



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

HODNOCENÍ TOPOGRAFIE POVRCHU STROJNÍCH SOUČÁSTÍ POMOCÍ OPTICKÉHO PROFILOMETRU

EVALUATION OF MACHINE ELEMENTS SURFACE TOPOGRAPHY BY OPTICAL
PROFILOMETER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Vrána

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Šperka, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Jakub Vrána**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Petr Šperka, Ph.D.**
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 bakalářské práce:

Hodnocení topografie povrchu strojních součástí pomocí optického profilometru

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rozvoj optických profilometrů znamenal zásadní vývoj v možnostech hodnocení topografie povrchů. Tyto zařízení jsou schopna poskytnout data o topografii v celé ploše vzorku. Z měřených dat lze různými způsoby hodnotit parametry drsnosti a vlnitosti vypovídající o geometrické přesnosti součástí.

Typ práce: rešeršně syntetická

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je podat přehled v oblasti hodnocení topografie povrchů strojních součástí na základě měřených dat na optickém profilometru. Výstupem má být soubor metodických postupů připravených pro optický profilometr Bruker Contour GT X8.

Díličí cíle bakalářské práce:

- přehled v oblasti problematiky hodnocení topografie povrchu,
- přehled norem určených pro vyhodnocení dat z optického profilometru,
- zpracování metodických postupů.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf

Seznam doporučené literatury:

ISO 25178:2016 Geometric Product Specifications (GPS) – Surface texture: areal. 1. Switzerland: International Organization for Standardization, 2014.

ISO 4287:1997 Geometrical Product Specifications (GPS) -- Surface texture: Profile method -- Terms, definitions and surface texture parameters. 1. Switzerland: International Organization for Standardization, 1997.

ISO 4288:1996 Geometrical Product Specifications (GPS) -- Surface texture: Profile method -- Rules and procedures for the assessment of surface texture. 2. Switzerland: International Organization for Standardization, 1996.

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

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá problematikou hodnocení topografie povrchů strojních součástí a měřením dat na optickém interferometru. Rešeršní část podává všeobecný přehled o hodnocení topografie povrchů a uvádí ho do souvislosti s předepsanými normami. V praktické části práce je proveden experiment, kdy se pomocí optického profilometru vyhodnocuje robustnost naměřených parametrů. V závěru jsou poznatky zrekapitulovány a zhodnoceny.

KLÍČOVÁ SLOVA

topografie, hodnocení povrchů, topografické parametry, technické povrchy, optická interferometrie, interferometrie v bílém světle

ABSTRACT

This thesis deals with the issue of surface texture topography of engineering parts. Research provides general view of surface texture topography evaluation and puts the aforementioned into the context of international standards. In the practical part of this thesis, an experiment is implemented. With help of optical interferometer, parameters are measured and their robustness is evaluated. In the conclusion part of this thesis, acquired information are evaluated and resumed.

KEY WORDS

topography, areal surface measurement, topographic parameters, engineering surfaces, optical interferometry, white light interferometry

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VRÁNA, J. *Hodnocení topografie povrchu strojních součástí pomocí optického profilometru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Šperka, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce, Ing. Petru Šperkovi, Ph.D., za jeho vedení, odborné rady, postřehy, připomínky a vstřícný přístup. Děkuji také rodině, která mě v průběhu studia podporuje.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Petra Šperky, Ph.D., s využitím informací a zdrojů, které cituji v seznamu použité literatury.

V Brně dne

.....
Jakub Vrána

OBSAH

1	ÚVOD	12
2	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	13
2.1	Analýza problému	13
2.2	Cíl práce	13
3	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	14
3.1	Historický kontext.....	14
3.2	Charakteristika povrchu tělesa	14
3.3	Rozdělení metod	14
3.4	Profilová metoda	15
3.4.1	Filtrace	15
3.4.2	Geometrické parametry	16
3.4.3	Pravidla pro posuzování profilu povrchu	17
3.5	Plošná metoda	17
3.5.1	Princip filtrace	17
3.5.2	Používané filtry	18
3.5.3	Geometrické prvky	18
3.5.4	Geometrické parametry	19
3.5.5	Parametry neobsažené v normách	22
3.6	Metody měření textury povrchu	23
3.6.1	Koherenční skenovací interferometrie, CSI	23
4	DISKUZE	25
4.1	Materiál a metody	25
4.1.1	Popis experimentu	25
4.1.2	Materiál	26
4.1.3	Analýza výsledků	27
4.2	Výsledky měření	28
4.2.1	Výsledky měření parametrů stejného místa.....	28
4.2.2	Výsledky měření rozdílných míst součásti	29
4.2.3	Vliv rychlosti měření na hodnoty parametrů	30
4.2.4	Vliv treshold signálu na hodnoty parametrů.....	31
4.2.5	Vliv hodnoty intenzity zdroje světla na hodnoty parametrů.....	33
4.3	Analýza výsledků.....	35
5	ZÁVĚR.....	36
6	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	37
7	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN.....	39
8	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ.....	41
9	SEZNAM TABULEK	42

1 ÚVOD

Měření topografie povrchů součástí se stává v souvislosti s rozvojem vědních disciplín jako je hydrodynamika, tribologie, aerodynamika či optika, velmi významnou. Zkoumání povrchů umožňuje předpovědět funkci, životnost a spolehlivost součásti, což je v průmyslu důležité zejména z ekonomického hlediska. V minulosti jako zdroj topografických dat sloužil profil povrchu. V současnosti se z důvodu většího množství získaných informací preferuje plocha. Existuje mnoho metod snímání povrchu. Současnému trhu s profilometry však dominuje spojitá skenovací interferometrie, která umožňuje bezkontaktní 3D měření povrchu. Na základě naměřených dat jsou vypočítány topografické parametry, specifikované v normách ISO, sloužící k hodnocení povrchu.

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

2

2.1 Analýza problému

2.1

V tribologické laboratoři Ústavu konstruování se nachází optický profilometr Contour GT-X8, který funguje na principu spojité skenovací interferometrie a umožňuje bezkontaktní 3D snímání povrchů. Charakter povrchu se dá popsat naměřenými topografickými parametry. Při měření jsou však hodnoty parametrů ovlivněny místem měření, případně nastavením profilometru.

2.2 Cíl práce

2.2

Cílem rešeršní části této bakalářské práce je podat všeobecný přehled v oblasti hodnocení topografie povrchů a také norem, které se k hodnocení povrchů vztahují. Větší pozornost bude věnována hodnocení plochy a spojité skenovací interferometrii, související s experimentální částí.

V experimentální části bude s využitím profilometru Contour GT-X8 posuzována robustnost jednotlivých topografických parametrů na měřeném vzorku.

Dílčí cíle experimentální části

- Analýza opakovatelnosti parametrů při měření jednoho místa.
- Analýza reprezentativnosti parametrů při měření různých oblastí povrchu součásti.
- Analýza robustnosti parametrů při změně rychlosti měření, intenzity zdroje světla a treshold signálu.

3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

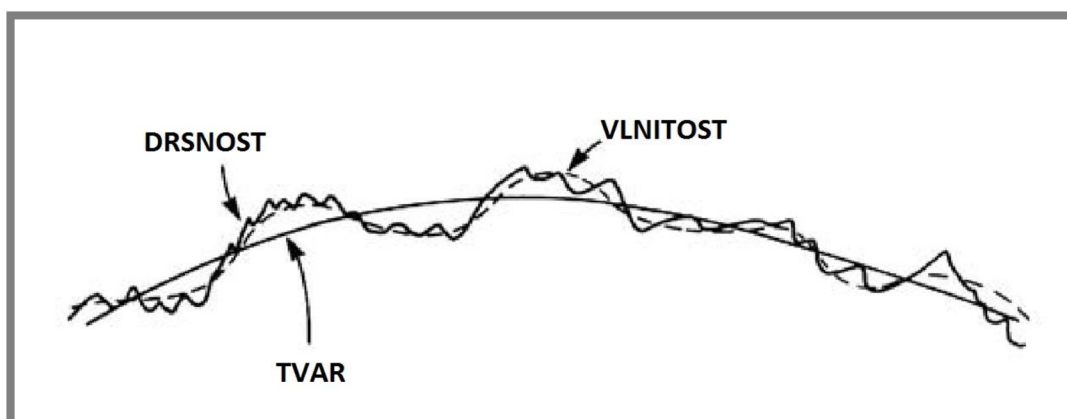
3.1 Historický kontext

V 30. letech 20. století se objevily první snahy nahradit dosavadní zrakové a hmatové hodnocení drsnosti obrobených povrchů číselným měřením. První měřicí přístroje uskutečňovaly měření přejížděním snímacího hrotu kolmo na stopy nástroje po povrchu obrobku. Společně s měřením dotykovým se používalo i měření optické. Jedním z prvních optických zařízení byl Michelsonův a Linnikův interferometr [1]. K rozšíření interferometrů došlo ale až v 80. letech, s nástupem výkonnější výpočetní techniky, kdy se začala používat interferometrická mikroskopie s fázovým posunem (PSI). V 90. letech byla za účelem překročení limitů PSI vyvinuta koherenční skenovací interferometrie (CSI), která společně s konfokální mikroskopií dominuje současnému trhu s optickými profilometry [2].

3.2 Charakteristika povrchu tělesa

Povrch tělesa omezuje a odděluje od okolního prostředí [5]. Neexistuje dokonale hladký povrch a každá technologická operace, použitá při realizaci povrchu technických ploch, zanechává nerovnosti [3], [4]. Struktura povrchu se po aplikaci technologické operace nazývá textura povrchu (v normách z roku 1999 stále nazývána jako struktura) a je možné ji charakterizovat jako úchyly skutečného tvaru plochy od ideální geometrie tělesa (obr. 3-1) [6]. Tyto úchyly můžeme rozdělit na

- Drsnost-nejkratší vlnová délka, úchylka zapříčiněná tvarem a posuvem nástroje
- Vlnitost-delší vlnová délka než drsnost, obvykle způsobená chvěním nástroje
- Úchylka tvaru-velmi dlouhá vlnová délka, příčinou bývá špatné upnutí obrobku, prohnutí obrobku nebo opotřebení součásti



obr. 3-1 Úchyly textury povrchu

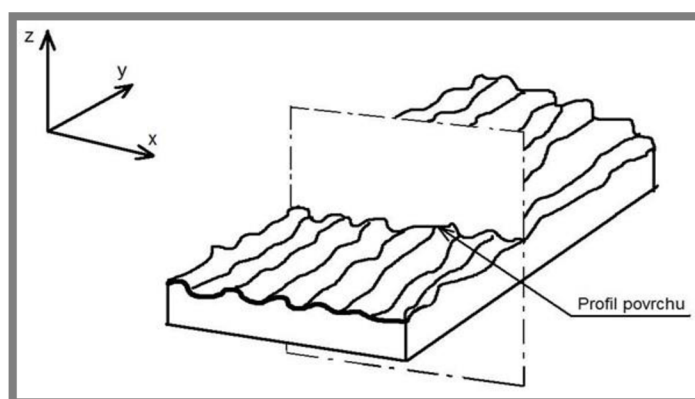
3.3 Rozdělení metod

Systém posuzování a hodnocení textury povrchů je obsažen v Geometrické specifikaci produktů (GPS), která je tvořena sadou norem. Jednotlivé metody posuzování jsou rozděleny dle zdroje informací

- profilová metoda-zdrojem informací je profil
- plošná metoda-zdrojem informací je plocha

3.4 Profilová metoda

Hodnocení a měření textury povrchu profilovou metodou vychází z profilu povrchu vzniklého jako průsečnice skutečného povrchu a dané roviny (obr. 3-2). Pro orientaci v prostoru se obvykle používá pravouhlý souřadný systém, kde osa X leží ve směru snímání a má směr délky profilu. Osa Y leží na skutečném povrchu a osa Z směřuje z materiálu do okolí [5], [7].



