nutné vytisknout po každém měření. Pokud je požadován pouze elektronický protokol, opakuje se požadovaný počet měření a pak jsou výsledky jednotlivých měření najednou přeneseny do PC pomocí dodaného softwaru.



3.2. Taylor Hobson Surtronic 3+

Taylor Hobson Surtronic 3+ (obr. 3.2) je dílenský kontaktní profilometr s indukčnostíním snímačem. Jeho měřicí hrot je diamantový kužel s poloměrem zaoblení špičky $r_{tip} = 5 \mu m$ a vrcholovým úhlem 90° . [9]

Profilometr umožňuje přímé vyhodnocování některých parametrů drsnosti a export naměřeného profilu do softwaru TalyMap na další zpracování. Vyhodnocované délky je možné volit pouze z předprogramovaných hodnot, při zpracování v počítači je však možné použít různé základní délky, druhy filtrů, nebo exportovat naměřený profil pro zpracování jiným softwarem. [9]

Kalibraci vertikální souřadnice lze provést otáčením potenciometrem uloženým v otvoru vedle snímače, kalibrace v horizontálním směru není uživateli dostupná.



Obrázek 3.2 Taylor Hobson Surtronic 3+

Postup měření přístrojem Taylor Hobson Surtronic 3+

Přístroj umožňuje provést orientační měření se zobrazením hodnot vybraných parametrů na obrazovce přístroje, pro které je nutné pouze zvolit základní délku a jí odpovídající vyhodnocovanou délku. Po umístění vzorku pod snímač se měření spustí tlačítkem na přístroji. Pro počítačové zpracování dat je nutné na přístroji nastavit vyhodnocovanou délku v režimu exportu dat a měření spustit z počítače. Opakované měření beze změny vyhodnocované délky je možné spouštět přímo z počítače, bez zásahu na přístroji.

Využití dotykových přístrojů v této práci

Kvůli obtížím při kalibraci dostupných dotykových přístrojů bylo upuštěno od číselného srovnávání výsledků měření kontaktní a bezkontaktní metodou. Východiskem pro srovnání metod byly proto kvalitativní aspekty dotykových přístrojů jako např. rychlost měření, bezproblémové dodržení požadované vyhodnocované délky, atd.

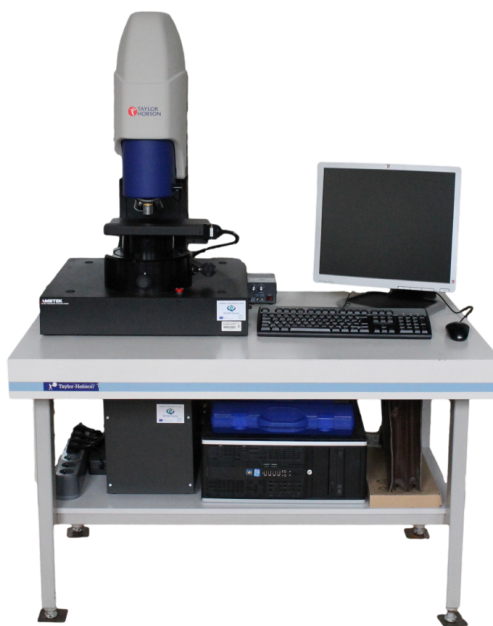


3.3. Taylor Hobson Talysurf CCI Lite

Taylor Hobson Talysurf CCI Lite (obr. 3.3) je bezdotykový 3D profilometr založen právě na principu koherenční korelační interferometrie. Přístroj disponuje snímačem obrazu o rozlišení 1024x1024 pixelů a třemi objektivy typu Mirau se zvětšením 10×, 20× a 50×. Těmto objektivům odpovídají vyhodnocované plochy 1,65 × 1,65 mm, 0,825 × 0,825 mm a 0,33 × 0,33 mm [10].

Naměřená data zpracovává připojený počítač v softwaru TalyMap, který umožňuje různé úpravy modelu povrchu, jako např. vyrovnaní povrchu nebo odstranění tvaru, interpolace nenaměřených bodů atd., vyhodnocování různých parametrů textury povrchu i export dat v různých formátech pro další zpracování [10].

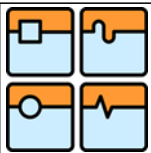
Kalibrace přístroje se provádí softwarově, vertikální měření se kalibruje pomocí stupňovitých standardů, příčná kalibrace se provádí pomocí etalonu se soustřednými kružnicemi, který umožňuje kalibraci přístroje na subpixelovou přesnost. Navíc je potřeba odstranit chyby způsobené nepřesnostmi referenčního zrcadla objektivu, čeho se dosáhne korekcí základny pomocí přesného plochého zrcadla [10].



Obrázek 3.3 Taylor Hobson Talysurf CCI Lite

Postup měření přístrojem Taylor Hobson Talysurf CCI Lite

Prvním krokem měření je volba požadovaného objektivu. Fyzicky se objektiv nastaví pomocí revolverové hlavičky a zvolený objektiv se nastaví v ovládacím softwaru přístroje. Vzorek se umístí na pohyblivý stůl přístroje a do zorného pole objektivu se dopraví pomocí elektrických posuvů. Je nutno dbát, aby nedošlo ke kontaktu mezi povrchem vzorku a čočkou objektivu, což by objektiv mohlo nenávratně poškodit. Je tedy vhodné mít objektiv při manipulaci se vzorkem v dostatečně vysoké poloze.



Když je vzorek umístěn v požadované poloze, je nutné zaostřit přístroj na povrch vzorku pomocí vertikálního posuvu. Znovu je nutno dbát, aby se objektiv nedotkl vzorku, čemu lze zabránit vhodnou volbou dolní hranice posuvu Z_{STOP} v ovládacím softwaru přístroje.

Dalším krokem je volba rozsahu měření. Zde má operátor možnost ovlivnit rychlost měření a kvalitu získaných dat. Hranice rozsahu měření se ručně nastavují při jemném přejíždění ve vertikálním směru na místa, kde se na snímači začínají objevovat interferenční obrazce. Následně je již možné spustit měření, které trvá přibližně jednu minutu, v závislosti na rozsahu měření, a tedy i na členitosti vyhodnocovaného povrchu.

Naměřená data se následně zpracují v softwaru TalyMap. Před vyhodnocením parametrů je např. u válcovitých vzorků nutné odstranit tvar metodou nejmenších čtverců, případně povrch softwarově vyrovnat a odstranit tak sklon způsoben nedokonalým umístěním vzorku na stole přístroje. Rovněž je možné interpolací doplnit body, které z různých důvodů nebyly změřeny.

3.4. Použité vzorky

Měření byla provedena na etalonech značek Diavite, Mahr, Mitutoyo a Taylor Hobson a na vybraných vzorcích ze vzorkovnice ZB z roku 1958.

Referenční povrch etalonu Mahr typu PGN-3 (obr. 3.5), výrobní číslo 10780/01, je vyroben ze skla a vsazen do kovového pouzdra. Etalon je charakterizován jmenovitými hodnotami $Ra = 0,9 \mu m$, $Rz = 3,2 \mu m$ a $RSm = 0,12 mm$ při jmenovité hodnotě cut-off $\lambda_c = 0,8 mm$ [4],[8].

Etalon Mitutoyo typu 178-601 (obr. 3.6) má kovový referenční povrch, který je vsazen do plastového pouzdra. Charakterizován je jmenovitými hodnotami $Ra = 3,05 \mu m$ a $Rmax = 9,9 \mu m$ [4].

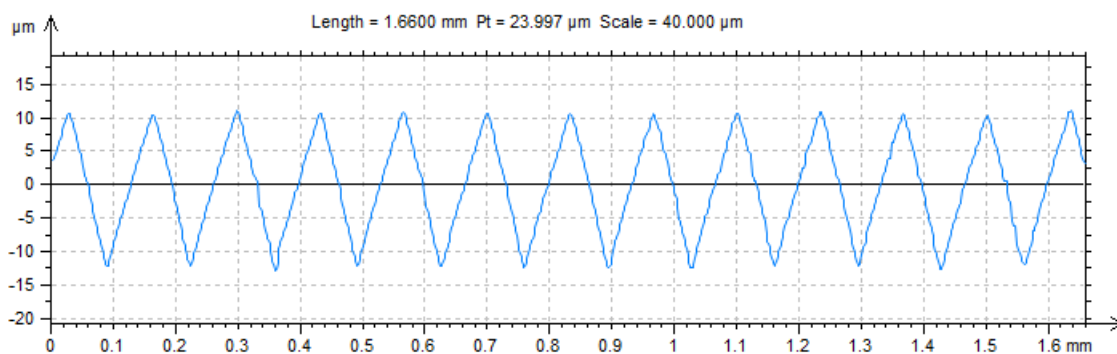
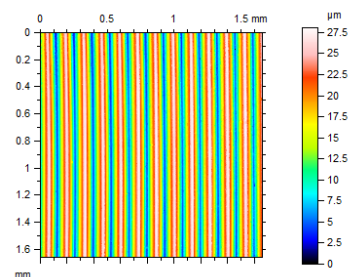
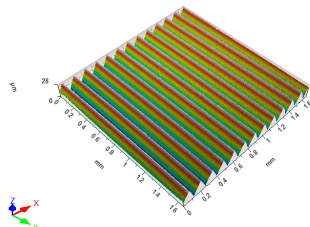
Jak etalon Mahr, tak i etalon Mitutoyo odpovídají podle údajů výrobců typu C1 dle ISO 5436-1, tzn. jedná se o měřicí etalony rozteče s drážkami se sinusovým profilem.

