

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

**Měření parametrů drsnosti povrchu  
pomocí 3D**

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Bc. Ing. Petr Hrabě, Ph.D.

Autor: Jan Městka

PRAHA 2019

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jan Městka

Obchod a podnikání s technikou

Název práce

**Měření parametrů drsnosti povrchu pomocí 3D**

Název anglicky

**Measuring of surface roughness parameters using 3D**

---

### Cíle práce

Cílem bakalářské práce je shromáždit a analyzovat aktuální poznatky o souřadnicových měřicích strojích, popsat jednotlivé metody měření drsnosti povrchu. Na základě závěrů z literárního rozboru předmětné problematiky stanoví bakalář přínos práce.

### Metodika

Současný stav řešeného problému (literární rešerše).

Cíle práce a metody jejího vypracování.

Přínos a závěry práce.

## Doporučený rozsah práce

cca. 30 stran

## Klíčová slova

drsnost povrchu, měření, souřadnice

---

## Doporučené zdroje informací

ALLEN, T.: Particle Size Measurement. Vol. 2, Surface area and pore size determination. London, 1997.

BUMBÁLEK, B., ODVODY, V., OŠŤÁDAL, B.: Drsnost povrchu. Praha, 1989.

Časopisy: Strojírenská technologie, MM průmyslové spektrum, TM Svařování – dělení – spojování materiálů, Technik.

CHRISTOPH, R., NEUMANN, J., H.: Multisenzorová souřadnicová měřicí technika, měření rozměrů, tvarů, polohy a drsnosti, Uherské Hradiště, PRIMA Bilavčák, 2008.

Měření drsnosti povrchu. Český Krumlov, 1981.

Souřadnicové měřicí stroje. České Budějovice, 1985.

Souřadnicové měřicí stroje, špičková technologie pro nejvyšší přesnost, Teplice, Mitutoyo Česko, 2006.

---

## Předběžný termín obhajoby

2018/19 LS – TF

## Vedoucí práce

Bc. Ing. Petr Hrabě, Ph.D.

## Garantující pracoviště

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 24. 1. 2018

**prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 30. 1. 2018

**prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.**

Děkan

V Praze dne 31. 03. 2019

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Měření parametrů drsnosti povrchu pomocí 3D vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů. Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním dle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Jsem si vědom, že moje bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitní databázi a bude veřejně přístupná k nahlédnutí. Jsem si vědom že, na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

# Poděkování

Velice děkuji vedoucímu práce Petru Hraběti za vedení bakalářské práce. Dále děkuji celé své rodině za neustálou podporu při studiu a za cenné rady při tvorbě této práce.

**Abstrakt:** Cílem této bakalářské práce bylo zpracovat a informovat o současné problematice měření drsnosti povrchu a o nových metodách využívaných při měření a zpracování výsledků 3D. V kapitole „drsnost povrchu“ jsou nastíněny základní pojmy využívané při měření drsnosti. Dále v této kapitole jsou představeny značení jednotlivých pojmů v rámci rozdílných norem potřebných pro další kapitoly. V kapitole „měření drsnosti povrchu“ jsou představeny různé metody a přístroje pro měření drsnosti. Dále tato kapitola obsahuje náležitosti spojené s měřením. V kapitole jsou také vysvětleny základní principy přístrojů a měření s nimi. V kapitole „Inovace a inovativní metody měření parametrickými měřidly“ jsou teoreticky popsány dvě nové metody. Jedna metoda využívá teoretických výpočtů a práce se simulačními daty a druhá popisuje nový typ měřicí sondy a princip jejího fungování. Obě metody jsou následně porovnány se staršími metodami daného odvětví.

**Klíčová slova:** drsnost povrchu, měření, souřadnice

**Abstract:** The aim of this bachelor thesis was to process and inform about the current problems of surface roughness measurement and about new methods in 3D measurement and processing. In the „surface roughness“ chapter, the basic terms used in roughness measurement are outlined. Furthermore, in this chapter are introduced the labeling of individual terms within the different standards needed for the next chapters. In the "Surface roughness measurement" chapter, various methods and instruments for measuring roughness are presented. In addition, this chapter contains measurement-related considerations. The chapter also explains the basic principles of instruments and measurements with them. Two new methods are theoretically described in the chapter "Innovations and innovative methods of measuring parametric meters". One method uses theoretical calculations and work with simulation data and the second describes a new type of probe and the principle of its operation. Both methods are then compared with the older methods of the industry.