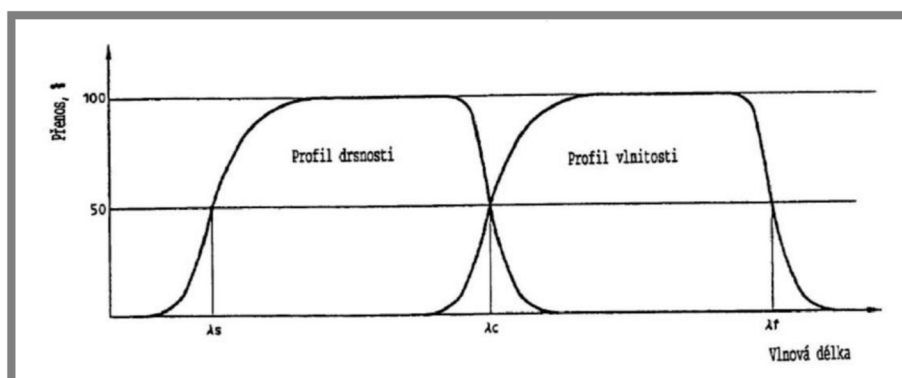
obr. 3-2 Profil povrchu

3.4.1 Filtrace

3.4.1

Filtrace rozděljuje profil povrchu na jednotlivé složky, podle velikostí rozteče nerovností (obr. 3-3). Separace probíhá pomocí filtrů nejprve na základní profil. Z něj je pak možné získat buď profil drsnosti anebo profil vlnitosti. Jednotlivé filtry mají své mezní hodnoty vlnových délek tzv. *cut-off* (tab. 1). Charakteristiky filtrů jsou obsaženy v ISO 11562. Profilové filtry rozlišujeme na [5][8]

- λ_s filtr profilu – filtr definující rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln přítomných na povrchu (šum z okolí), po aplikaci získáme základní profil
- λ_c filtr profilu – filtr definující rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitostí
- λ_f filtr profilu – filtr definující rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln přítomných na povrchu



obr. 3-3 Filtry profilu

tab. 1 Hodnoty cut-off délek pro neperiodické profily

Ra [μm]	Základní délka drsnosti lr [mm]	Vyhodnocovaná délka drsnosti ln [mm]
$0,006 < Ra \leq 0,02$	0,08	0,4
$0,02 < Ra \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < Ra \leq 2$	0,8	4
$2 < Ra \leq 10$	2,5	12,5
$10 < Ra \leq 80$	8	40

3.4.2 Geometrické parametry

Na profilu povrchu se vyskytují výstupky (peak) a prohlubně (valley), dohromady tvoří prvek profilu.

K vyhodnocování profilu textury slouží profilové parametry. Základní rozdělení parametrů je podle aplikovaného filtru na

- P-parametry-parametry vypočítané ze základního profilu
- R-parametry-parametry vypočítané z profilu drsnosti
- W-parametry-parametry vypočítané z profilu vlnitosti

Parametry se pak dále rozdělují na parametry výškové, délkové a tvarové. Tyto parametry jsou vyhodnocovány na základní délce l (s výjimkou parametru P_t, R_t, W_t). Přehled parametrů podle [5] je v tab.2

tab. 2 Profilové parametry

Značení	Název	Vzorec
Výškové parametry		
P_p, R_p, W_p	Největší výška výstupku profilu	
P_v, R_v, W_v	Největší hloubka prohlubně profilu	
P_z, R_z, W_z	Největší výška profilu	
P_c, R_c, W_c	Průměrná výška prvků profilu	
P_t, R_t, W_t	Celková výška profilu	
P_a, R_a, W_a	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného povrchu	$\frac{1}{l} \int_0^l Z(x) dx$
P_q, R_q, W_q	Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu	$\sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z(x) ^2 dx}$
P_{sk}, R_{sk}, W_{sk}	Šikmost posuzovaného profilu	$\frac{1}{Rq^3} \int_0^l \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^3 x dx \right]$
P_{ku}, R_{ku}, W_{ku}	Špičatost posuzovaného profilu	$\frac{1}{Rq^2} \left[\frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^4 x dx \right]$
Délkové parametry		
P_{Sm}, R_{Sm}, W_{Sm}	Průměrná šířka prvků profilu	$\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_s$
Tvarové parametry		
$P_{\Delta q}, R_{\Delta q}, W_{\Delta q}$	Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu	

3.4.3 Pravidla pro posuzování profilu povrchu

Parametry textury povrchu se vyhodnocují pouze na homogenní ploše. Pokud jsou na povrchu plochy s vizuálně odlišnou strukturou, pak se parametry uvádí pro každou jednotlivou plochu. Vady povrchu nejsou při kontrole struktury uvažovány, protože parametry nejsou použitelné pro jejich popis.

Pro toleranční meze platí pravidla:

- **Pravidlo 16%**-Méně než 16% všech naměřených hodnot parametrů smí přesahovat hodnotu uvedenou na výkresu, jestliže jsou požadavky specifikované horní mezí parametrů. Pro požadavky dolní meze parametru platí, že méně než 16% všech naměřených hodnot parametrů je menších než hodnota parametru předepsaná na výkrese.
- **Pravidlo maxima**-Žádná naměřená hodnota nesmí překročit hodnotu uvedenou na výkresu, či ve výrobní dokumentaci [9].

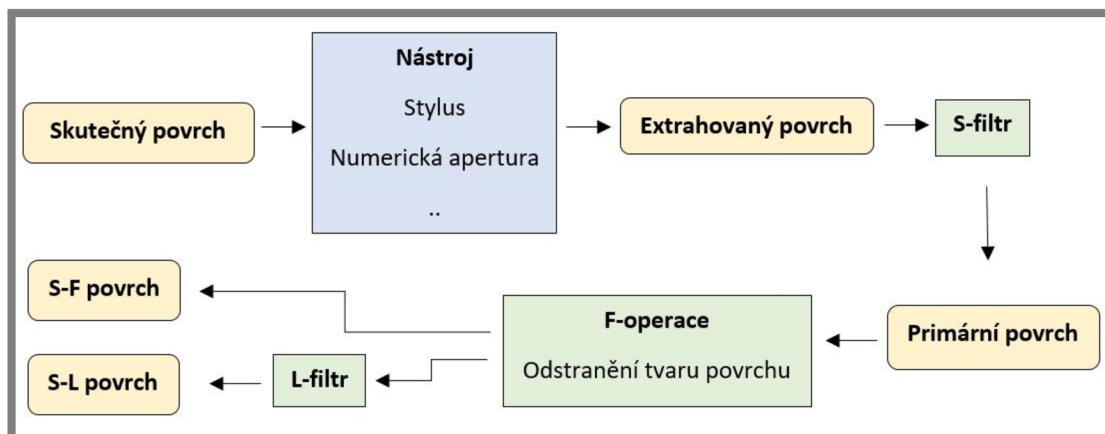
3.5 Plošná metoda

Plošná metoda je metoda trojrozměrného hodnocení povrchů a vychází z profilové 2D metody, kterou ještě doplňuje o potřebné informace. Na rozdíl od profilové metody je zdrojem informací plocha, nikoliv profil povrchu [7]. Díky většímu množství naměřených dat a většímu statistickému významu tato metoda lépe reprezentuje povrch z hlediska funkčnosti [10]. Standarty související s plošným vyhodnocováním povrchu specifikuje soubor GPS norem ISO 25178.

3.5.1 Princip filtrace

Stejně jako u profilové metody se extrahovaný povrch z naměřených dat separuje použitím filtrů. Tato operace se uplatňuje, aby bylo možné rozlišit hodnocenou plochu na tzv. povrchy omezené stupnicí (scale limited surfaces) [11]. Postup získání požadovaného povrchu pomocí jednotlivých filtrů je pro přehlednost znázorněn na obr 3-4. Norma [12] specifikuje:

- S-filtr-odstraní malou laterální stupnici z povrchu, díky tomu je dosaženo primárního povrchu
- L-filtr-odstraní velkou laterální stupnici z primárního povrchu
- F-operace-operace, která potlačí vliv tvaru z primárního povrchu
- S-F povrch-slouží k získávání parametrů vlnitosti
- S-L povrch-slouží k získávání parametrů drsnosti



obr. 3-4 Proces separace na povrchy omezené stupnicí

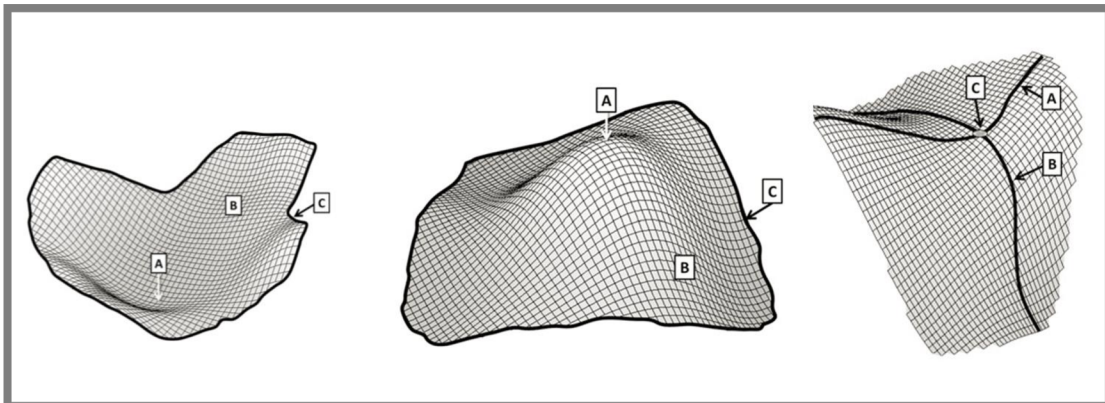
3.5.2 Používané filtry

v GPS normě ISO 16610 je obsaženo [8] [14]:

- Gaussův filtr-Univerzální a v průmyslu i ve výzkumu často používaný filtr, je specifikován v [13], používá se k oddělení drsnosti a vlnitosti z primárního povrchu. Jeho funkce však není zcela korektní kolem izolovaných výstupků povrchu.
- Kubický spline filtr-Spojuje řadu bodů geometrickou křivkou. Spojení bodů charakterizuje konstanta pružnosti, která se nastavuje v rozmezí 0 až 1 [15].
- Robustní filtry-Určují místní váhu a sledují trend profilu bez narušení izolovanými vrcholy.
- Morfologické filtry-Respektují působení dilatace a eroze a vytváří horní nebo dolní obálku povrchu [16].