Etalon Taylor Hobson typu 112/1534 (obr. 3.4) má kovovou referenční plochu upevněnou na kovové podložce. Uvedena je u něj pouze hodnota $Ra = 0,6 \mu m$. Tento etalon odpovídá typu C2 dle ISO 5436-1, je to tedy měřicí etalon rozteče s drážkami s profilem rovnoramenného trojúhelníku [4],[8].

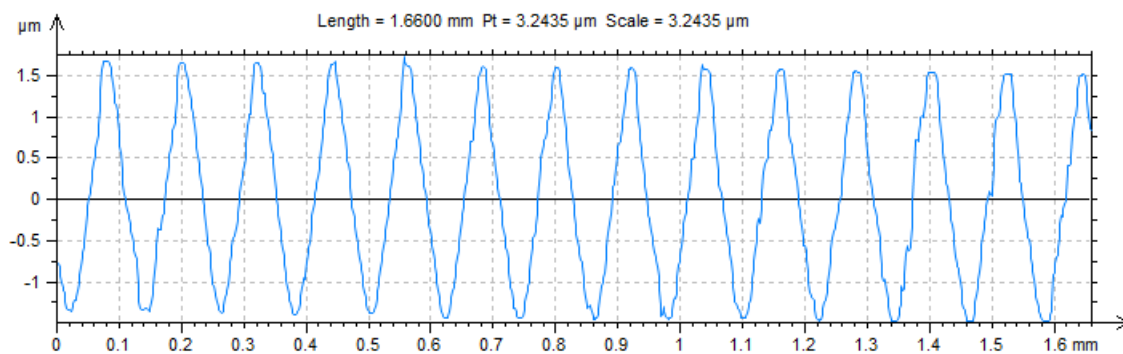
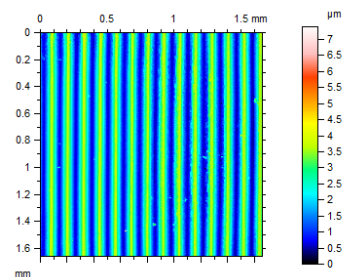
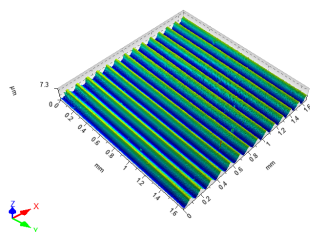
Etalon Diavite (obr. 3.7) má skleněný referenční povrch vsazen do kovového pouzdra. Při jmenovité hodnotě cut-off $\lambda_c = 0,75 mm$ je charakterizován hodnotami $Ra = 0,6 \mu m$ a $Rmax = 1,5 \mu m$.

Vzorkovnice ZB (obr. 3.8) je primárně určena jako porovnávací pomůcka pro vizuálně-srovnávací metodu hodnocení textury obrobených povrchů v dílenském prostředí nebo před dalším měřením. Jednotlivé vzorky byly vyrobeny různými technologiemi obrábění z automatové oceli a jsou šrouby přichyceny ve dřevěné kazetě. Ve vzorkovnici je ke každému vzorku uvedena technologie, kterou byl vyroben, a jmenovitá a skutečná hodnota Rq (historicky značeno H_{sk}). Charakteristiky jednotlivých vzorků lze najít v obr. 3.8.

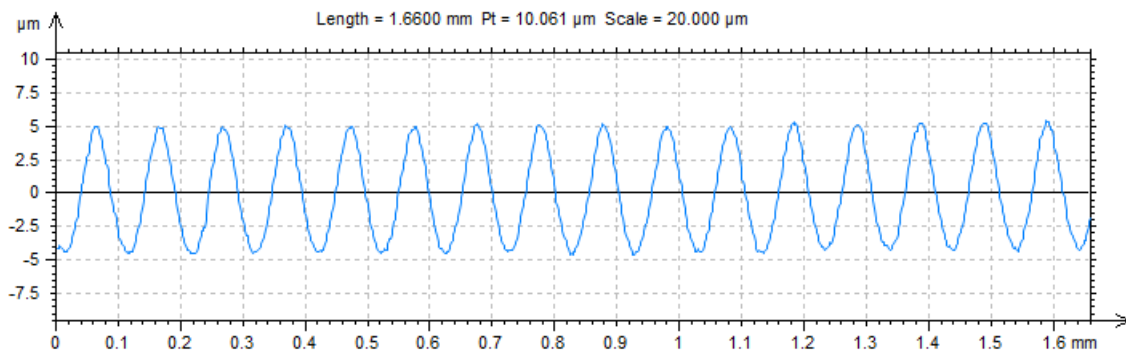
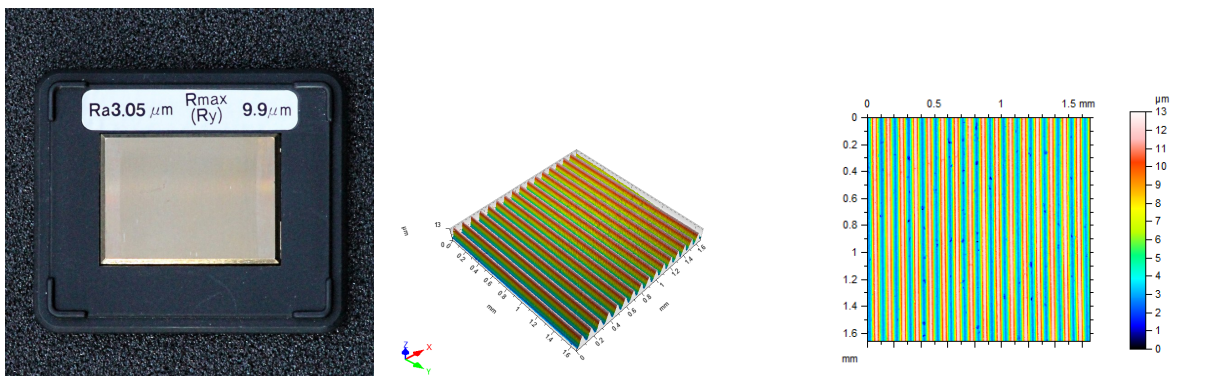
Na všech vzorkách byla provedena různá měření, některá však bylo nutné z různých důvodů vyřadit. Např. etalon Diavite byl vyřazen, protože má kvůli svému věku četné vady povrchu, které ho dělají nevhodným pro aplikaci profilové metody.



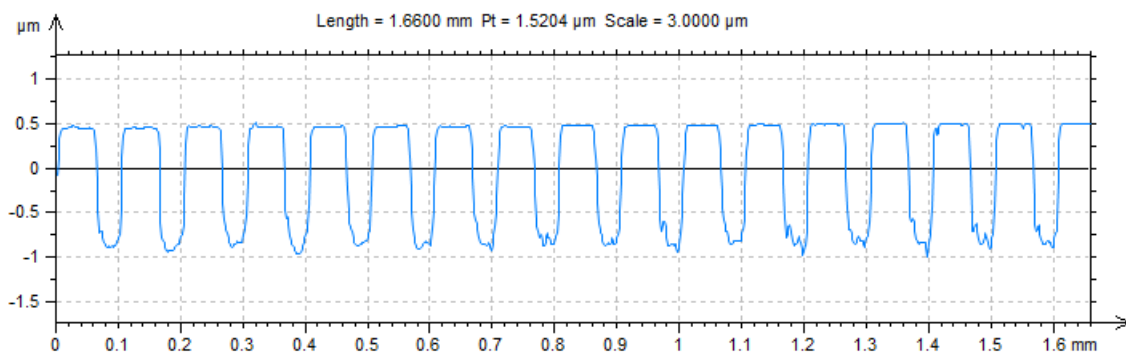
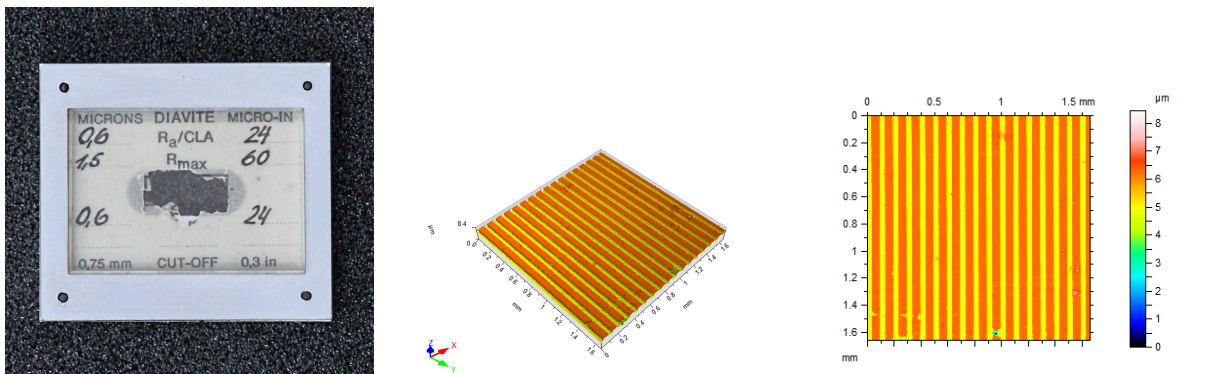
Obrázek 3.4 Etalon Taylor Hobson