**Key words:** surface roughness, measurement, coordinates

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. ÚVOD</b> .....  | <b>1</b>  |
| <b>2. CÍL PRÁCE</b> .....   | <b>2</b>  |
| <b>3. METODIKA PRÁCE</b> .....  | <b>2</b>  |
| <b>4. ZÁKLADY DRSNOSTI POVRCHU</b> .....                                  | <b>3</b>  |
| 4.1 DRSNOST POVRCHU .....   | 3         |
| 4.2 ZÁKLADNÍ POJMY .....  | 3         |
| 4.3 ZNAČENÍ PODLE NOREM .....   | 6         |
| <b>5. MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU</b> .....                                   | <b>10</b> |
| 5.1 VIZUÁLNÍ A DOTYKOVÁ METODA POMOCÍ POROVNÁVACÍCH DESTIČEK .....        | 10        |
| 5.2 MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ .....   | 11        |
| 5.3 OPTICKÉ MĚŘÍCÍ METODY .....   | 14        |
| 5.4 PŘESNOST MĚŘENÍ .....   | 16        |
| <b>6. INOVACE A INOVATIVNÍ METODY MĚŘENÍ PARAMETRICKÝMI MĚŘIDLY</b> ..... | <b>18</b> |
| 6.1 METODA ZALOŽENÁ NA ČERVENOZELENÉM ALIASINGU .....                     | 18        |
| 6.2 METODA MĚŘENÍ VLÁKNOVÝM OPTICKÝM SENSOREM .....                       | 23        |
| <b>7. ZÁVĚR</b> .....   | <b>31</b> |
| <b>ZDROJE A REFERENCE</b> .....   | <b>32</b> |

# 1. Úvod

Drsnost povrchu je velice důležitá charakteristika, která vyjadřuje hrubost opracování a je to měřítko pro zjištění kvality povrchu. V obráběcím průmyslu drsnost povrchu může ovlivnit celkovou funkčnost a kvalitu produktu, která je velice znát při opotřebení, odolnosti a únavové odolnosti produktu. Proto je velice důležité ji změřit přesně.

V rámci problematiky drsnosti povrchu se práce dále zabývá základními pojmy, které se dají využít v různých situacích při různých měřeních. Dále je důležité porovnat značení norem. Různé státy mají rozdílné značení parametrů nebo používají jiné veličiny. Řídí se podle různých norem, které jsou po většinu času formulované stejně, avšak mohou se v některých tvrzeních lišit.

V této práci je popsáno více norem, se stejnými definicemi ale jinými značeními. Konkrétně se tu vyskytují normy zabývající se přímo parametry drsnosti EN ISO 25178:2002. geometrické specifikace produktu a JIS B 0601:2001. Geometrical product specification.

Hlavním předmětem této práce je použití optických měřících strojů, které udávají parametry ve 3D souřadnicovém systému XYZ. Měření těmito stroji patří do bezkontaktních metod měření. Souřadnicové měřící stroje jsou v současnosti na velkém vzestupu díky jejich vysoké přesnosti a širokému rozsahu možností využití. Vzhledem ke stávajícím finančním krizím a snaze firem šetřit materiálem jsou u většiny tyto stroje nezbytností kvůli přesnému určení parametrů daného výrobku. Velký význam mají tyto stroje v automobilovém a leteckém průmyslu při měření drsnosti povrchu karoserií a jednotlivých povrchových částí letadel.



## 2. Cíl práce

Cílem této práce je seznámit čtenáře se současnou problematikou měření drsnosti povrchu. Dále seznámení se základními parametry a jednotlivými pojmy potřebnými k měření. Představeny budou i nové metody měření využitím 3D, a to prostřednictvím dvou výzkumných článků a vyhodnocení pokroku v přesnosti výsledků.