3.5.3 Geometrické prvky

Některé geometrické prvky jsou shodné s profilovou metodou. Jedná se například o piky a prohlubně. Kvůli rozměru navíc se definice rozšiřuje o vrch či údolí (obr. 3-5). Tyto prvky jsou odděleny hřebenovou přímkou nebo přímkou kurzu, které tvoří sedlo [11].



obr. 3-5 Zleva: údolí, vrch a sedlo

3.5.4 Geometrické parametry

Parametry se stanovují na ploše omezené stupnicí povrchu, tedy až po aplikaci filtrů. Podle rozměrů mohou být plošné (S-parametry) nebo objemové (V-parametry). Rozdělení parametrů podle [11]

- **Výškové parametry** (tab. 3) - Parametry S_a a S_q jsou průměrné hodnoty necitlivé na extrémní a globálně reprezentují povrch. Parametr S_a se často používá u hodnocení povrchu obráběných strojních součástí, zatímco parametr S_q v optice. Naproti tomu parametry S_p , S_v , S_z jsou vyhodnoceny z extrémních bodů povrchu, proto u nich není zajištěna taková míra opakovatelnosti měření. S_z parametr bývá důležitý u těsnících ploch, S_p u kluzných povrchů a S_v pokud se na povrchu zadržuje kapalina. Parametr S_{sk} nachází své uplatnění například při kontrole opotřebení povrchu [17].

tab. 3 Výškové parametry

Značení	Název	Vzorec
S_q	Základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu	$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x, y) dx dy}$
S_{sk}	Šikmost omezené stupnice povrchu	$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \left[\frac{1}{A} \iint_A z^3(x, y) dx dy \right]$
S_{ku}	Špičatost omezené stupnice povrchu	$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \left[\frac{1}{A} \iint_A z^4(x, y) dx dy \right]$
S_p	Maximální výška piku omezené stupnice povrchu	
S_v	Maximální hloubka prohlubně omezené stupnice povrchu	
S_z	Maximální výška omezené stupnice povrchu	
S_a	Aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu	$S_a = \frac{1}{A} \iint_A z(x, y) dx dy$

- **Prostorové parametry** (tab. 4) - Prostorové parametry využívají autokorelační funkci, kterou je možné hodnotit periodičnost či nahodilost tvaru povrchu. Hodnocení se provádí na základě rychlosti rozpadu autokorelační funkce, která udává podobnost posunutých úseků [21], [7]. Parametr S_{tr} slouží k detekci izotropie a jeho hodnota se pohybuje od 0 do 1 (izotropní povrch - 1, anizotropní povrch - 0) [17], [18]. V odborné literatuře [10], [19] se mezi prostorové parametry uvádí i parametr S_{td} , který ve stupních určuje směr textury povrchu. V [11] je tento parametr zařazen do kategorie smíšených parametrů.

tab. 4 Prostorové parametry

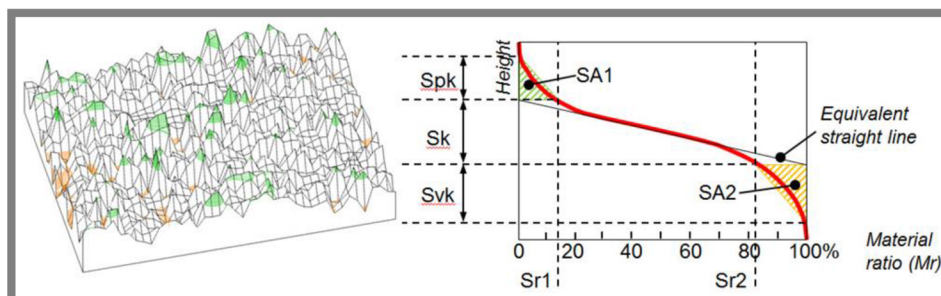
Značení	Název	Vzorec
S_{al}	Délka autokorelace	$S_{al} = \underset{t_x, t_y \in \mathbb{R}}{\text{MIN}} \sqrt{t_x^2 + t_y^2} \text{ kde } R = \{(t_x; t_y) : f_{ACF}(t_x, t_y) \leq s\}$
S_{tr}	Poměr aspektu textury	$S_{tr} = \frac{\underset{t_x, t_y \in \mathbb{R}}{\text{MIN}} \sqrt{t_x^2 + t_y^2}}{\underset{t_x, t_y \in \mathbb{Q}}{\text{MAX}} \sqrt{t_x^2 + t_y^2}} \text{ kde } R = \{(t_x; t_y) : f_{ACF}(t_x, t_y) \leq s\}, Q = \{(t_x; t_y) : f_{ACF}(t_x, t_y) \leq s\}$

- **Hybridní parametry** (tab. 5) charakterizují sklon povrchu a jsou definovány délkou a výškou (amplitudou) [19]. Parametr S_{dq} představuje průměrný kvadratický sklon povrchu a parametr S_{dr} velikost deformace povrchu. V literatuře [10], [19] bývá mezi hybridní parametry zařazován i parametr S_{sc} (average summit curvature).

tab. 5 Hybridní parametry

Značení	Název	Vzorec
S_{dq}	Základ průměrného čtverce gradientu omezené stupnicí povrchu	$S_{dq} = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A \left[\left(\frac{\delta z(x,y)}{\delta x} \right)^2 + \left(\frac{\delta z(x,y)}{\delta y} \right)^2 \right] dx dy}$
S_{dr}	Poměr rozvinuté mezifázové plochy omezené stupnicí povrchu	$S_{dr} = \frac{1}{A} \iint_A \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\delta z(x,y)}{\delta x} \right)^2 + \left(\frac{\delta z(x,y)}{\delta y} \right)^2} - 1 \right) dx dy$

- **Funkční parametry** (tab. 6) vznikly v Německu a byly definovány kvůli potřebám automobilového průmyslu. Původně profilové parametry R_k , R_{pk} , R_{vk} specifikované v normě ISO 13565-2 byly později rozšířeny na plošné parametry S_k , S_{pk} , S_{vk} , S_{mr1} a S_{mr2} . Tyto parametry vycházejí z křivky poměru materiálu. Křivka reprezentuje procentuální podíl ploch (vodorovná osa) v dané hloubce řezu (vertikální osa) z celkové měřené plochy (obr. 3-6) [18], [22]. Na křivce je jádro omezeno stupnicí povrchu o výšce S_k . Je obklopeno redukovanou hloubkou údolí S_{vk} a redukovanou výškou piku S_{pk} . Poměr plochy materiálu k ploše hodnocení je vyjádřen v procentech a značí se S_{mr1} a S_{mr2} . Funkční parametry se uplatňují například při analýze drsnosti vývrtů válců pístových strojů [19].

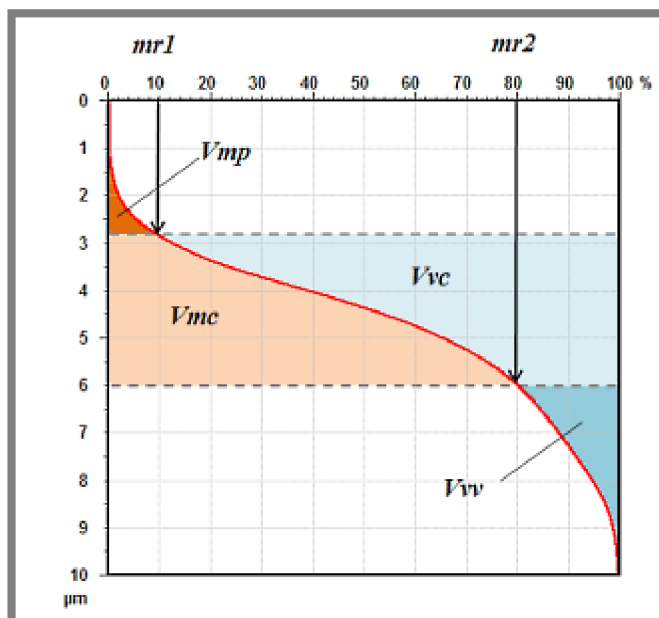


obr. 3-6 Křivka poměru materiálu (vpravo) vzniklá na základě plochy (vlevo)

tab. 6 Funkční parametry

Značení	Název
S_k	Výška jádra
S_{pk}	Redukovaná výška piku
S_{vk}	Redukovaná hloubka údolí
S_{mr1}	Poměr materiálu
S_{mr2}	Poměr materiálu
S_{vq}	Základ průměrné úchylky čtverců údolí
S_{pq}	Základ průměrné úchylky plošiny
S_{mq}	Poměr materiálu
S_{xp}	Extrémní výška piku

- **Objemové parametry** - Objemové parametry (tab. 7) jsou stejně jako funkční parametry založeny na křivce materiálového poměru. Místo plochy se však používá objem materiálu. Při kontaktu materiálu dochází k odstranění objemu piků materiálu. Zde se uplatňuje parametr V_{mp} . Díky parametru V_{vc} , je možné určit objem uniklé nebo zachycené množství kapaliny. Všeobecně se objemové parametry používají při zkoumání opotřebení povrchu [10].



obr. 3-7 Křivka poměru objemu materiálu

tab. 7 Objemové parametry

Značení	Název parametru
Parametry neplatného objemu	
V_{vv}	Neplatný objem údolí omezené stupnice povrchu
V_{vc}	Neplatný objem jádra omezené stupnice povrchu
Parametry objemu materiálu	
V_m	Objem materiálu
V_{mp}	Pik objemu materiálu omezené stupnicí povrchu
V_{mc}	Jádro objemu materiálu omezené stupnicí povrchu

3.5.5 Parametry neobsažené v normách

V experimentální části práce jsou profilometrem měřeny také parametry neobsažené v aktuálních normách ISO (tab. 8). Parametry S_{bi} , S_c , S_{ci} , S_m , S_v (dále jako $S_v(f)$), S_{vi} jsou považovány za parametry funkční a jsou určeny křivkou poměru materiálu. Parametry byly navrženy pro hodnocení opotřebení, nebo schopnosti povrchu zadržet kapalinu. V [11] jsou však nahrazeny za parametry objemové. Parametry S_{ds} , S_{sc} , S_{td} již byly zmíněny v předchozích parametrech. R_{pm} , R_{vm} jsou parametry profilové. R_{pm} slouží odhadu výšky plasticky deformovatelné struktury a R_{vm} k určení charakteru proudění kapaliny po povrchu [17].

tab. 8 Parametry neobsažené v aktuálních normách

Značení	Název parametru
R_{pm}	Průměrná výška deseti nejvyšších vrcholů
R_{vm}	Průměrná hloubka deseti nejhlubších prohlubní
S_{bi}	Index opotřebení (Surface bearing index)
S_c	Core valley volume
S_{ci}	Core oil retention index
S_m	Material volume
S_{v(f)}	Deep valley volume
S_{vi}	Valley oil retention index
S_{ds}	Hustota piků
S_{sc}	Průměrné zakřivení vrcholů (Mean Summit Curvature)
S_{td}	Směr textury (Texture Direction)

3.6 Metody měření textury povrchu

Norma 25178-6 rozděluje jednotlivé metody měření na 3 základní skupiny (tab. 9). Čárová-profilovací metoda, metoda topografie plochy a metoda integrování plochy. První dvě metody měří skutečný povrch, kdežto metoda integrování plochy měří statistické parametry obvykle získané analýzou rozptýleného světla. Tato metoda se nezaměřuje na konkrétní body a neumožňuje získání údajů čáry profilu, ale hodnotí povrch jako celek [2] [25].