Obrázek 3.5 Etalon Mahr



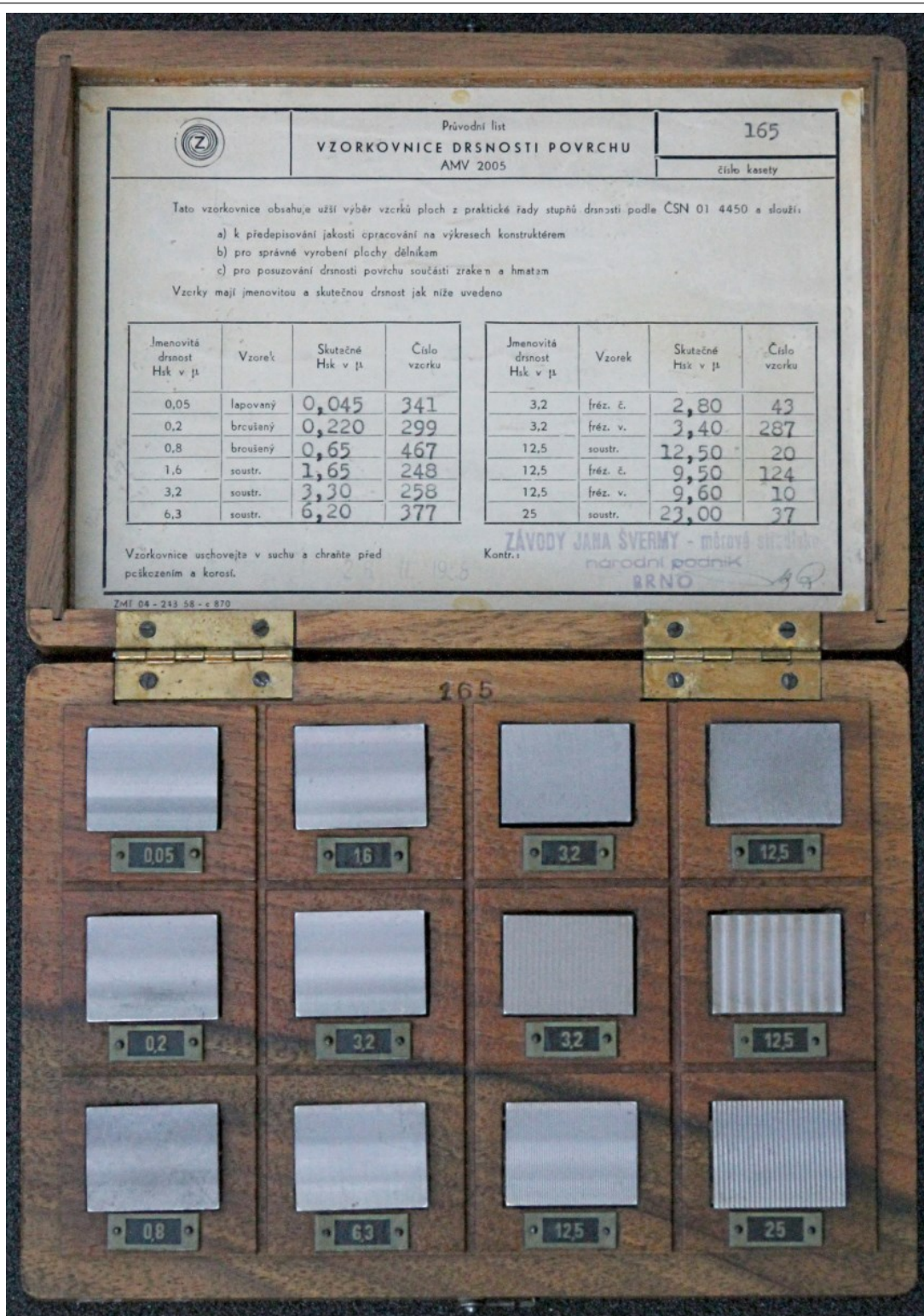
Obrázek 3.6 Etalon Mitutoyo



Obrázek 3.7 Etalon Diavite



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Obrázek 3.8 Vzorkovnice Zbrojovka Brno



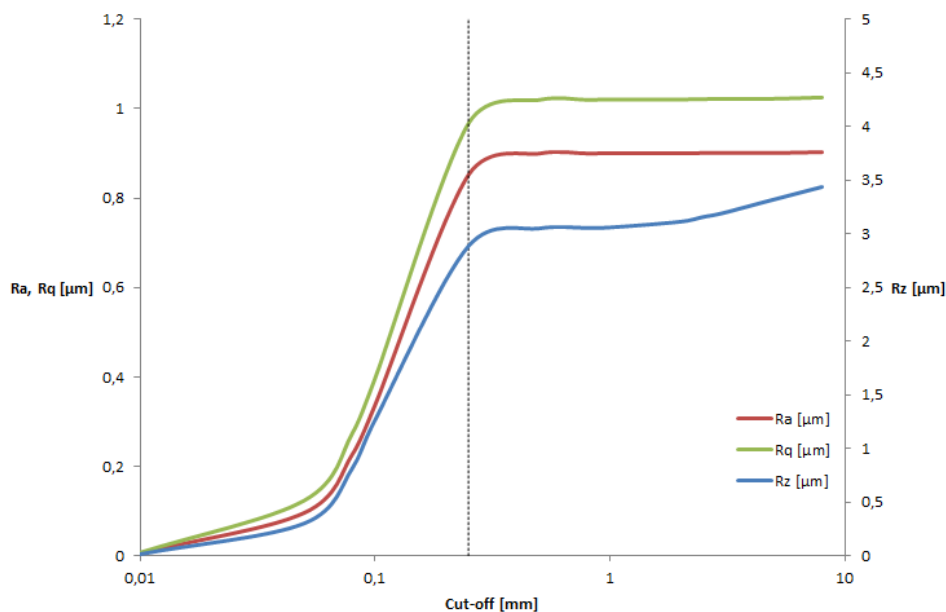
4. Analýza výsledků měření

4.1. Vliv základní délky na hodnoty R-parametrů

Postupy uvedené v kapitole 2.4 zabezpečují, že se R-parametry vyhodnotí na minimální postačující vyhodnocované délce nutné k dosažení reprezentativních výsledků. Použití zbytečně velké základní délky nemá při jinak precizně provedeném měření příliš výrazný vliv na hodnoty R-parametrů. Měření činí časově náročnějším a nákladnějším a obvykle způsobuje zkreslení hodnot W-parametrů. Na druhé straně použití příliš krátké základní délky výsledné hodnoty R-parametrů i W-parametrů výrazně zkresluje.[1]

Základní délka l_r je číselně rovna charakteristické vlnové délce λ_c , která určuje rozhraní mezi vlnovými délkami drsnosti a vlnitosti.[14] Při filtraci jsou do profilu drsnosti zahrnuty složky signálu (primárního profilu) s vlnovou délkou menší než λ_c , složky delší vytvoří profil vlnitosti. Volbou správné hodnoty λ_c tedy zabezpečujeme správné rozdělení primárního profilu na jeho hlavní složky: profil drsnosti a profil vlnitosti.

Vliv základní délky na hodnoty R-parametrů byl např. v [1] analyzován na teoretickém profilu tvaru sinusoidy. Jelikož se při měření bezkontaktním přístrojem projevil problém s dodržáním základní délky, zpracoval jsem po dohodě s vedoucím práce studii těchto závislostí založenou na měření reálných povrchů.



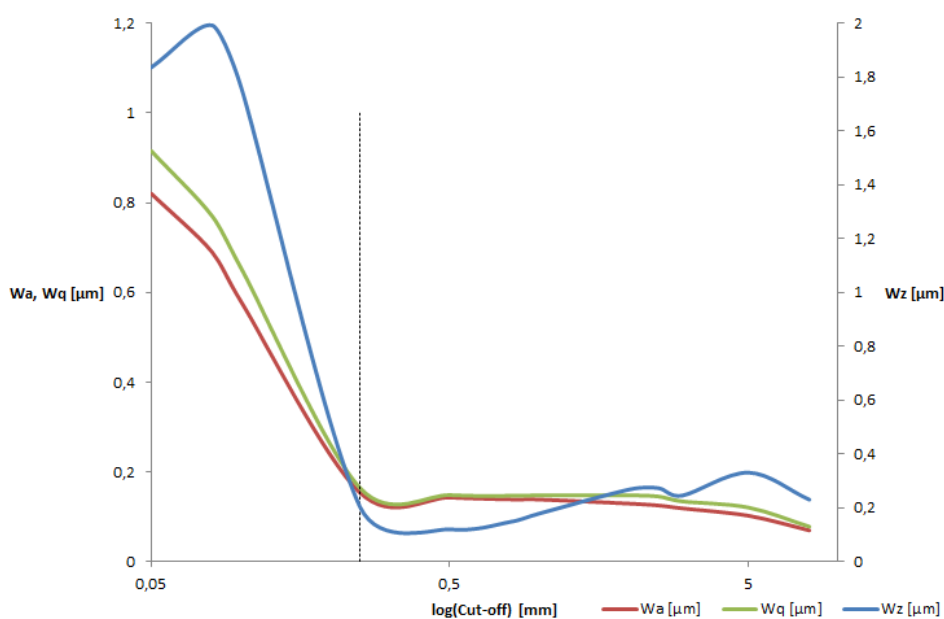
Obrázek 4.1 Graf závislostí R_a , R_q a R_z na λ_c , hodnoty naměřeny přístrojem Taylor Hobson Talysurf CCI na etalonu Mahr

Grafy průběhů R- a W-parametrů byly vytvořeny aplikací profilové metody při různých hodnotách základní délky na modely povrchů vytvořené sešitím 13 měření přístrojem Talysurf CCI Lite s objektivem s $10\times$ zvětšením. Měření byla provedena na všech etalonech i na několika vzorcích ze vzorkovnice ZB. Každý model byl před vyhodnocením parametrů softwarově vyrovnán, byly doplněny neměřené body a odstraněn tvar povrchu všude, kde



to bylo nutné (zejména u válcových vzorků). Do práce byly vybrány nejreprezentativnější průběhy závislostí R-parametrů na základní délce.