## 3. Metodika práce

Seznámení se s jednotlivými pojmy a parametry probíhá prostřednictvím literární rešerše, a to hlavně ze zahraničních zdrojů, jež poskytli jednotliví výrobci parametrických měřících strojů, a dále ze článků zabývajících se problematikou měření drsnosti povrchu. Relevantnost výroků a vlastních volných překladů je následně porovnávána a kontrolována pomocí děl v českém jazyce. Při zpracování teorie nových metod vychází autor z článků od japonských autorů. Při porovnávání jednotlivých metod jsou použity experimentální naměřené hodnoty z uvedených článků. V závěru autor shrnuje zjištěné poznatky.

## 4. Základy drsnosti povrchu

### 4.1 Drsnost povrchu

*„Drsnost je nerovnost povrchu, která vzniká při výrobě součástí. Je ovlivněna technologií a technologickými podmínkami při výrobě.“ [7]*

Při pohledu na obráběné díly, zjistíte, že jejich povrch ztělesňuje komplexní obrys tvořený sérií vrcholů, různých výšin, hloubek a mezer. [2]

Nedokonalosti vzhledu, zejména odlišnosti – jestli je něco lesklé a hladké nebo matné a drsné, jsou způsobené rozdílem v drsnosti povrchu. Tyto nedokonalosti jsou sledovány například u kapot automobilů nebo funkčních součástek. [2]

Drsnost povrchu neovlivňuje pouze vzhled objektu, ale indikuje také texturové a kontaktní rozdíly. Vzhled a textury dohromady mohou ovlivňovat přidanou hodnotu produktu. To, jak zákazník vnímá při odhadování ceny a zvyšuje/snižuje jeho spokojenost. [2]

Když nějaká část materiálu přijde do kontaktu s jinou částí, je to právě drsnost povrchu, která ovlivňuje stupeň opotřebení, nebo schopnost těsnit. Pokud je součástka nalakovaná, drsnost ovlivňuje přilnavost laku. V nedávných letech bylo proto potřeba kvantifikovat drsnost povrchu. [2]

### 4.2 Základní pojmy

Základní definice pojmů definovaných v EN ISO 25178:2002.

#### Profily

**Skutečný profil** vyplývá z průsečíku povrchu obrobku a roviny kolmé k tomuto povrchu, ve směru, který maximalizuje hodnotu drsnosti povrchu. Normálně v pravých úhlech k polohám značek obrábění. [5]

**Měřený profil** je profil, který je výsledkem snímání skutečného profilu sondou, mechanicky filtrující tento profil v závislosti na poloměru ( $r_{tip}$ ) špičky sondy a, je-li dostupný, skluzovém systému sond. Povrchové nedokonalosti, jako trhliny, škrábance, a promáčknutí nejsou součástí tohoto profilu a neměly by být v záznamu. V případě potřeby mohou pro tyto nedokonalosti být nastaveny tolerance podle EN ISO 8785. [5]

**Primární profil** (P-profil) vyplývá z elektronického filtrování nízkého průchodu měřeného profilu s mezní vlnovou délkou  $\lambda_s$ . Tento proces odstraňuje nejkratší složky vlnové délky, které nejsou považovány za relevantní pro hrubost měření. Parametry jsou označovány  $P$  a vyhodnoceny v rámci vzorkovacích délek. Tento profil se rovná vyhodnocené délce  $ln$  (celková délka zaznamenaného profilu povrchu). [5]

**Profil vlnitosti** (W-profil) vyplývá z elektronického průchodu primárního profilu s mezní vlnovou délkou  $\lambda_c$  a následnou filtrací s vysokým průchodem s mezní vlnovou délkou  $\lambda_f$ . Parametry jsou označeny  $W$  a vyhodnoceny přes vyhodnocovací délku  $ln$ , skládající se z několika vzorkovacích délek  $lw$ . Vzorkovací délka  $lw$  odpovídá mezní vlnové délce  $\lambda_f$  vysokofrekvenčního filtru. Toto množství však není standardizováno a musí být stanoveno na výkresu. Rozsah by měl ležet v intervalu  $5x-10x \lambda_f$ . [5]

## Filtry

Filtry slouží k odstranění šumů z povrchu a pro získání referenčního povrchu.

Proces vyhodnocení a využití filtrů:

1. Získání primárního povrchu použitím S-filtru na reálný povrch.
2. Na základě výsledku prvního filtrování, se provádí další filtrování pomocí L-filtru pro získání povrchu v omezeném měřítku.
3. Specifikování vyhodnocovací plochy povrchu v omezeném měřítku.
4. Získání referenčního povrchu pro povrch v omezeném měřítku a následné zjišťování parametrů ze standardu EN ISO 25178:2002.