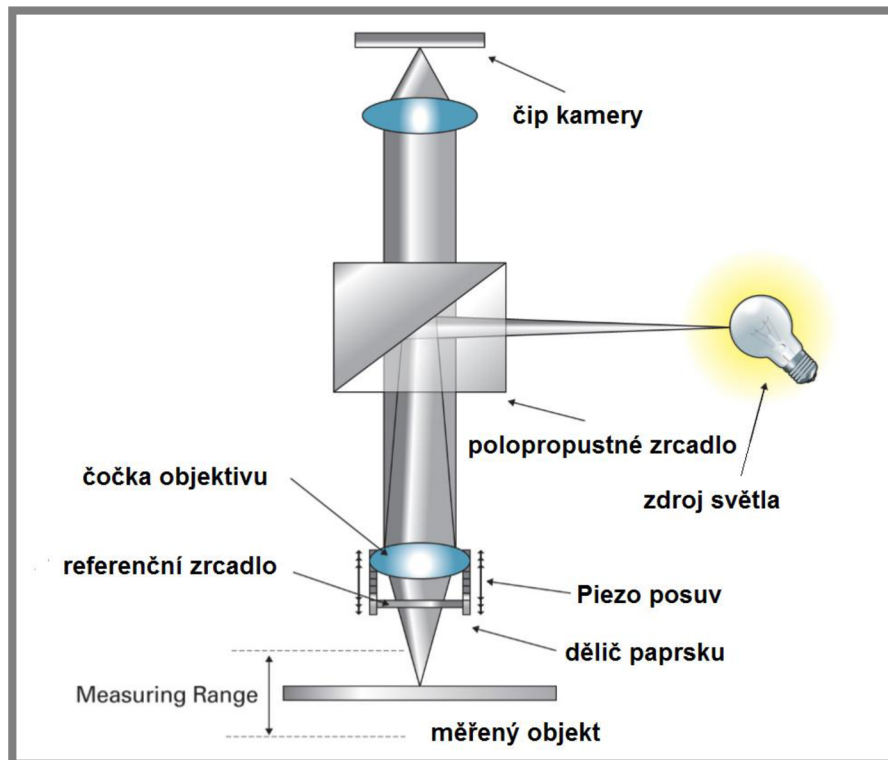
tab. 9 Metody měření povrchu

Základní metody	Specifické metody
Čárová-profilovací metoda	Skenování dotekovým hrotem Interferometrie s fázovým posunem Kruhové interferometrické profilování Optické diferenciální profilování
Metoda topografie plochy	Skenování dotekovým hrotem Interferometrie s fázovým posunem Koherenční skenovací interferometrie, CSI Konfokální mikroskopie Konfokální chromatická mikroskopie Projekce strukturovaného světla Zaostřovací variační mikroskopie Digitální holografická mikroskopie Skenovací elektronová mikroskopie, SEM Stereoskopická SEM Skenovací tunelovací mikroskopie, STM Mikroskopie atomárních sil
Metoda integrování plochy	Úplná integrace rozptýleného světla Úhlové rozšíření rozptylu světla Metoda kapacity rovnoběžných desek Pneumatický měřicí systém

3.6.1 Koherenční skenovací interferometrie, CSI

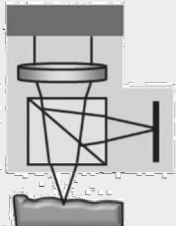
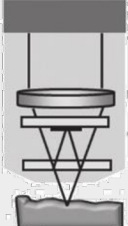
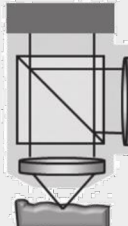
Koherenční skenovací interferometrie (dále jako CSI), v českém jazyce také označována jako interferometrie v bílém světle nebo vertikální skenovací interferometrie, je metoda topografického měření povrchu, kde k určení topografie povrchu dochází lokalizováním interferenčních proužků při skenování. Metoda CSI a její charakteristiky jsou specifikovány v [26].

Bílé světlo putuje ze zdroje (LED diody) na polopropustné zrcadlo, které směřuje paprsek do objektivu (tab. 10), kde se nachází dělič paprsku. Část paprsku pokračuje k povrchu měřeného vzorku, zatímco druhá část paprsku je odražena na referenční zrcadlo. Obě části paprsku spolu interferují a každý pixel v kameře vyhodnocuje jejich intenzitu. Takto vznikne jeden obrazec. Vertikálním posuvem referenčního zrcadla (Piezo posuvem) získáme více obrazců. Z těch je již možné sestavit mapu povrchu (obr 3-8) [14].



obr. 3-8 Schéma CSI

tab. 10 Používané interferometrické objektivy [27], [28]

Objektiv	Michelson	Mirau	Linnik
Zvětšení	$\leq 5X$	10X-50X	100X-200X
Charakteristika	Široké zorné pole, vysoká hloubka ostrosti	Velké zvětšení, kompaktní design	Nejdražší, nejméně kompatibilní, největší zvětšení
Schéma	 obr. 3-9 Michelson	 obr. 3-10 Mirau	 obr. 3-11 Linnik

4 DISKUZE

4

4.1 Materiál a metody

4.1

4.1.1 Popis experimentu

4.1.1

Cílem experimentu je zjistit míru opakovatelnosti a reprezentativnosti dat naměřených parametrů a také určit jaký vliv má na tyto parametry nastavení měřicího přístroje (obr. 4-1). Na optickém profilometru Contour GT-X8 byly metodou koherenční skenovací interferometrie (CSI/VSI) měřeny plošné parametry kovového vzorku. Vzorek byl před měřením, kvůli odstranění případných nečistot odmaštěn lihem. Naměřená a vyhodnocená data byla uložena do .CSV souboru a v excelu zpracována.

Zjištění opakovatelnosti parametrů

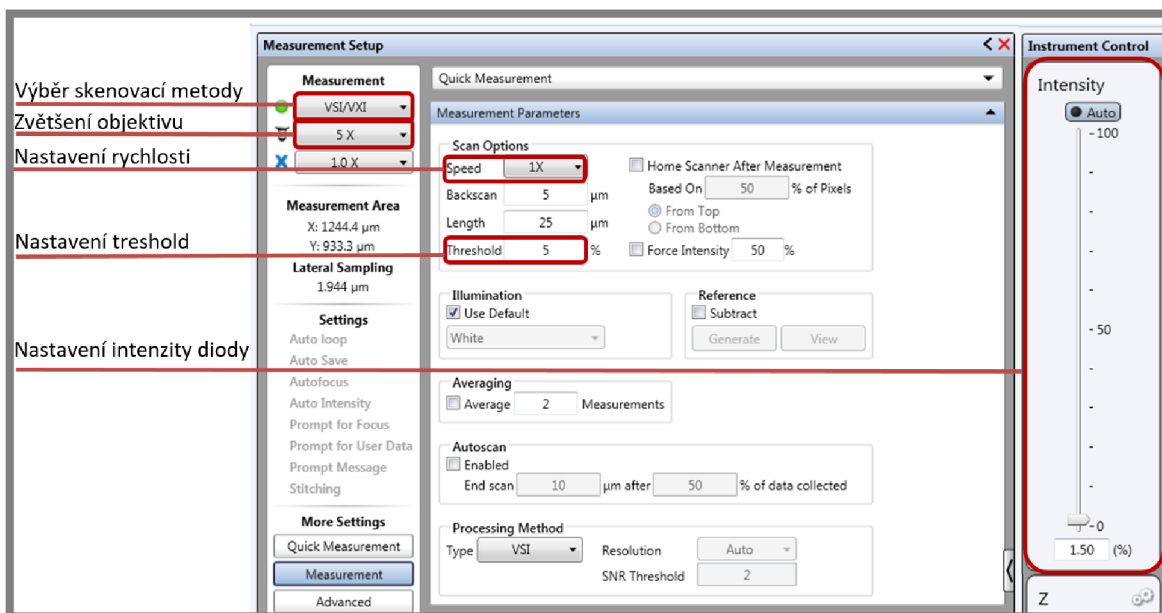
Pro zjištění opakovatelnosti parametrů bylo provedeno 10 měření na stejném místě povrchu testovaného vzorku. Při konstantním nastavení přístroje a v krátkém časovém intervalu, kvůli zachování podmínek měření.

Zjištění reprezentativnosti parametrů

Reprezentativnost parametrů byla zjišťována měřením parametrů na 10-ti různých místech povrchu, která se jeví jako homogenní a reprezentativní. Nastavení přístroje bylo pro každé měření stejné.

Zjištění vlivu nastavení profilometru

Při experimentu byl zkoumán vliv nastavení rychlosti měření, intenzity zdroje a treshold signálu (práh signálu, určuje hranici ruchu signálu) na měřené parametry. Při měření bylo zkoumáno každé nastavení zvlášť a ostatní nastavení zůstala nezměněna. Všechna měření probíhala na jednom místě. Rychlost byla nastavována v rozmezí 1X-11X, intenzita v rozmezí 0,5%-3% a treshold v intervalu 0,5%-10%.



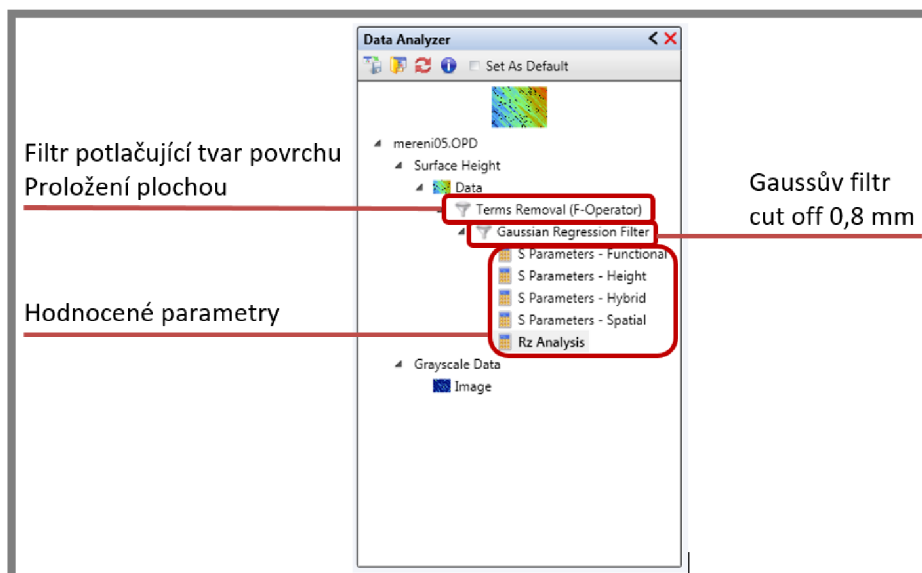
obr. 4-1 Obrazovka s nastavením parametrů měření

Měřené parametry

Rpm, Rvm, Rz, Sbi, Sc, Sci, Sm, Sv(f), Svi, Sa, Sku, Sp, Sq, Ssk, Sv, Sz, Sdq, Sdr, Sds, Ssc, Ssk, Std, Str, Sal (popis parametrů v kapitole 3.5.4 a 3.5.5)