V grafu 4.1 je čárkovanou čarou naznačená hodnota cut-off splňující podmínky dané postupem v kap. 2.4.2, v tomto případě platí $\lambda_c = 0,25 \text{ mm}$. Z grafu je zřejmé, že v oblasti $\lambda_c < 0,25 \text{ mm}$ se s měnící se hodnotou λ_c mění hodnoty amplitudových parametrů výrazně. V oblasti $\lambda_c > 0,25 \text{ mm}$ je změna hodnot amplitudových charakteristik menší, protože probíhá zahrnováním složek s vysokou vlnovou délkou a malou amplitudou, které při dodržení postupu měření podle ISO 4288 zahrnujeme do profilu vlnitosti, resp. k úchylkám tvaru. Za zmínění stojí, že jmenovitá hodnota základní délky předepsána výrobcem pro tento etalon $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$ posouvá kalibrační bod právě do oblasti, kde jsou hodnoty R-parametrů stabilní.



Obrázek 4.2 Graf závislostí W_a , W_q a W_z na λ_c , hodnoty naměřeny přístrojem Taylor Hobson Talyusurf CCI na etalonu Mahr

Z grafu 4.1 jsou zřejmé důsledky volby příliš malé hodnoty λ_c . Důsledky volby příliš velké hodnoty λ_c lépe ilustruje graf závislosti amplitudových parametrů vlnitosti na charakteristické vlnové délce λ_c .

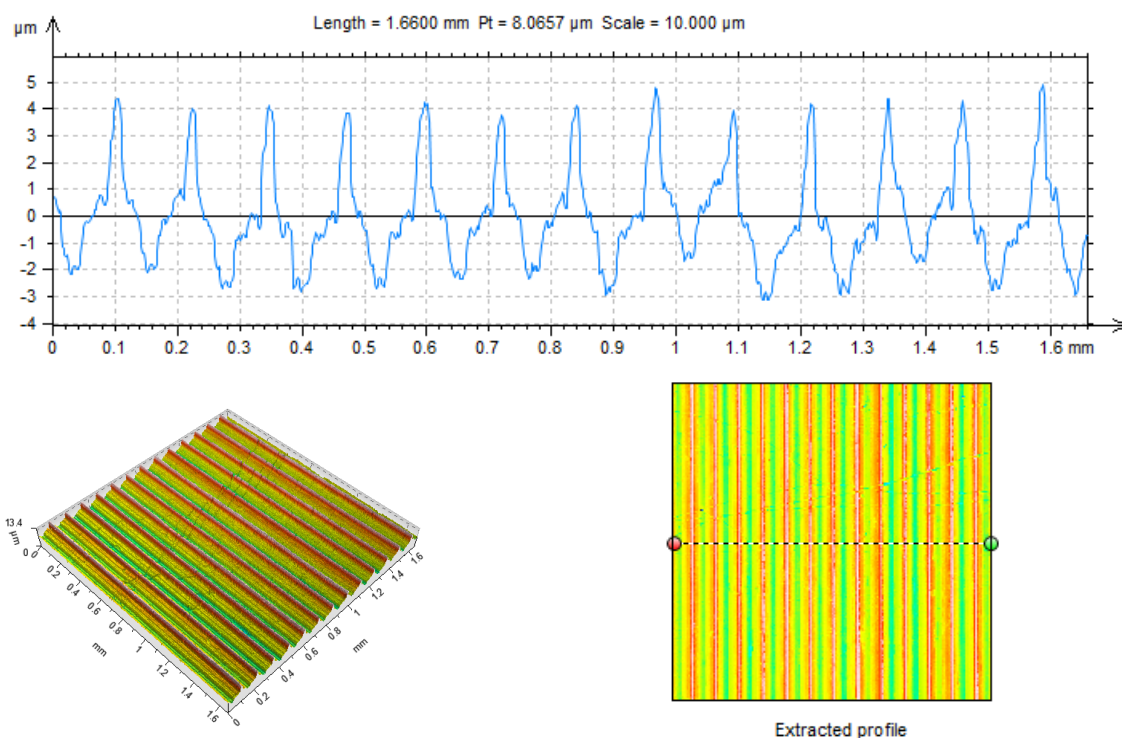
Z grafu 4.2 je patrné, že podobně jako hodnoty R-parametrů se hodnoty W-parametrů nejvíce mění až do nastavení hodnoty základní délky doporučené normou ISO 4288. Výrazný záskok hodnoty W_z při $\lambda_c < 0,1 \text{ mm}$ přisuzují faktu, že se datový bod v $\lambda_c = 0,05 \text{ mm}$ nachází na hranici rozlišitelnosti přístroje. Kolísání hodnot při $\lambda_c > 1 \text{ mm}$ vzniklo pravděpodobně kvůli nedůslednému sešívání.

Z výsledků analýzy je zřejmé, že dodržení minimální hodnoty základní délky je zcela klíčové pro srovnatelnost naměřených hodnot parametrů textury povrchu. Následující část práce se proto věnuje možnostem dodržení minimální základní délky při měření bezkontaktním přístrojem.