**Gaussův filtr** – druh vyhlazovacího filtru, který potlačuje šum pomocí Gaussovy funkce. Tyto filtry, specifikovány v JIS B 0632: 2001 (ISO 11562: 1996) a ISO 16610-21: 2011, jsou aplikovány na plošné měření drsnosti povrchu. [3] [24]

**Filtr spline** – druh filtru, který se používá k získání hladkého profilu interpolací úseků mezi účinnými sousedními body pomocí funkce spline. Tyto filtry specifikovány v ISO / TS 16610-22:2006, jsou aplikovány na plošné měření drsnosti povrchu. [3] [24]

**S-filtr** eliminuje ty nejmenší prvky z povrchu. Je ekvivalentní mezní hodnotě  $\lambda_s$  v JIS B 0601:2001. V případě kontaktního typu měření se nepoužívá, kvůli šumu při kontaktu s povrchem. [3] [24]

**Mezní vlnová délka S-filtru** – používá se hodnota větší nebo rovnající se trojnásobku rozlišení měření pro rovinu XY. Pokud není nastavená hodnota účinná, zvýší se až na hodnotu, kde bude odstraněn omezený povrchový šum. Nesmí se používat v případě, že už byl použit jiný typ filtrování. [3] [24]

**L-filtr** eliminuje ty největší prvky povrchu. Využívá se k odstranění vlnění a jiných vedlejších částí povrchu, toto umožňuje pouze zobrazení drsnostních prvků povrchu. Je ekvivalentní mezní hodnotě  $\lambda_c$  v JIS B 0633:2001. [3] [24]

**Mezní vlnová délka L-filtru** – je obtížně jednotně specifikovatelná pouze na základě zvětšení objektivu nebo průměru hrotu, proto musí být upravena s ohledem na skutečný povrch. Nastavuje se na hodnotu pětinasobku délky profilu XY, který má být odstraněn jako vlnitost. [3] [24]

**F-operator** – Odstraňuje základní tvar z primárního povrchu. Je ekvivalentní korekci náklonu, což potlačuje nominální charakterizaci povrchu. [3] [24]

## Ostatní pojmy

S-F povrch – Povrch získán po použití filtrace F-operátorem na primární povrch. [3]

S-L povrch – Povrch získán použitím filtrace L-filtrem na S-F povrch. [3]

Povrch v omezeném měřítku – Má více ekvivalentních přirovnání, může znamenat jak povrch S-F tak i S-L. rovná se drsnostnímu profilu nebo profilu vlnitosti v profilové metodě. [3]

Referenční povrch – Základ pro povrch v omezeném měřítku, reprezentuje plochu ve střední výšce vyhodnocovací plochy podle EN ISO 25178:2002 Funkce textury povrchu. [3]

Vyhodnocovací oblast – Část povrchu v omezeném měřítku, která je předmětem hodnocení. [3]

Definiční oblast – Část vyhodnocovací oblasti, která je využívána pro definování parametrů.

Výška – Vzdálenost od referenčního povrchu v každém bodě plochy v omezeném měřítku. Bod, který leží pod referenčním povrchem, má záporný charakter. [3]

Auto-korelační funkce – Využívána pro vyhodnocení periodicity drsnosti povrchu ve směru roviny povrchu. [3]

## 4.3 Značení podle norem

### EN ISO 25178:2002 a JIS B 0601:2001

ISO 25178 a JIS B 0601-2001 je souhrn mezinárodních norem spojených s analýzou drsnosti povrchu. Tyto souhrny mají rozdílné značení a používají jiné principy měření.