Filtrace

K dosažení drsnostních parametrů, je nutné nejprve potlačit vliv tvaru součásti proložením rovinnou plochou. K získání S-L povrchu (kapitola 3.5.1 princip filtrace) je potřeba dle ISO 16610 použít jeden z filtrů (kapitola 3.5.2 Používané filtry). Byl zvolen Gaussův regresní filtr a dle tab.1 nastavena cut-off délka 0.8 mm. (obr. 4-2)



obr. 4-2 Strom použitých operací k dosažení požadovaných parametrů

4.1.2 Materiál

Charakteristika profilometru

Contour GT-X8 (obr. 4-3) je optický profilometr pro měření inženýrských povrchů od společnosti Bruker, fungující na principu koherenční skenovací interferometrie. Zdrojem světla v objektivu je dual-LED dioda. Na profilometru je otočný adaptér, který je schopen nést až 5 interferometrických objektivů. Zvětšení objektivů je v rozmezí 0.5X až 250X. Vertikální rozlišení je 0.1 nm až 10 mm. Přístroj je vybaven kamerou s vysokým rozlišením a funkcí autofokus. Testovaný vzorek se pokládá na vzduchový pracovní stůl zajišťující izolaci od vibrací z okolí. Výstupní data z profilometru jsou vyhodnocována na stolním počítači v softwaru Vision64 [20].



obr. 4-3 Contour Bruker GT-X8

Měřený vzorek

Vzorek, na kterém byla provedena měření, je ocelová součást. Měření probíhala na její broušené obvodové ploše. (obr. 4-4)

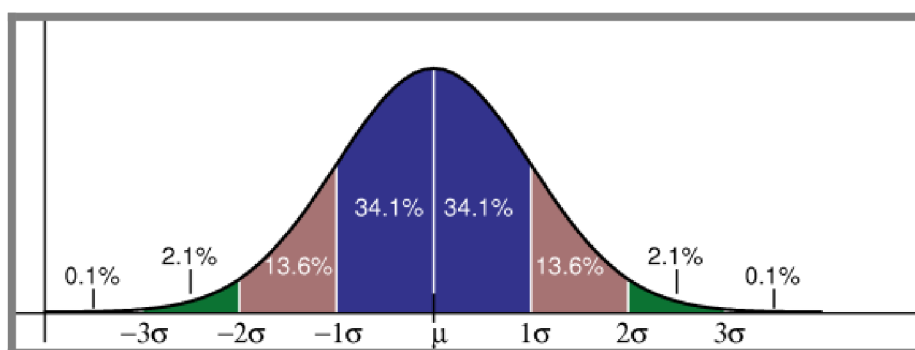


obr. 4-4 Měřený vzorek

4.1.3 Analýza výsledků

4.1.3

Naměřená data můžeme považovat jako výsledek mnoha nezávislých vlivů (např. chyba měření, vibrace). Data tedy interpretujeme jako náhodné děje. Tyto děje vyskytující se v přírodě, či ve společnosti lze modelovat normálním rozdělením (také označováno jako Gaussovo rozdělení), jehož hustota pravděpodobnosti je popsána Gaussovou křivkou (obr. 4-5).



obr. 4-5 Gaussova křivka

Normální rozdělení charakterizuje: *střední hodnota* (μ), *rozptyl* (σ^2), *směrodatná odchylka* (σ), *relativní směrodatná odchylka* (V). Pro normální rozdělení platí, že naměřená data leží v intervalu:

- $(\mu - \sigma, \mu + \sigma)$ s pravděpodobností 68,27 %,
- $(\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma)$ s pravděpodobností 95,45 %
- $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ s pravděpodobností 99,73 %

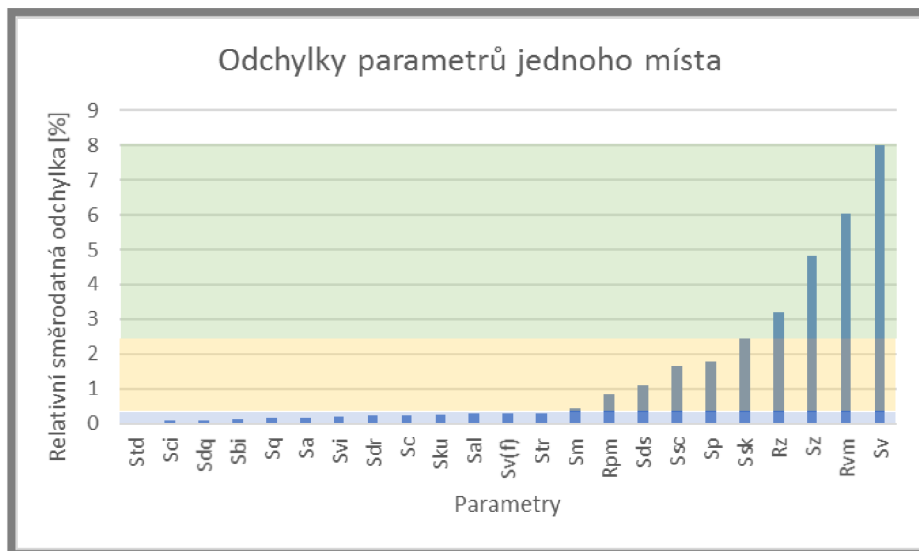
Pomocí těchto intervalů spolehlivosti byly hodnoceny výsledky měření opakovatelnosti a reprezentativnosti parametrů. Následně se parametry seřadily podle V do sloupcových grafů [23], [24].

Při hodnocení vlivu nastavení profilometru, byly sestaveny závislosti jednotlivých nastavení na parametrech a určeny referenční hodnoty, od kterých se vypočítaly relativní odchylky. Parametry byly následně roztříděny podle jejich citlivosti na konkrétní nastavení a vykresleny do grafů (viz kapitola 4.2).

4.2 Výsledky měření

4.2.1 Výsledky měření parametrů stejného místa

Parametry jednoho místa měření byly rozděleny do tří oblastí podle relativní směrodatné odchylky a vzestupně seřazeny do grafu (obr. 4-6).

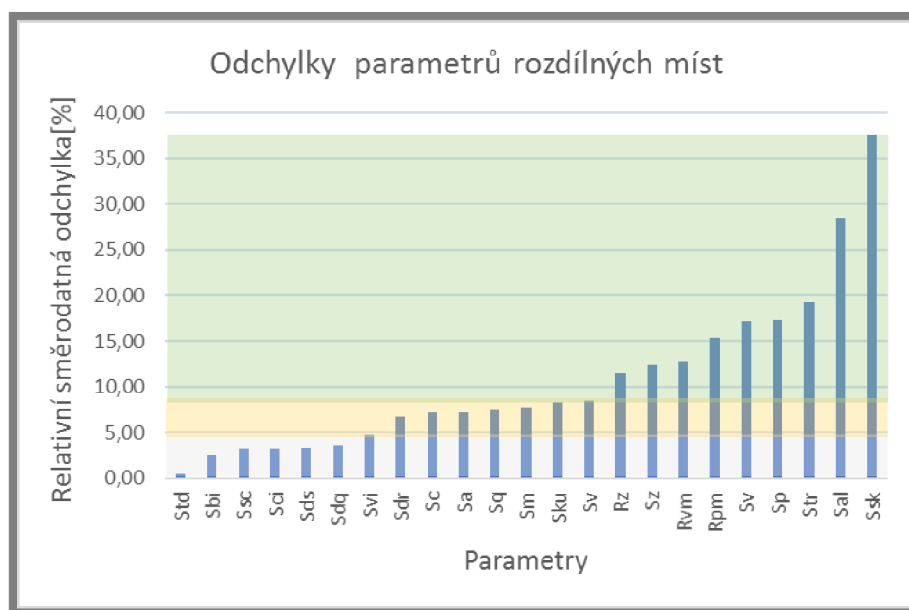


obr. 4-6 Relativní směrodatné odchylky jednoho místa měření

- $V \leq 0,3\%$
 Parametry: Std, Sci, Sdq, Sbi, Sq, Sa, Svi, Sdr, Sc, Sku, Sal, Sv(f), Str
 V tomto intervalu se nachází většina naměřených parametrů. 99,7% naměřených hodnot těchto parametrů se od střední hodnoty souboru liší maximálně o 1%.
- $V \in (0,3\%; 2,45\%)$
 Parametry: Sm, Rpm, Sds, Ssc, Sp, Ssk
 Na základě naměřených dat těchto parametrů můžeme říci, že 95,5% naměřených hodnot se neliší od průměru o více než 5%.
- $V > 2,45\%$
 Parametry: Rz, Sz, Rvm, Sv
 Tyto parametry se jeví jako nejhůře opakovatelné. 95,5% naměřených hodnot se od střední hodnoty liší až o 16%.

4.2.2 Výsledky měření rozdílných míst součásti

Parametry různých míst měření byly rozděleny do tří oblastí podle relativní směrodatné odchylky a vzestupně seřazeny do grafu (obr. 4-7).



obr. 4-7 Relativní směrodatné odchylky různých míst měření

- $V \leq 5\%$
Parametry: Std, Sbi, Ssc, Sci, Sds, Sdq, Svi
O těchto parametrech můžeme prohlásit že 95,5% naměřených hodnot z těchto parametrů se od jejich střední hodnoty neliší více jak o 10%.
- $V \in (6,7\%; 8,55\%)$
Parametry: Sdr, Sc, Sa, Sq, Sm, Sku, Sv(f)
Tyto parametry jsou méně reprezentativní než ty z předchozího intervalu. 95,5% naměřených hodnot se od průměru liší až o 17,1%.
- $V > 8.55\%$
Parametry: Rz, Sz, Rvm, Rpm, Sv, Sp, Str, Sal, Ssk
Tyto parametry jsou na tom nejhůř z hlediska reprezentace. Odchylka parametrů dosahuje řádově až desítek procent.

4.2.3 Vliv rychlosti měření na hodnoty parametrů

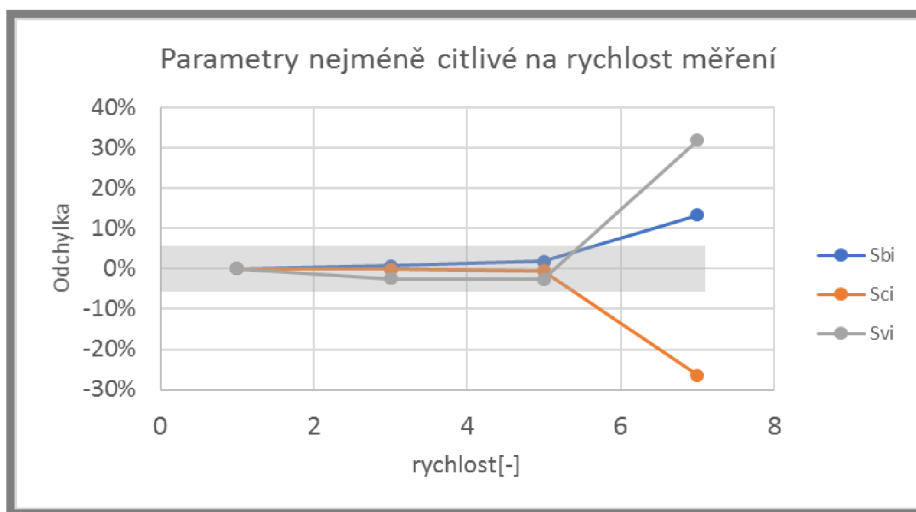
Byly vykresleny závislosti rychlostí na hodnotách parametrů. Za referenční hodnotu byla zvolena rychlost 1X. Z grafů vyplývá, že odchylka všech parametrů stoupá se zvyšující se rychlostí měření. Rozdělení parametrů podle odchylek od referenční rychlosti.