4.2. Dodržení základní a vyhodnocované délky při bezkontaktním měření

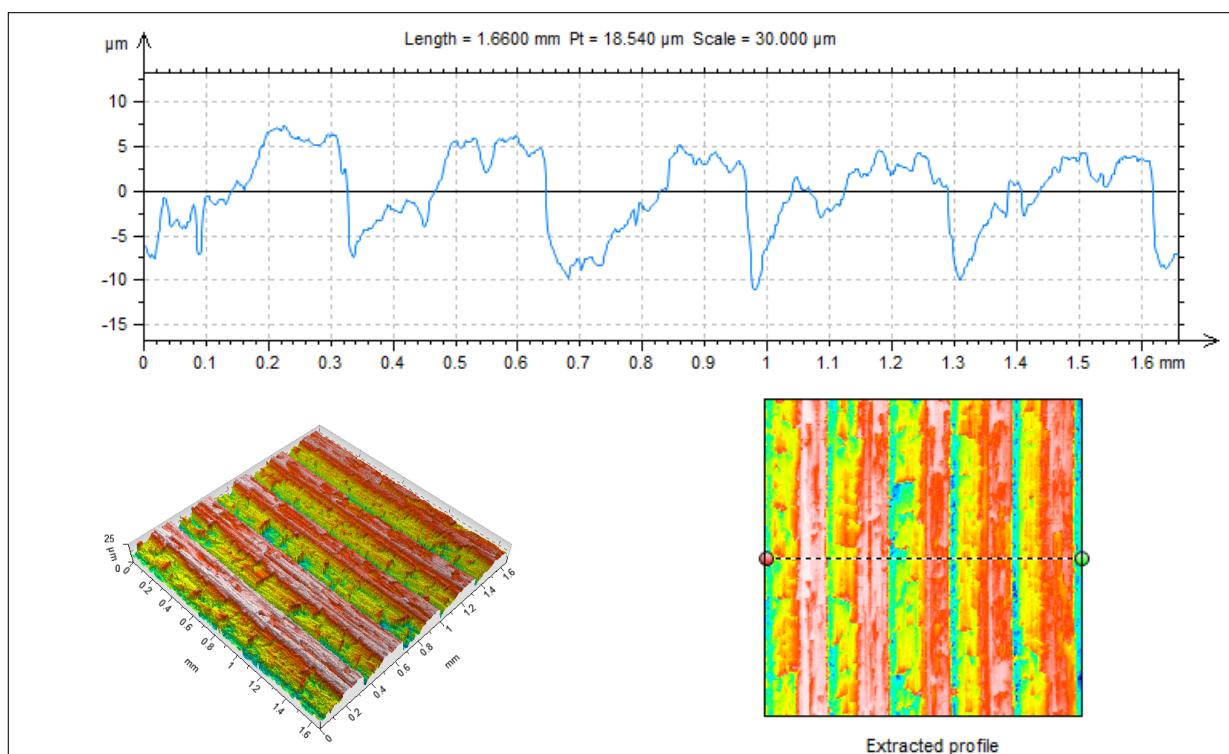
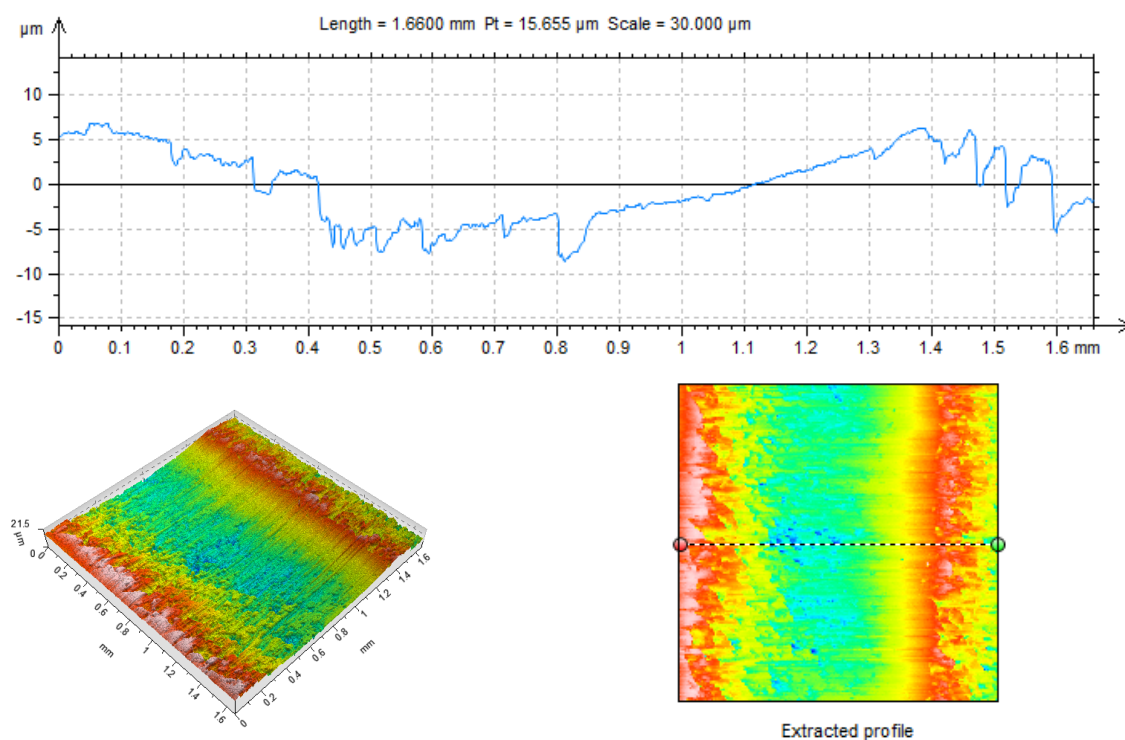
Hlavní problém při použití bezkontaktních metod na vyhodnocování profilových charakteristik drsnosti sestává z těžkostí dodržet normou požadovanou vyhodnocovanou délku. Bez použití softwarového sešívání např. není možné s objektivem s $10\times$ zvětšením dodržet požadavek vyhodnocované délky rovné pěti základním délkám u vzorků, kterým odpovídají základní délky větší než $0,25\text{ mm}$ (viz. tab. 2.1). U objektivů s vyšším zvětšením jsou možnosti ještě omezenější.



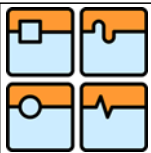
Obrázek 4.3 Vzorek ZB č. 248 - soustružený

Toto lze ilustrovat na obr. 4.3 až 4.5. Tyto obrázky znázorňují modely periodických povrchů získané jedním měřením s objektivem s $10\times$ zvětšením. Na modelu vzorku ZB č. 248 (obr. 4.3) je dostatek prvků profilu na vyhodnocení drsnosti z jednoho profilu, počet prvků profilu na modelu vzorku ZB č. 43 (obr. 4.4) postačuje na vyhodnocení na jedné základní délce, ale na modelu vzorku ZB č. 287 (obr. 4.5) není vůbec možné bez sešití provést vyhodnocení parametrů drsnosti.

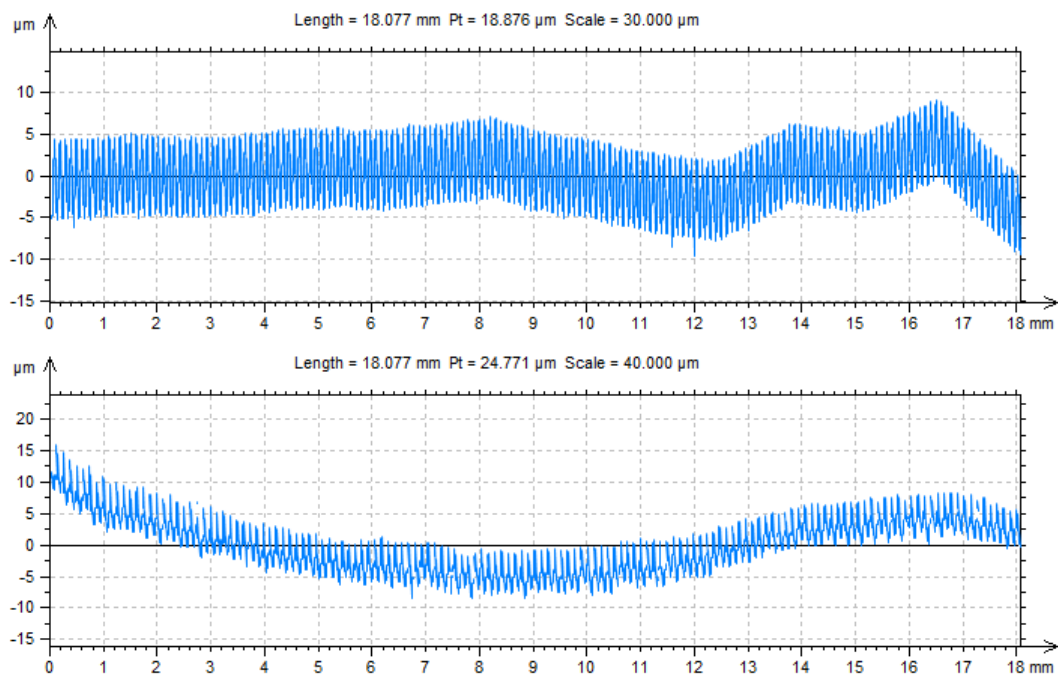
První možné řešení problému s dodržением požadavku na vyhodnocovanou délku se spočívá v získání základního profilu z modelu plochy vytvořeného sešitím několika měření. Takový postup by umožnil přesně dodržet požadavky na základní délku podle ISO 4288, výrazně by však prodloužil dobu měření.

**Obrázek 4.4** Vzorek ZB č. 43 - čelně frézovaný**Obrázek 4.5** Vzorek ZB č. 287 - válcově frézovaný

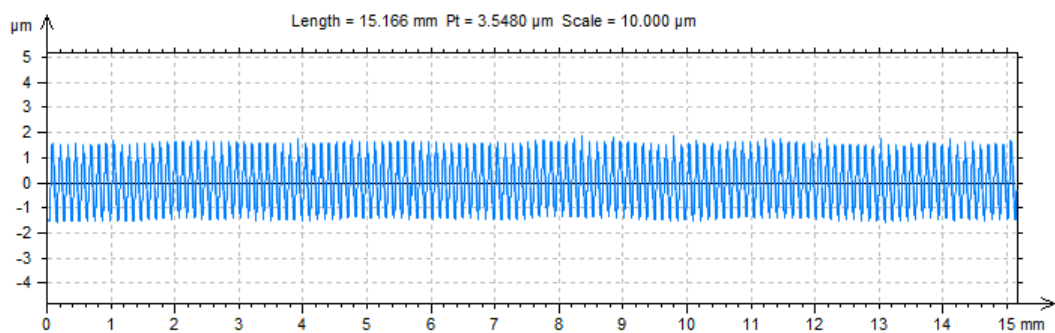
Při praktických pokusech se sešívání ukázalo jako potenciálně problematické. Při nedokonalém srovnání vzorku nebo nedostatečném překryvu sešívání měření v některých



případech výsledný model povrchu obsahoval nereálné ostré zlomy nebo různé tvary. Ty se pak promítaly do hodnot amplitudových parametrů profilu drsnosti a zejména vlnitosti.