| standard           |                      | ISO EN 25178:2002               | JIS B 0601-2001                 |     |
|--------------------|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----|
| nástroj měření     |                      | kontaktní i nekontaktní měřidla | pouze kontaktní (stylus metoda) |     |
| průřez             | předmět hodnocení    | S-F povrch                      | průřezový profil                |     |
|                    | filtr                | S-filter                        | λs filtr                        |     |
| drsnost            | předmět hodnocení    | S-L povrch                      | drsnostní profil                |     |
|                    | filtr                | S filtr, L filtr                | λs filtr, λcfiltr               |     |
|                    | výškové parametry    | max. vrcholová výška            | Sp                              | Rp  |
|                    |                      | max. hloubka dna                | Sv                              | Rv  |
|                    |                      | max. výška                      | Sz                              | Rz  |
|                    |                      | aritmetická prům. výška         | Sa                              | Ra  |
|                    |                      | kvadratická prům. výška         | Sq                              | Rq  |
|                    |                      | šikmost                         | Ssk                             | Rsk |
|                    |                      | špičatost                       | Sku                             | Rku |
|                    | prostorové parametry | Sal, Str, Std                   | ---                             |     |
| hybridní parametry | Sdq, Sdr             | RΔq                             |                                 |     |

Tabulka 1 - výškové parametry[2]

#### *Výškové parametry podle normy ISO EN 25178:2002:*

**Sp** – Výška nejvyššího vrcholu na měřené ploše. [1]

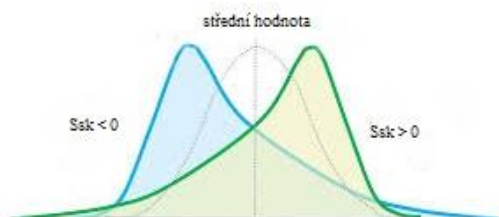
**Sv** – Absolutní hodnota hloubky nejnižšího dna na měřené ploše. [1]

**Sz** – Parametr definován jako součet nejvyššího vrcholu a největší hloubky na měřené ploše. Tento parametr je využíván pro kontrolu toho, zda profil nemá viditelné výstupky, které by mohly ovlivnit statiku nebo kontaktní funkci. [1]

**Sa** – Střední hodnota absolutní hodnoty výšky bodů na měřené ploše. Používána pro globální ohodnocení drsnostní amplitudy profilu. Neříká nic o frekvenci nerovností na obrysu profilu. Má význam pro náhodné povrchové drsnosti obrobené nástroji, které zanechávají na povrchu stopy, jako např. otryskávání, frézování, leštění. [1]

**Sq** – střední kvadratická hodnota sestavena z hodnot souřadnic na měřené ploše. Je ekvivalentní standartní odchylce výšek. [1]

**Ssk** – parametr určující stupeň asymetrie rozložení výšky, definované na měřené ploše, Tento parametr je důležitý zejména proto, že podává informace o morfologii textury povrchu. Kladné hodnoty korespondují s vysokými vrcholy rozmístěnými na regulárním povrchu a negativní hodnoty jsou k nalezení na površích s póry a škrábanci. Zajímá nás hlavně tehdy, když je u objektu vyžadována mazací, nebo kontaktní funkce. Nicméně nepodává žádnou informaci o absolutní výšce profilu na rozdíl od  $Sa$ . [2]



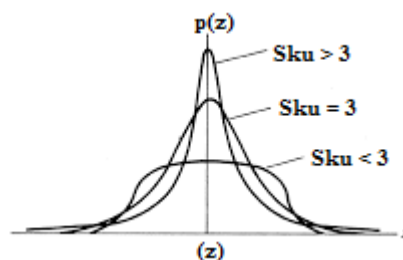
Obrázek 1 - křivost [18]

$Ssk < 0$  – Rozložení výšky je zkosené před střední hodnotou

$Ssk = 0$  – Rozložení výšky je zrcadlové

$Ssk > 0$  – Rozložení výšky je zkosené za střední hodnotou

**Sku** – Měřitelná ostrost drsnostního profilu. [3]



Obrázek 2 - šikmost [19]

$Sku < 3$  – Výškové rozložení je šikmo nad střední rovinou.

$Sku = 3$  – Výškové rozložení je normální

$Sku > 3$  – Výškové rozložení je na vrcholu ostré [3]

### Prostorové parametry

U prostorových parametrů hraje největší roli auto-korelační funkce, která určuje periodicitu každého sklonu povrchu. [2]

**Sal** – Auto-korelační délka – Parametr reprezentující horizontální vzdálenost ve směru, ve kterém auto-korelační funkce klesá nejrychleji na hodnotu 0,2 (standardně zadávaná hodnota)