Parametry nejméně citlivé na rychlost měření

Odchylka $\leq 5\%$ při rychlosti 5X

Parametry: Sbi, Sci, Svi

Odchylka parametrů od referenční rychlosti činila při rychlosti 5X maximálně 2,62%. Při rychlosti 7X se odchylka pohybovala až kolem 30%. (obr. 4-8)



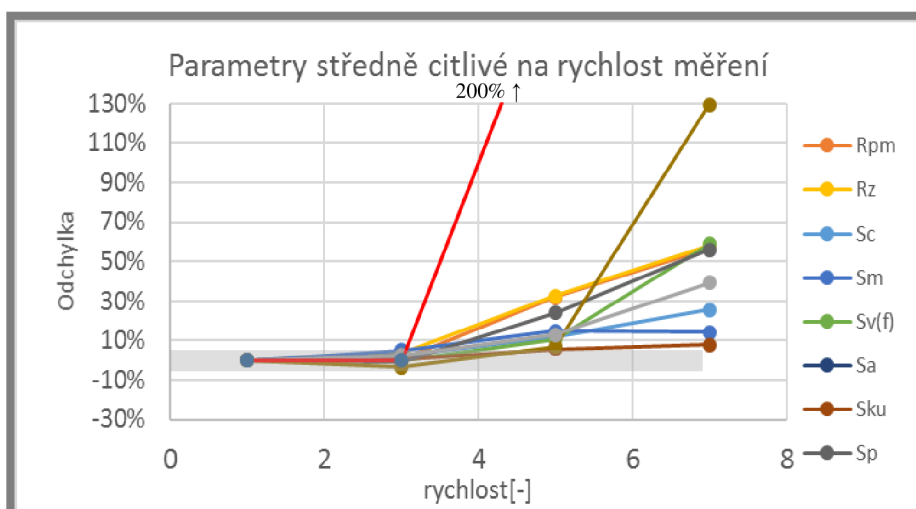
obr. 4-8 Parametry nejméně citlivé na rychlost měření

Parametry středně citlivé na rychlost měření

Odchylka $\leq 5\%$ při rychlosti 3X

Parametry: Rpm, Rz, Sc, Sm, Sv(f), Sa, Sku, Sp.

Parametry vykazují při rychlosti 3X odchylku do 4,9%. Většina těchto parametrů pak vykazovala při rychlosti 5X odchylku do 33% a jejich průběh byl až do rychlosti 7X téměř lineární. Výjimku tvoří parametry Sa a Ssk, jejich hodnoty byly při vyšších rychlostech než 3X o více jak 100% větší než při referenční rychlosti. (obr. 4-9)



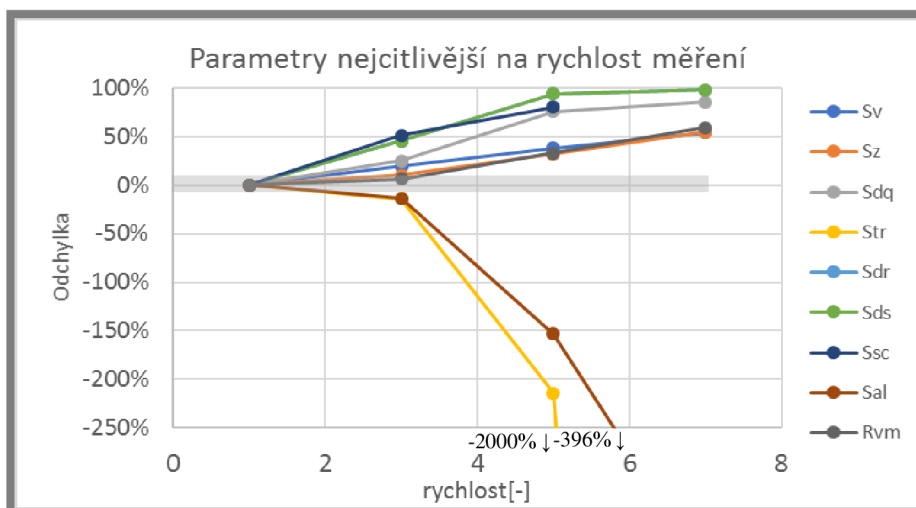
obr. 4-9 Parametry středně citlivé na rychlost měření

Parametry nejcitlivější na rychlost měření

Odchylka > 5% při rychlosti 3X

Parametry: Sv, Sz, Sdq, Str, Sdr, Sds, Ssc, Sal, Rvm

Tyto parametry jsou rychlostí měření ovlivněné nejvíce. Odchylka od referenční rychlosti byla již při rychlosti 3X větší jak 6%. Při rychlosti 5X měli mnohé tyto parametry odchylku přes 100%. (obr. 4-10)



obr. 4-10 Parametry nejcitlivější na rychlost měření

4.2.4 Vliv treshold signálu na hodnoty parametrů

4.2.4

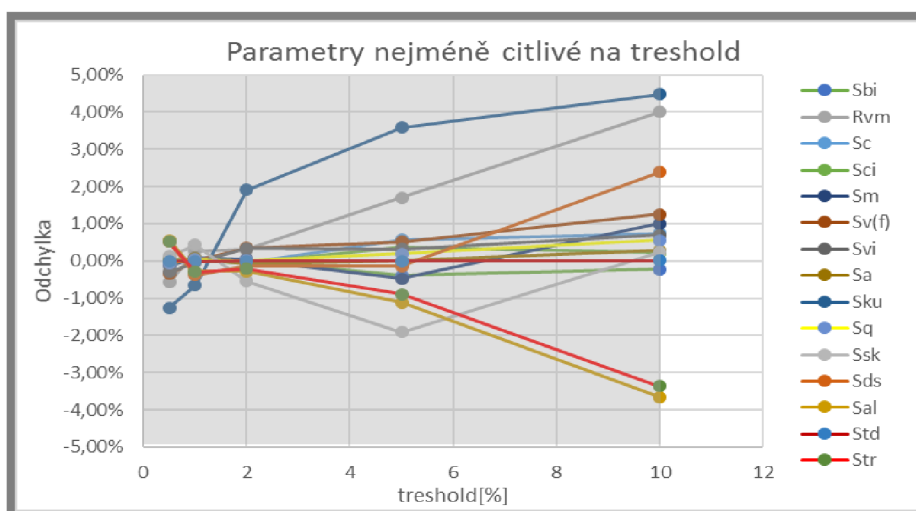
Z naměřených hodnot byly sestaveny grafy závislosti odchylek parametrů od referenční hodnoty na hodnotě treshold. Z grafů je zřejmé, že odchylka je s rostoucí hodnotou treshold vzrůstající. Parametry byly rozděleny podle odchylky od referenční hodnoty.

Parametry nejméně citlivé na treshold signálu

Odchylka $\leq 5\%$ při treshold 10%

Parametry: Sbi, Rvm, Sc, Sci, Sm, Sv, Svi, Sa, Sku, Sq, Ssk, Sds, Sal, Std, Str

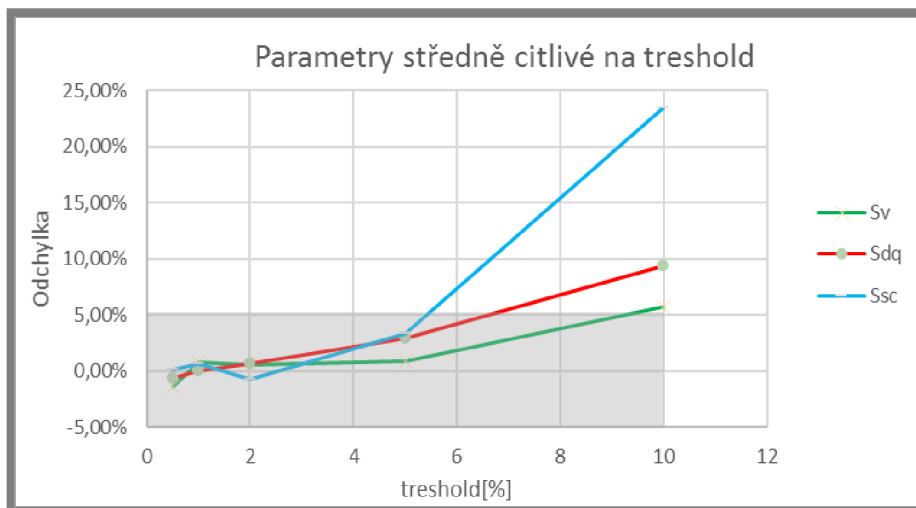
Odchylka těchto parametrů nepřesáhla v průběhu měření 5% z toho většina z nich ani odchylku 1%. Hodnota těchto parametrů není změnou treshold zásadně ovlivněna. (obr. 4-11).



obr. 4-11 Parametry nejméně citlivé na treshold signálu

Parametry středně citlivé na treshold signáluOdchylka $\leq 5\%$ při treshold 5%

Parametry: Ssc, Sv, Sdq (obr. 4-12)

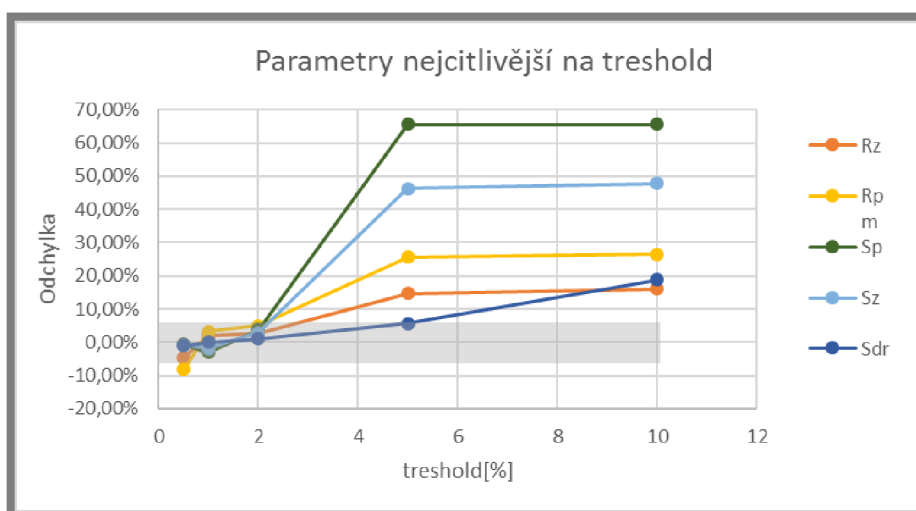


obr. 4-12 Parametry středně citlivé na treshold signálu

Parametry nejcitlivější na treshold signáluOdchylka $\leq 5\%$ při treshold 2%

Parametry: Rz, Rpm, Sp, Sz, Sdr

Parametry nejvíce ovlivněné hodnotou treshold. Při vyšší hodnotě treshold než jsou 2%, jsou hodnoty většiny těchto parametrů v řádech desítek procent a nejsou tedy příliš směrodatné. Do treshold 5% je průběh parametrů rostoucí, odtud do 10% je však pro většinu parametrů konstantní. (obr. 4-13)



obr. 4-13 Parametry nejcitlivější na treshold signálu

4.2.5 Vliv hodnoty intenzity zdroje světla na hodnoty parametrů

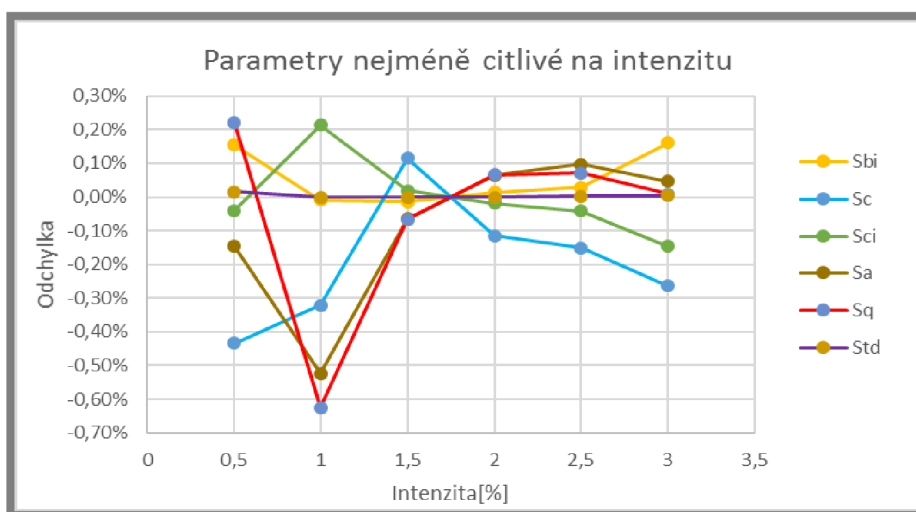
Jako referenční hodnota intenzity bylo stanoveno 1,75%. S rostoucí vzdáleností od referenční intenzity rostou i odchylky parametrů. Hodnoty byly seřazeny dle citlivosti.