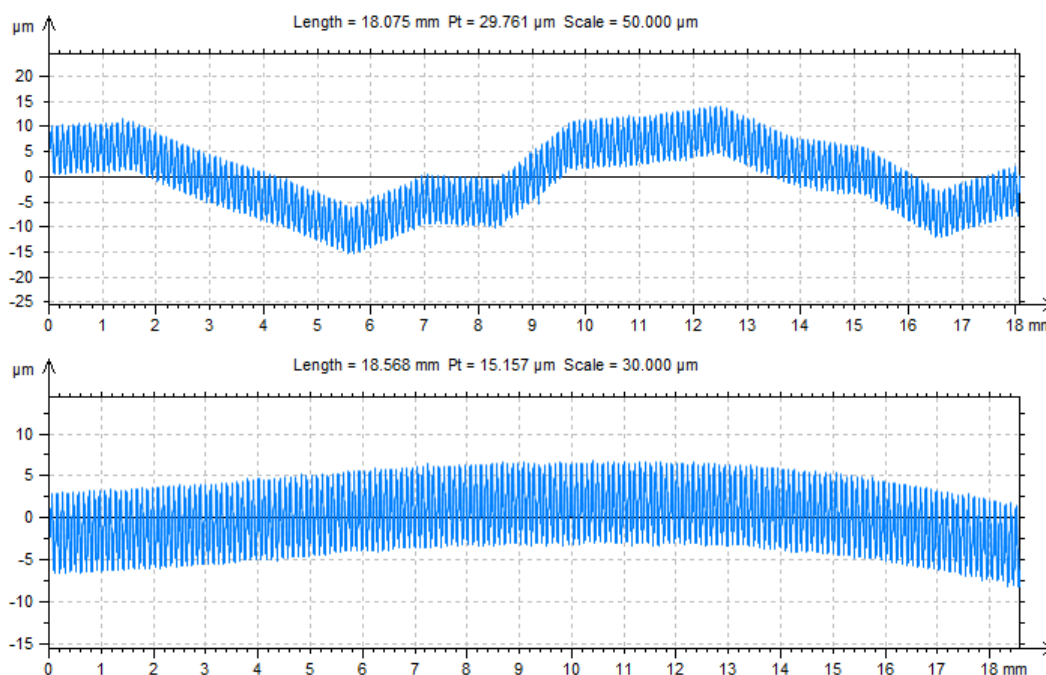


Obrázek 4.6 Chyby vznikající při neopatrném sešívání, etalon Mitutoyo a vzorek ZB č. 248



Obrázek 4.7 Správné sešívání, etalon Mahr

Protože byla všechna měření vytvořena automatickým snímáním a sešíváním, bylo vyzkoušeno, zda-li se projeví rozdíl mezi automaticky a ručně nasímaným a následně sešitým modelem povrchu. Pro tyto účely bylo na jednom místě povrchu etalonu Mitutoyo nejdříve změřeno 13 sousedících plošek s využitím automatického nástroje pro sešívání měření v programu TalyMap Gold při zachování výchozích nastavení (překryv 20%). Pak bylo měření zopakováno s ručním posuvem i zaostřením. Posuv byl nastaven na hodnotu 1,3 mm, která odpovídá překryvu 22%. Profily výsledných povrchů jsou znázorněny na obr. 4.8.



Obrázek 4.8 Rozdíl mezi automatickým (nahore) a ručním sešitím, etalon Mitutoyo

Správného manuálního sešití je tedy možné dosáhnout především správným nastavením všech parametrů (např. precizním vyrovnáním vzorku, ručním posuvem a zaostřením při měření) a následným manuálním sešitím v softwaru TalyMap Gold. Měl by být zabezpečen dostatečný překryv sešivaných měření (např. alespoň 20% délky u běžných povrchů). Tento postup je časově náročný a vyžaduje trvalou pozornost obsluhy přístroje.

Možnou alternativou sešívání je použití většího množství profilů získaných z jediné naměřené plochy. Počet profilů, které lze z měřené plochy získat je dán rozlišením snímače přístroje. Použitý profilometr Talysurf CCI tedy umožňuje při jednom měření vyhodnotit 1024 profilů povrchu o délkách 1,65 mm, 0,825 mm nebo 0,33 mm pro objektivy s 10×, 20× a 50× zvětšením. Software vyhodnocuje jednotlivé profily samostatně a výstupem jsou střední hodnoty a směrodatné odchylky hodnot požadovaných parametrů. Tímto způsobem je možné udržet dobu jednoho měření kolem jedné minuty a zároveň se vyhnout zkreslení způsobovanému sešíváním. Proto navrhovaný postup měření přístrojem Talysurf CCI využívá právě tuto metodu vyhodnocování.

4.3. Variabilita R-parametrů v rámci jednoho vzorku

Na bezkontaktním přístroji Talysurf CCI byly objektivem 10× změřeny dvě sousedící plošky na etalonu Mitutoyo. Měření bylo vyhodnoceno ze 102 sousedících profilů na každé z plošek při hodnotě cut-off 0,25 mm, odpovídající [16]. Výběrové směrodatné odchylky byly srovnány Fischerovým testem s nulovou hypotézou, že jsou si rovny. Se stejnou nulovou hypotézou bylo provedeno srovnání výběrových aritmetických průměrů 2-výběrovým T-testem. Oba testy byly vykonány na hladině významnosti $\alpha = 0,05$, tzn. nulová hypotéza byla zamítnuta, pokud $p < 0,05$. Výsledky jsou vypsány do tabulky 4.1

**Tabulka 4.1** Srovnání variability a výběrových aritmetických průměrů parametrů drsnosti sousedících plošek

Parametr	\bar{x}_A	s_A	\bar{x}_B	s_B	p_{F-test}	p_{T-test}
Ra	2,9419	0,0083118	2,9385	0,0059462	0,001	0,001
Rq	3,2856	0,0069992	3,2782	0,0060273	0,135	0,000
Rz	9,6446	0,064272	9,557	0,052398	0,041	0,000
RSm	0,10165	0,0002218	0,10197	0,00009	0,000	0,000

Jak je z tabulky zřejmé, nulové hypotézy byly zamítnuty při testech kromě testu rovnosti rozptylů parametru Rq . Mezi rozptyly parametru Rq na plochách A a B není statisticky významný rozdíl, ale mezi rozptyly ostatních parametrů a všemi středními hodnotami statisticky významný rozdíl je.

Takto výrazná variabilita měření vykonaných na bezprostředně sousedících místech při stejném nastavení přístroje poukazuje na složitost statistického srovnávání parametrů drsnosti. Rovněž se ponouká myšlenka využít míru variability textury povrchu na hodnocení technologií opracování povrchů. Možnost jejího využití je jedním z námětů pro navazující výzkum.

4.4. Srovnání kontaktních a bezkontaktních metod

Následující srovnání vychází z pozorování při vyhodnocování analýz cut-off a variability charakteristik povrchu.

Měření drsnosti kontaktními přístroji je poměrně rychlé, přístroje jsou konstrukčně jednoduché a tudíž levné. Malé rozměry snímačů umožňují kontrolu i obtížně dostupných ploch. Mezi nevýhody kontaktních přístrojů pak patří nutnost zcela se vyhybat nedokonalostem povrchu (viz. 2.3) a nemožnost hodnotit plošné parametry textury povrchu. U použitých přístrojů dílenského provedení lze k nevýhodám přidat omezené možnosti kalibrace a výrazné ovlivnění měření zvýšením teploty způsobeným vícenásobným opakovaným měřením.

Metoda koherenční korelační interferometrie má ve srovnání s kontaktními metodami vyšší rozlišitelnost, širší možnosti kalibrace a umožňuje získat detailnější informace o textuře povrchu ve srovnání s kontaktními metodami. Na druhou stranu je použitý přístroj konstrukčně složitý a velký, což zvyšuje jeho cenu a taky znemožňuje kontrolu obtížně dostupných ploch (vnitřní povrchy otvorů a děr a pod.) bez fyzických úprav zkoumaného objektu. Navíc vlastnosti použité optické soustavy vedou k dalším problémům zejména při použití profilové metody.

4.5. Návrh postupu měření bezkontaktním profilometrem

Postup měření uvedený v příloze A je navržen tak, aby zajistil dodržení požadavku ISO 4288 na základní délku při co nejkratším měření a co nejmenší možnosti ovlivnění výsledku chybou operátora.



Z obou důvodů se navrhovaný postup vyhýbá sešívání několika měření, kdykoliv to je možné. Z důvodů naznačených v kap. 4.3 postup vyžaduje minimální počet hodnocených profilů nutný ke splnění požadavků normy.

Podrobné ověření správnosti tohoto postupu a srovnatelnosti jeho výsledků se zaužívanými metodami je námětem pro další zkoumání.



5. Závěr

Kapitola 1.1 předkládá termín „textura povrchu“ nahrazující termín „struktura povrchu“ jako překlad anglického „surface texture“ z normy ISO 8785. V různých normách ČSN se v dnešní době používají oba termíny. Po konzultaci s vedoucím se v této práci používá termín „textura povrchu“, jakožto výstižnější překlad původního anglického termínu.

Přehled metod metrologie textury povrchu, který byl prvním cílem této práce, je zpracován v kapitole 1.2. Metody jsou v této kapitole rozděleny podle principu měření a stručně popsány. Metody použité v práci, t.j. dotyková (profilová) metoda a metoda koherenčně korelační interferometrie, jsou popsány podrobněji.

V kapitole 1.3 jsou definovány základní pojmy profilové metody hodnocení textury povrchu.

Kapitola 1.4 obsahuje definice použitých parametrů profilu. Po poradě s vedoucím práce byly zvolené pojmy a parametry profilu drsnosti znázorněny na skutečném profilu etalonu Mitutoyo. Profil byl změřen přístrojem Talysurf CCI Lite a exportován pro grafické zpracování do softwaru gnuplot [12].