Parametry nejméně citlivé na intenzitu světla

Odchylka $\leq 1\%$

Parametry: Sbi, Sc, Sci, Sa, Sq, Std

Tyto parametry měly v celém rozsahu měření maximální odchylku menší než 1%. Intenzita tedy nemá příliš velký vliv na jejich hodnotu. (obr. 4-14)



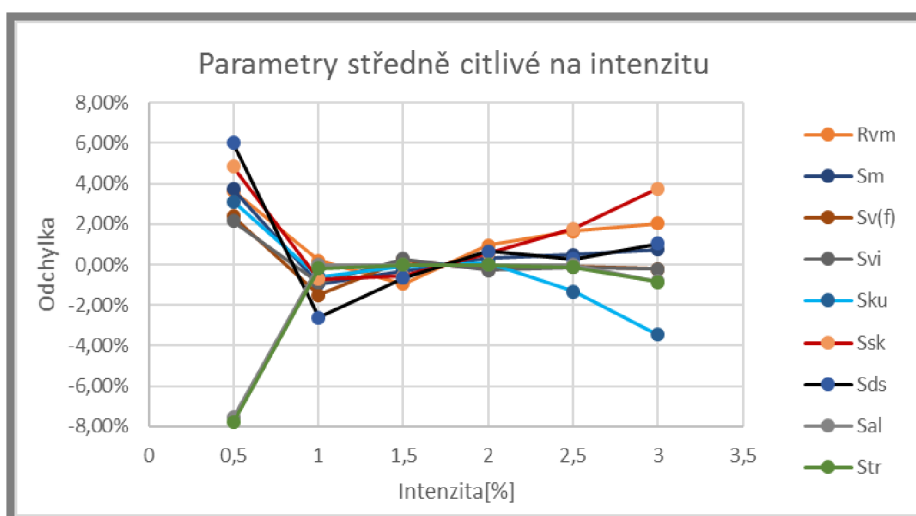
obr. 4-14 Parametry nejméně citlivé na intenzitu světla

Parametry středně citlivé na intenzitu světla

Odchylka $\leq 10\%$

Parametry: Rvm, Sm, Sv(f), Svi, Sku, Ssk, Sds, Sal, Str

Parametry nepřesáhly v průběhu měření odchylku 10%. Naprostá většina těchto parametrů měla odchylky do 6%. (obr. 4-15)



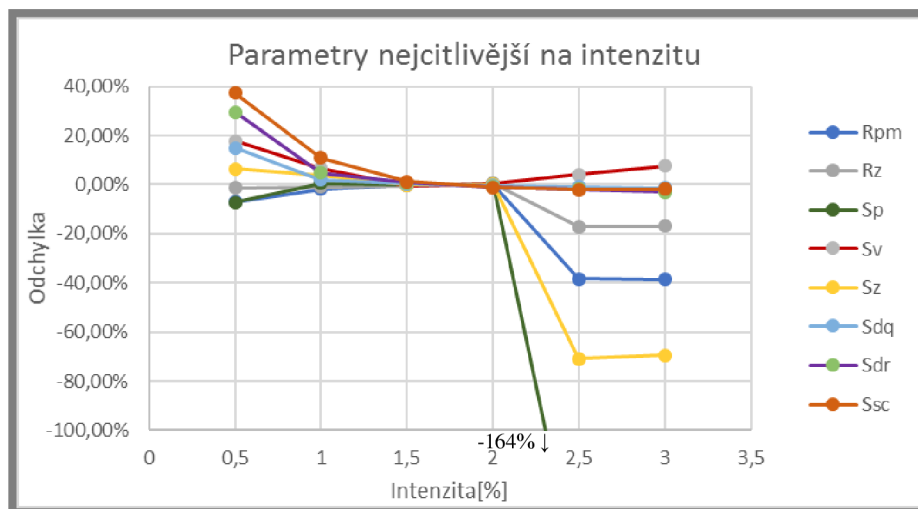
obr. 4-15 Parametry středně citlivé na intenzitu světla

Parametry nejcitlivější na intenzitu světla

Odchylka > 10%

Parametry: Rpm, Rz, Sp, Sv, Sz, Sdq, Sdr, Ssc

Parametry nejvíce ovlivněné intenzitou. Jejich krajní hodnoty jsou až desítky procent. (obr. 4-16)



obr. 4-16 Parametry nejcitlivější na intenzitu světla

4.3 Analýza výsledků

Analýza opakovatelnosti parametrů

Jako nejlépe opakovatelné se jeví parametry Sdq, Sq, Sa, Sdr, Sku a to díky průměru velkého množství dat, na jehož základě jsou vypočítány. Z hlediska opakovatelnosti jsou na tom dobře také parametry prostorové a parametry funkční vycházející z křivky poměru materiálu jejíž hodnoty se počítají z parametru Sq. Nejmenší V měl parametr Std, jeho opakovatelnost však závisí pouze na zachování směru textury povrchu při měření. Jako hůře opakovatelné z měření vyšly parametry Rpm, Rz, Rvm stanovovány na základě extrémních bodů a výškové parametry Sv, Sz, Sp stanovovány na základě jednoho extrémního bodu.

Analýza reprezentativnosti parametrů

Skupina nejreprezentativnějších parametrů je zde podobná jako skupina parametrů nejlépe opakovatelných. Opět se zde nachází výškové parametry vycházející z průměru plochy, s výjimkou parametru Ssk, a parametry vypočítané na základě křivky poměru materiálu. I parametr Std měl znovu nejnižší V, protože byl v průběhu měření zachován směr textury. Ostatní prostorové parametry však patřily mezi nejméně reprezentativní, stejně jako parametry stanovené na základě extrémních bodů.

Analýza vlivu rychlosti

S rostoucí rychlostí měření vzrůstala u všech měřených parametrů i odchylka od referenční hodnoty rychlosti 1X. Může to být způsobeno tím, že při vyšší rychlosti měření vynechá profilometr některé body. Nejméně ovlivněné rychlostí jsou parametry funkční. Jejich hodnota se výrazně měnila až od rychlosti 5, při rychlosti 7 byly odchylky všech měřených parametrů v řádech desítek procent. Relativně málo ovlivněné až do rychlosti 3 zůstaly i výškové průměrové parametry. Větší odchylky od referenční hodnoty měly parametry extrémních bodů Rpm, Rz, Sp, Sv, Sz, Rvm. Nejhorší však skončily parametry prostorové a parametry hybridní. Většina z těchto parametrů nebyla příliš směrodatná již při rychlosti 3X.

Analýza citlivosti parametrů na treshold signálu

S rostoucí hodnotou treshold roste i množství detekovaného šumu signálu. Referenční hodnota byla zvolena v rozmezí 0,5% až 2%. Nejméně citlivé byly průměrové výškové parametry a parametry funkční určené křivkou poměru materiálu. Relativně málo citlivé byly i prostorové parametry. Citlivější byly parametry hybridní. Parametry extrémních bodů byly směrodatné pouze při hodnotě treshold do 2% a z měření vyšly jako nejcitlivější na toto nastavení.

Analýza citlivosti parametrů na intenzitu

Jako referenční intenzita světla LED diody byla zvolena hodnota 1,75%. S větší odchylkou od této hodnoty je plocha příliš tmavá nebo naopak přeexponovaná. Zdaleka nejmenší citlivost na intenzitu vykazovaly parametry funkční a výškové průměrové parametry. Větší citlivost a podobný průběh vykazovaly parametry prostorové určené rozpadem autokorelační funkce. Nejcitlivější byly opět extrémní výškové parametry a parametry hybridní.

5 ZÁVĚR

Tato práce poskytuje souhrnný přehled o topografickém hodnocení povrchů strojních součástí a dává ho do souvislosti s předepsanými normami. Součástí práce jsou i informace o opakovatelnosti, reprezentativnosti a robustnosti topografických parametrů, měřených profilometrem Contour GT-X8.

V rešeršní části je topograficky charakterizován povrch tělesa, popsána profilová metoda včetně vysvětlení procesu filtrace a charakteristiky profilových parametrů.

Dále se rešerše zabývá plošnou metodou. Rozlišuje ji od metody profilové, uvádí principy filtrace a postup při aplikaci filtrů. Je zde uvedena i charakteristika jednotlivých skupin geometrických parametrů, soupis metod určených k měření povrchů profilometry a vysvětlení metody koherenční skenovací interferometrie.

V kapitole Diskuze se nachází experimentální část práce, která obsahuje popis měření, profilometru a statistických metod použitých k analýze naměřených dat.

V další části kapitoly jsou hodnoty parametrů analyzovány.

Stanovené cíle práce byly splněny. Byl podán všeobecný přehled o topografickém hodnocení a byly zmíněny normy s ním související. Zároveň byla provedena série měření a analýz, podle kterých, je možné získat přehled o robustnosti naměřených topografických parametrů profilometrem Contour GT-X8.

Z experimentu plyne, že již změna místa měřeného povrchu může mít zásadní vliv na hodnoty parametrů. Také při nevhodném nastavení přístroje, tedy při vysokých hodnotách treshold signálu, nebo vysoké rychlosti měření nejsou parametry směrodatné.