Kapitola 2 je zaměřena na normalizované postupy měření dle normy ISO 4288. Obsahuje základní pravidla pro dosažení srovnatelnosti měření a postupy pro volbu správných nastavení filtru profilu λ_c . Kritéria pro volbu základní délky byla pro přehlednost uspořádána do jednotné tabulky.

V kapitole 3 jsou popsány přístroje a vzorky, které byly použity při vypracování této práce. Jedná se o kontaktní přístroje Mahr Perthometer M2, Taylor Hobson Surtronic 3+ a jeden bezkontaktní přístroj Taylor Hobson Talysurf CCI Lite. U každého přístroje jsou uvedeny jeho technické parametry a příslušné postupy měření, zpracovány podle originální technické dokumentace. Jako objekty měření byly použity etalony Diavite, Mahr, Mitutoyo, Taylor Hobson a vzorky ze vzorkovnice ZB. Všechny vzorky jsou charakterizovány jmenovitými hodnotami některých parametrů drsnosti podle údajů od jejich výrobců. Etalony Mahr, Mitutoyo a Taylor Hobson jsou popsány s ohledem na normu ISO 5436-1 stanovující druhy etalonů textury povrchu.

Na základě výsledků měření je v kapitole 4.1 analyzován vliv základní délky na hodnoty R-parametrů. Použity byly údaje z povrchu etalonu Mahr, získány přístrojem Talysurf CCI Lite. Na průběhu závislosti parametrů drsnosti R_a , R_q , R_z a vlnitosti W_a , W_q , W_z na základní délce je demonstrována nutnost dodržet dostatečnou minimální hodnotu základní délky.

Používání bezkontaktní metody u povrchů s vyšší drsností někdy vytváří problém s dodržením požadavku na vyhodnocovanou délku. V kapitole 4.2 jsou uvedeny dvě možnosti, jak tento problém eliminovat. Sešívání několika měření umožňuje striktní dodržení požadavků normy ISO 4288, ale nechává prostor pro ovlivnění měření chybou operátora přístroje. Vyhodnocení parametrů profilu na několika řezech z jednoho nasnímaného místa je rychlejší a omezuje prostor pro chyby, není však zcela v souladu s normou.

Na základě uvedeného byla vypracována příloha A, kde je vypracovaný návrh postupu měření přístrojem Talysurf CCI Lite. Postup měření je zpracován pro periodické a neperiodické povrchy. Pro všechny povrchy, kterým odpovídají základní délky $l_r < 0,25 \text{ mm}$ umožňuje tento postup přesné dodržení požadavků normy ISO 4288. U povrchů, kterým odpovídají vyšší hodnoty základní délky l_r , využívá navrhovaný postup kvůli zkrácení



doby měření vyhodnocování parametrů drsnosti z několika profilů z jednoho měřeného místa, resp. z modelu vytvořeného sešitím minimálního nevyhnutelného počtu měření. Při tomto postupu nejsou parametry vyhodnocovány z jednoho souvislého profilu. Proto vzniká otázka, jestli jsou všechny výsledky získány tímto postupem srovnatelné s výsledky měření dle ISO 4288. Podrobné statistické prozkoumání vlivu tohoto postupu na výsledné hodnoty parametrů je jedním z úkolů, které by mohly být vyřešeny v budoucnu.

V kapitole 4.3 je statisticky vyhodnocena variabilita parametrů textury povrchu v rámci jednoho vzorku. Údaje pro analýzu byly naměřeny přístrojem Talysurf CCI Lite na etalonu Mitutoyo. Výsledky srovnání poukazují na statisticky významné rozdíly mezi měřeními na různých částech jedné zkoumané plochy. Je předložena myšlenka využití variability jednotlivých parametrů pro hodnocení textury povrchu, která může být rovněž námětem pro další zkoumání.

Kontaktní a bezkontaktní metody jsou srovnány v kapitole 4.4. Přesnost a široké možnosti následného zpracování předurčují bezkontaktní metody ke kontrole funkčních ploch, na které jsou kladeny vysoké nároky na texturu povrchu. U těchto povrchů lze navíc očekávat jejich nízkou drsnost, díky čemu se vůbec nemusí projevit omezená velikost zorného pole přístroje. Kontaktní přístroje v dílenském provedení se zase jeví vhodné pro měření hrubších povrchů, kde nevadí jejich omezené možnosti kalibrace a pozitivně působí jejich jednoduchost měření i nízká cena. V (přesnějším) laboratorním provedení mohou být využity pro nedestruktivní kontrolu obtížně dostupných povrchů.

Možnosti dalšího zkoumání v oblasti měření textury povrchu jsou velice široké. Kromě již zmíněných témat, vycházejících z dílčích závěrů, může být námětem pro studium rozsáhlejší navazující statistická analýza rozdílů mezi měřeními pomocí různých přístrojů na rozličných principech. Pro další zkoumání je taky vhodná problematika kalibrace bezkontaktních profilometrů, podobně jako průzkum možností využití bezkontaktních přístrojů na další druhy zpracování dat (parametry Motif dle ISO 12085, parametry dle ISO 13565, plošné parametry dle ISO 25178).



Seznam použité literatury

- [1] BUMBÁLEK, Bohumil, Vladimír ODVODY a Bohuslav OŠŤÁDAL. *Drsnost povrchu*. Praha: SNTL, 1989, 340 s.
- [2] HAVRÁNEK, Bohuslav et al. *Slovník spisovného jazyka českého [online]*. AV ČR, 2011 [cit. 2014-02-22]. Dostupné z <http://bara.ujc.cas.cz/ssjc/>
- [3] JANKOVÝCH, Róbert. *Metrologie textury povrchu [prednáška]*. Brno, 2013
- [4] JANKOVÝCH, Róbert. *Metrologie textury povrchu V - Etalony drsnosti [prednáška]*. Brno, 2013
- [5] KAČALA, Ján et al. *Krátky slovník slovenského jazyka [online]*. JULS SAV, 2003 [cit. 2014-02-22]. Dostupné z: <http://slovník.juls.savba.sk/>
- [6] Meranie drsnosti, vlnitosti a primárneho profilu. KUREKOVÁ, Eva et al. *Technické meranie*. Bratislava: Ing. Peter Juriga, 2005, s. 22. ISBN 80-89112-04-8.
- [7] MAHR. *Marsurf: Mobile Roughness Measurement Devices*. 2005, 20 s. Dostupné z: http://www.universalmeasurement.com/MarSurf_M1-M2-2005.pdf
- [8] Rapp Industrial Sales Surface Finish Equipment. RAPP INDUSTRIAL SALES. *Rapp Industrial Sales Surface Finish Equipment [online]*. 2013 [cit. 2014-04-17]. Dostupné z: <http://surfacefinishequipment.com/reference%20standard%20.htm>
- [9] TAYLOR HOBSON. *Surtronic 3+: Rapid on the shopfloor Surface Texture Measurement [online]*. 2009, 8 s. [cit. 2014-4-17]. Dostupné z: <http://www.zimmerman.com.tw/uploads/sur3005-salesbrochure.pdf>
- [10] TAYLOR HOBSON. *Talysurf CCI Lite Talysurf CCI Lite - bezdotykový 3D profilmetr [pdf]*. 2008, 8 s.
- [11] WHITEHOUSE, David J. Surface metrology. *Measurement Science and Technology*. 1997-09-01, vol. 8, issue 9, s. 955-972. DOI: 10.1088/0957-0233/8/9/002. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0957-0233/8/i=9/a=002?key=crossref.e708dff5fd86e839c1a130fcfc3f9867>
- [12] WILLIAMS, Thomas et al. *Gnuplot*. 4.6.0. 2012. [cit. 2014-2-17] Dostupné z: <http://gnuplot.info>
- [13] ČSN EN ISO 3274. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Jmenovité charakteristiky dotykových (hrotových) přístrojů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1999
- [14] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1999
- [15] STN EN ISO 4287. *Geometrické špecifikácie výrobkov (GPS) - Profilová metóda - Termíny, definície a parametre charakteru povrchu*. Bratislava: Slovenský ústav technickej normalizácie, 1997



- [16] ČSN EN ISO 4288. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2000
- [17] ČSN EN ISO 8785. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Nedokonalosti povrchu - Termíny, definice a parametry*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2000
- [18] File:Mirau Interferometer.svg. WIKIMEDIA COMMONS. *Wikimedia Commons* [online]. 2006 [cit. 2014-04-17]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mirau_Interferometer.svg