Na základě provedených měření a analýz lze konstatovat, že jako nejrobustnější se jeví parametry výškové, definované průměrem hodnot a parametry funkční, vypočítané na základě křivky poměru materiálu. Naopak jako nejméně robustní vyšly z měření parametry určené na základě extrémních bodů.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BUMBÁLEK, Bohumil, ODVODY, Vladimír a OŠŤÁDAL, Bohuslav. *Drsnost povrchu*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1989. 338 s.
- [2] LEACH, Richard. *Optical Measurement of Surface Topography*. Berlin: Springer, 2011, ISBN 978-3-642-12011-4.
- [3] PERNIKÁŘ, Jiří, MIROSLAV TYKAL a JOSEF VAČKÁŘ. *Jakost a metrologie. Metrologie*. Brno: CERM, 2001, 151 s. ISBN 80-214-1997-0.
- [4] DAVIM, J. Paulo. *Tribology for Engineers*. Philadelphia: Woodhead Publishing, 2011. ISBN 978 9 85709 114 7.
- [5] ČSN EN ISO 4287: *Geometrické požadavky na výrobky(GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda- Termíny, definice a parametry struktury povrchu*.
- [6] MENEZES, Pradeep L., MICHAEL NOSONOVSKY, SUDEEP P. INGOLE, SATISH V. KAILAS a MICHAEL R. LOVELL, ed. *Tribology for Scientists and Engineers*. New York: Springer, 2013. ISBN 978-1-4614-1945-7.
- [7] TYKAL, Miroslav. *Normalizace struktury povrchu, současný stav a trendy vývoje* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: gps.fme.vutbr.cz/STAH_INFO/41_Tykal_TNK7.pdf
- [8] 3D analýzy a filtrace profilu povrchu. *MM spektrum* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/3d-analyzy-a-filtrace-profilu-povrchu.html>
- [9] ČSN EN ISO 4288: *Geometrické požadavky na výrobky(GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda- Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*.
- [10] LEACH, R. K. (Richard K.). *Characterisation of areal surface texture*. Berlin: Springer, 2013, xii, 353 s. ISBN 978-3-642-36457-0
- [11] ČSN EN ISO 25178-2: *Geometrické specifikace produktu(GPS) - Textura povrchu: Plocha – Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu*.
- [12] ČSN EN ISO 25178-3: *Geometrické specifikace produktu(GPS) - Textura povrchu: Plocha – Část 3: Specifikace operátorů*.
- [13] ČSN EN ISO 16610-61: *Geometrické specifikace produktu(GPS) – Filtrace- Část 61: Gaussovy filtry*.
- [14] Guide for the Measurement of Smooth Surface Topography using Coherence Scanning Interferometry. *A NATIONAL MEASUREMENT GOOD PRACTICE GUIDE* [online]. National Physical Laboratory, 2008 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: publications.npl.co.uk/npl_web/pdf/mgpg108.pdf
- [15] ČSN EN ISO 16610-22: *Geometrické specifikace produktu(GPS) – Filtrace- Část 22: Lineární profilové filtry: Spline filtry*
- [16] ČSN EN ISO 16610-41: *Geometrické specifikace produktu(GPS) – Filtrace- Část 1: Morfologické filtry: Diskové a horizontální lineární segmentové filtry*.
- [17] *Michigan metrology, LLC* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: http://www.michmet.com/Texture_parameters.htm

- [18] *Digital surf* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.digitalsurf.com/en/guide.html>
- [19] BLUNT, Liam a Xiangqian JIANG, ed. *Advanced Techniques for Assessment Surface Topography: Development of a Basis for 3D Surface Texture Standards "SURFSTAND"*. 2003, 340 s. ISBN 9781903996119.
- [20] *ContourGT 3D Optical Microscopes Brochure* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: http://www.m3.tuc.gr/EQUIPMENT/CONTOUR%20GT-K/ContourGT_3D_Optical_Microscopes-Brochure-B514-RevC0.pdf
- [21] *Analýza zvuku v časové oblasti: Autokorelační funkce* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <https://is.muni.cz/el/1433/podzim2011/SIN04/um/02/foil15.html>
- [22] *Povrchy povlaků* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/povrchy%20povlaku.pdf
- [23] ŠIKULOVÁ, Marie a Zdeněk KARPÍŠEK. *Matematika IV: Pravděpodobnost a matematická statistika*. 3. vyd. Brno: PC DIR, 1995, 204 s. ISBN 80-214-0685-2.
- [24] Normální rozdělení. *WikiSkripta* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: http://www.wikiskripta.eu/index.php/Norm%C3%A1ln%C3%AD_rozd%C4%9Blen%C3%AD
- [25] ČSN EN ISO 25178-6: *Geometrické specifikace produktu(GPS) - Textura povrchu: Plocha – Část 6: Klasifikace metod měření textury povrchu*.
- [26] ČSN EN ISO 25178-604: *Geometrické specifikace produktu(GPS) - Textura povrchu: Plocha – Část 604: Jmenovité charakteristiky bezdotykových přístrojů (spojité skenovací interferometry)*.
- [27] DE GROOT, Peter J. a James F. BIEGEN. *A new class of wide-field objectives for 3D interference microscopy* [online]. Zygo Corporation, 2015 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: https://www.zygo.com/library/papers/proc_95250N.pdf
- [28] OSTEN, Wolfgang, ed. *Optical Inspection of Microsystem*. CRC press, 2007. ISBN 0-8493-3682-1.
- [29] WHITEHOUSE, David J. *Handbook of Surface and Nanometrology*. 2003: IOP Publishing. ISBN 0 7503 0583 5.
- [30] HARDING, Kevin. *Handbook of Optical Dimensional Metrology*. 2013. CRC Press. ISBN 9781439854815.
- [31] Gaussian distribution. *Introduction to Programming in Java* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://introcs.cs.princeton.edu/java/11gaussian/>
- [32] A New Approach for Characterizing Surface Texture. *Sensors* [online]. [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/12/7/9110/htm>

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN**7**

<i>CSI</i>	-koherenční skenovací interferometrie
<i>PSI</i>	-interferometrie s fázovým posunem
<i>STM</i>	-skenovací tunelovací mikroskopie
<i>SEM</i>	-skenovací elektronová mikroskopie
<i>GPS</i>	-geometrická specifikace produktů
<i>Lr</i> [mm]	-základní délka drsnosti
<i>Ln</i> [mm]	-vyhodnocovaná délka drsnosti
μ [μm]	-střední hodnota
σ^2	-rozptyl
σ	-směrodatná odchylka
<i>V</i> [%]	-relativní směrodatná odchylka
<i>Pp, Rp, Wp</i>	-největší výška výstupku profilu
<i>Pv, Rv, Wv</i>	-největší hloubka prohlubně profilu
<i>Pz, Rz, Wz</i>	-největší výška profilu
<i>Pc, Rc, Wc</i>	-průměrná výška prvků profilu
<i>Pt, Rt, Wt</i>	-celková výška profilu
<i>Pa, Ra, Wa</i>	-průměrná aritmetická úchylka posuzovaného povrchu
<i>Pq, Rq, Wq</i>	-průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu
<i>Psk, Rsk, Wsk</i>	-šikmost posuzovaného profilu
<i>Pku, Rku, Wku</i>	-špičatost posuzovaného profilu
<i>PSm, RSm, WSm</i>	-průměrná šířka prvků profilu
<i>PΔq, RΔq, WΔq</i>	-průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu
λ_c [nm]	-mezí vlnová délka
λ_f [nm]	-vlnová délka dlouhovlnného filtru profilu
λ_s [nm]	-vlnová délka krátkovlnného filtru profilu
<i>Sq</i> [μm]	-základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu
<i>Ssk</i> [-]	-šikmost omezené stupnice povrchu
<i>Sku</i> [-]	-špičatost omezené stupnice povrchu
<i>Sp</i> [μm]	-maximální výška piku omezené stupnice povrchu
<i>Sv</i> [μm]	-maximální hloubka prohlubně omezené stupnice povrchu
<i>Sz</i> [μm]	-maximální výška omezené stupnice povrchu
<i>Sa</i> [μm]	-aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu
<i>Sal</i> [%]	-délka autokorelace
<i>Str</i> [-]	-poměr aspektu textury
<i>Sdq</i> [-]	-základ průměrného čtverce gradientu omezeného stupnicí
<i>Sdr</i> [%]	-poměr rozvinuté mezifázové plochy omezené stupnicí povrchu
<i>Sk</i> [μm]	-výška jádra
<i>Spk</i> [μm]	-redukovaná výška piku
<i>Svk</i> [μm]	-redukovaná hloubka údolí
<i>Smr1</i> [%]	-poměr materiálu
<i>Smr2</i> [%]	-poměr materiálu
<i>Svq</i> [μm]	-základ průměrné úchylky čtverců údolí
<i>Spq</i> [μm]	-základ průměrné úchylky plošiny
<i>Smq</i> [%]	-poměr materiálu
<i>Sxp</i> [μm]	-extrémní výška piku

V_{vv} [ml/m ²]	-neplatný objem údolí omezené stupnice povrchu
V_{vc} [ml/m ²]	-neplatný objem jádra omezené stupnice povrchu
V_m [ml/m ²]	-objem materiálu
V_{mp} [ml/m ²]	-pik objemu materiálu omezené stupnicí povrchu
V_{mc} [ml/m ²]	-jádro objemu materiálu omezené stupnicí povrchu
R_{pm} [μm]	-průměrná výška deseti nejvyšších vrcholů
R_{vm} [μm]	-průměrná hloubka deseti nejhlubších prohlubní
S_{bi} [-]	-index opotřebení
S_c [μm ³ /mm ²]	-core valley volume
S_{ci} [-]	-core oil retention index
S_m [μm ³ /mm ²]	-material volume
S_v [μm ³ /mm ²]	-deep valley volume
S_{vi} [-]	-valley oil retention index
S_{ds} [mm ⁻²]	-hustota piků
S_{sc} [%]	-průměrné zakřivení vrcholů
S_{td} [°]	-směr textury

8 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

obr. 3-1 Úchylky textury povrchu[29].....	14
obr. 3-2 Profil povrchu[5].....	15
obr. 3-3 Filtry profilu[5].....	15
obr. 3-4 Proces separace na povrchy omezené stupnicí[18].....	17
obr. 3-5 Zleva: údolí, vrch a sedlo[10].....	18
obr. 3-6 Křivka poměru materiálu (vpravo) vzniklá na základě profilu (vlevo)[32] .	20
obr. 3-7 Křivka poměru objemu materiálu[18]	21
obr. 3-8 Schéma CSI[14]	24
obr. 3-9 Michelson[31].....	24
obr. 3-10 Mirau[31]	24
obr. 3-11 Linnik[31]	24
obr. 4-1 Obrazovka s nastavením parametrů měření	25
obr. 4-2 Strom použitých operací k dosažení požadovaných parametrů	26
obr. 4-3 Contour Bruker GT-X8[20]	26
obr. 4-4 Měřený vzorek	27
obr. 4-5 Gaussova křivka[32].....	27
obr. 4-6 Relativní směrodatné odchytky jednoho místa měření	28
obr. 4-7 Relativní směrodatné odchytky různých míst měření.....	29
obr. 4-8 Parametry nejméně citlivé na rychlost měření	30
obr. 4-9 Parametry středně citlivé na rychlost měření	30
obr. 4-10 Parametry nejcitlivější na rychlost měření	31
obr. 4-11 Parametry nejméně citlivé na treshold signálu	31
obr. 4-12 Parametry středně citlivé na treshold signálu	32
obr. 4-13 Parametry nejcitlivější na treshold signálu	32
obr. 4-14 Parametry nejméně citlivé na intenzitu světla	33
obr. 4-15 Parametry středně citlivé na intenzitu světla	33
obr. 4-16 Parametry nejcitlivější na intenzitu světla	34

9 SEZNAM TABULEK

tab. 1 Hodnoty cut-off délek pro neperiodické profily	16
tab. 2 Profilové parametry	16
tab. 3 Výškové parametry	19
tab. 4 Prostorové parametry	19
tab. 5 Hybridní parametry	20
tab. 6 Funkční parametry	20
tab. 7 Objemové parametry	21
tab. 8 Parametry neobsažené v aktuálních normách	22
tab. 9 Metody měření povrchu	23
tab. 10 Používané interferometrické objektivy [27], [28].....	24