Seznam obrázků

1.1	Přehled metod měření textury povrchu (upraveno dle [6])	5
1.2	Blokové schéma dotykového přístroje (upraveno dle [6])	6
1.3	Princip činnosti interferometrického objektivu Mirau[18]	6
1.4	3D model povrchu etalonu Mitutoyo a poloha použitého profilu, objektiv 10x	7
1.5	Prvek profilu etalonu Mitutoyo	9
1.6	Parametr Rz vyhodnocen na základní délce profilu etalonu Mitutoyo . . .	10
1.7	Parametr Ra vyhodnocen na základní délce profilu etalonu Mitutoyo . . .	10
1.8	Parametr Rq vyhodnocen na základní délce profilu etalonu Mitutoyo . . .	11
1.9	Parametr RSm vyhodnocen na základní délce profilu etalonu Mitutoyo . .	11
3.1	Mahr Perthometer M2	15
3.2	Taylor Hobson Surtronic 3+	16
3.3	Taylor Hobson Talysurf CCI Lite	17
3.4	Etalon Taylor Hobson	19
3.5	Etalon Mahr	19
3.6	Etalon Mitutoyo	20
3.7	Etalon Diavite	20
3.8	Vzorkovnice Zbrojovka Brno	21
4.1	Graf závislostí Ra , Rq a Rz na λc , hodnoty naměřeny přístrojem Taylor Hobson Talysurf CCI na etalonu Mahr	22
4.2	Graf závislostí Wa , Wq a Wz na λc , hodnoty naměřeny přístrojem Taylor Hobson Talysurf CCI na etalonu Mahr	23
4.3	Vzorek ZB č. 248 - soustružený	24
4.4	Vzorek ZB č. 43 - čelně frézovaný	25
4.5	Vzorek ZB č. 287 - válcově frézovaný	25
4.6	Chyby vznikající při neopatrném sešívání, etalon Mitutoyo a vzorek ZB č. 248	26
4.7	Správné sešití, etalon Mahr	26
4.8	Rozdíl mezi automatickým (nahore) a ručním sešitím, etalon Mitutoyo . .	27



Seznam tabulek

2.1	Přehled kritérií pro výběr základní délky drsnosti	14
4.1	Srovnání variability a výběrových aritmetických průměrů parametrů drsnosti sousedících plošek	28
B.1	Studie cut-off - R-parametry, etalon Mahr	40
B.2	Studie cut-off - W-parametry, etalon Mahr	40



Seznam použitých zkratek a symbolů

KSSJ	Krátký slovník slovenského jazyka
λ_s	krátkovlnný filtr, kterého aplikací na úplný profil vzniká základní profil
λ_c	filtr oddělující profil drsnosti od složek s většími vlnovými délkami
λ_f	filtr oddělující profil vlnitosti od složek s většími vlnovými délkami
l_p, l_r, l_w	základní délka pro základní profil, profil drsnosti, profil vlnitosti
Z_p	výška výstupku profilu
Z_v	hloubka prohlubně profilu
Z_t	výška prvku profilu
X_s	šířka prvku profilu
$Z(x)$	hodnota pořadnice
dz/dx	místní sklon profilu
$MI(c)$	materiálová délka profilu na úrovni c
P_z, R_z, W_z	největší výška profilu pro základní profil, profil drsnosti, profil vlnitosti
Pa, Ra, Wa	průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu pro základní profil, profil drsnosti, profil vlnitosti
Pq, Rq, Wq	průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu pro základní profil, profil drsnosti, profil vlnitosti
PSm, RSm, WSm	průměrná šířka prvku profilu pro základní profil, profil drsnosti, profil vlnitosti
$Rz1max$	největší výška profilu drsnosti vyhodnocena na jediné základní délce
σ_n	směrodatná odchylka hodnoty R-parametru vyhodnoceného na n základních délkách
σ_5	směrodatná odchylka hodnoty R-parametru vyhodnoceného na n základních délkách korigovaná na 5 základních délek podle vztahu 2.1
ZB	Zbrojovka Brno



Seznam příloh

Příloha A Návrh postupu měření přístrojem Taylor Hobson Talysurf CCI

Příloha B Tabulky naměřených hodnot závislostí R- a W-parametrů na cut-off



A. Návrh postupu měření přístrojem Taylor Hobson Talysurf CCI

A.1. Postup pro neperiodický povrch

1. Jedním měřením s objektivem s 10x zvětšením se získá model povrchu, ze kterého se odhadne hodnota parametru R_a , R_z , R_{z1} nebo R_{Sm} v souladu s [16].
2. Pokud měřenému povrchu odpovídá dle [16] hodnota základní délky $l_r \leq 0,25 \text{ mm}$, vyhodnotí se požadované parametry profilu drsnosti na jednom řezu již získaným modelem.
3. Pokud měřenému povrchu odpovídá dle [16] hodnota základní délky $l_r = 0,8 \text{ mm}$, vyhodnotí se parametry profilu drsnosti na takovém množství řezů, který obsahuje alespoň 5 základních délek odpovídajících [16].
4. Pokud měřenému povrchu odpovídá dle [16] hodnota základní délky $l_r \geq 0,8 \text{ mm}$, vykonají se další měření na místech bezprostředně sousedících s prvním. Posuv mezi jednotlivými místy nesmí přesáhnout $0,8 \cdot 1,71 \text{ mm} = 1,368 \text{ mm}$, aby byl zachován překryv jednotlivých měření alespoň 20%. Takto naměřené plochy se následně sešijí v softwaru TalyMap. Měření se vykoná tolik, aby byl delší rozměr sešité plochy rovný nebo delší odpovídající základní délce dle [16]. Parametry drsnosti se následně vyhodnotí na takovém množství řezů, který obsahuje alespoň 5 základních délek odpovídajících [16].

A.2. Postup pro periodický povrch

1. Jedním měřením s objektivem s 10x zvětšením se získá model povrchu, ze kterého se odhadne hodnota parametru R_{Sm} v souladu s [16].
2. Pokud měřenému povrchu odpovídá dle [16] hodnota základní délky $l_r \leq 0,25 \text{ mm}$, vyhodnotí se požadované parametry profilu drsnosti na jednom řezu již získaným modelem.
3. Pokud měřenému povrchu odpovídá dle [16] hodnota základní délky $l_r = 0,8 \text{ mm}$, vyhodnotí se parametry profilu drsnosti na takovém množství řezů, který obsahuje alespoň 5 základních délek odpovídajících [16].
4. Pokud měřenému povrchu odpovídá dle [16] hodnota základní délky $l_r \geq 0,8 \text{ mm}$, vykonají se další měření na místech bezprostředně sousedících s prvním. Posuv mezi jednotlivými místy nesmí přesáhnout $0,8 \cdot 1,71 \text{ mm} = 1,368 \text{ mm}$, aby byl zachován překryv jednotlivých měření alespoň 20%. Takto naměřené plochy se následně sešijí v softwaru TalyMap. Měření se vykoná tolik, aby byl delší rozměr sešité plochy rovný nebo delší odpovídající základní délce dle [16]. Po sešití je nutné kriticky posoudit, zda-li nedošlo ke vzniku ostrých zlomů nebo nepřírozeného zvlnění. V takovém případě je nutné měření zopakovat. Parametry drsnosti se následně vyhodnotí na



takovém množství řezů, který obsahuje alespoň 5 základních délek odpovídajících [16].

5. Pokud měřenému povrchu odpovídá dle [16] hodnota základní délky $l_r \geq 0,8 \text{ mm}$, vykonají se další měření na místech bezprostředně sousedících s prvním. Posuv mezi jednotlivými místy nesmí přesáhnout $0,8 \cdot 1,71 \text{ mm} = 1,368 \text{ mm}$, aby byl zachován překryv jednotlivých měření alespoň 20%. Takto naměřené plochy se následně sešijí v softwaru TalyMap. Měření se vykoná tolik, aby byl delší rozměr sešité plochy rovný nebo delší odpovídající základní délce dle [16]. Po sešití je nutné kriticky posoudit, zda-li nedošlo ke vzniku ostrých zlomů nebo nepřirozeného zvlnění. V takovém případě je nutné měření zopakovat. Parametry drsnosti se následně vyhodnotí na takovém množství řezů, který obsahuje alespoň 5 základních délek odpovídajících [16].



B. Naměřené hodnoty

Tabulka B.1 Studie cut-off - R-parametry, etalon Mahr

Cut-off [mm]	Rz [μm]	Ra [μm]	Rq [μm]	RSm [mm]
0,01	0,01588	0,00603	0,00726	0,01537
0,05	0,30299	0,09616	0,12389	0,09571
0,08	0,81514	0,22675	0,27386	0,11958
0,1	1,2654	0,33719	0,39683	0,12001
0,25	2,8865	0,85191	0,96695	0,12
0,5	3,0512	0,89982	1,0198	0,12001
0,8	3,0562	0,89991	1,0199	0,12001
1	3,0603	0,90032	1,0204	0,12005
2	3,1143	0,90033	1,0207	0,12004
2,5	3,1582	0,90099	1,0215	0,12
3	3,1927	0,90085	1,0217	0,12006
5	3,3213	0,90104	1,0223	0,12008
8	3,4383	0,90282	1,0253	0,12011

Tabulka B.2 Studie cut-off - W-parametry, etalon Mahr

Cut-off [mm]	Wz [μm]	Wa [μm]	Wq [μm]	WSm [mm]
0,05	1,8362	0,82057	0,91567	0,12008
0,08	1,9929	0,68998	0,77033	0,12009
0,1	1,7627	0,57947	0,65415	0,12012
0,25	0,20369	0,1538	0,16433	0,39368
0,5	0,11989	0,14275	0,14833	2,6746
0,8	0,14787	0,13874	0,14655	3,2134
1	0,17905	0,13836	0,14747	4,2645
2	0,26805	0,12931	0,14767	7,5716
2,5	0,2731	0,12519	0,14525	7,6235
3	0,24529	0,11871	0,13438	7,6982
5	0,33088	0,10235	0,12056	8,1249
8	0,23033	0,0696	0,07793	8,912