**Str** – Poměr stran textury – parametr, který je označován jako měřítko jednotnosti povrchové textury. Výsledná hodnota je získána horizontálním rozdělení vzdálenosti ve směru, ve kterém klesá auto-korelační funkce na hodnotu 0,2 nejrychleji, a to hodnotou ve směru, kde hodnota auto-korelační funkce klesá nejpomaleji. [2]

**Std** – Směr textury – hodnota parametru je úhel, ve kterém je úhlové spektrum  $f_{APS}(s)$  největší. Reprezentuje rozložení na textuře povrchu.[2]

Hybridní parametry

**Sdq** – Střední kvadratická hodnota spádu – parametr spočítaný jako střední kvadratická hodnota sklopení ve všech bodech měřené plochy. [3]

**Sdr** – vyvinutý mezifázový poměr plochy – hodnota vyjádřena jako procento rozdílu přídavné plochy z textury a rovinnou plochou.[3]

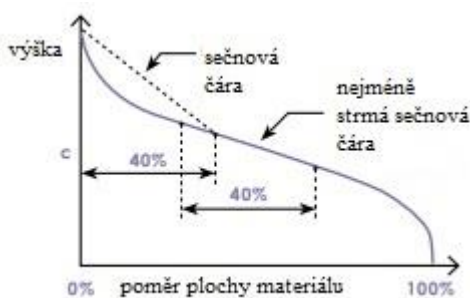
### *Funkční parametry podle ISO 25178*

Funkční parametry se vypočítávají pomocí křivky materiálu na ložiskové ploše. Jsou využívány k vyhodnocení chování povrchu, který přichází do silného mechanického kontaktu.

**Poměr plochy materiálu** je procento vypočítáno ze vztahu průřezové plochy ve výšce  $c$ , vzhledem k celkové průřezové ploše. [3]

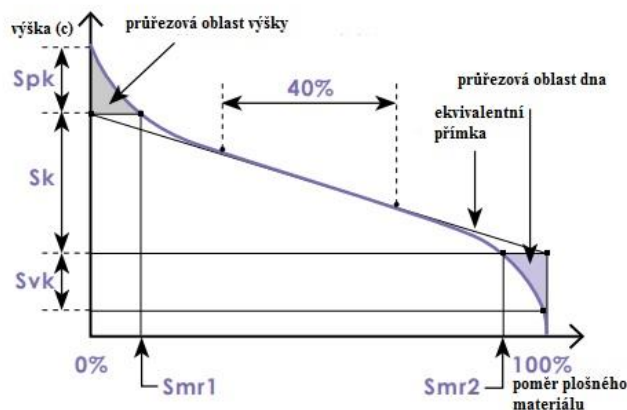
**Křivka plochy materiálu** (viz obr. 3). definuje hodnoty výšek, ve kterých je poměr plochy materiálu 0-100%. [3]

**Ekvivalentní křivka** vzniká pokud se posune sečnová čára (viz obr.3), křivky poměru plochy materiálu (získaná odečtením křivky při rozdílu plochy materiálu 40%) od plošného materiálu 0%, poloha, která má nejméně strmou sečnu se nazývá středová část poměru plochy materiálu. Ekvivalentní přímka je čára, kde je součet čtvercových odchylek ve směru svislé osy nejmenší.



Obrázek 3 - ekvivalentní křivka [3]

**Jádro povrchu** se získává odstraněním převládajících vrcholů a den (části které jsou zahrnuty v rozsahu výšek při ekvivalentním poměru plochy materiálu od 0% do 100%) z oblasti vymezeného povrchu. Vrcholy s výškou nad povrchem dna jsou nazývané snížené vrcholy a dna pod povrchem jádra se nazývají zmenšená dna. [3]



Obrázek 4 - ekvivalentní křivka 2[3]

|         |                   | standard                       | ISO 25178 | JIS B 0671-2002 |
|---------|-------------------|--------------------------------|-----------|-----------------|
| drsnost | funkční parametry | rozdíl výšek od středu povrchu | $S_k$     | $R_k$           |
|         |                   | střední hodnota vrcholů        | $S_{pk}$  | $R_{pk}$        |
|         |                   | střední hodnota dna            | $S_{vk}$  | $R_{vk}$        |
|         |                   | materiální část vrcholů        | $S_{mr1}$ | $Mr1$           |
|         |                   | materiální část dna            | $S_{mr2}$ | $Mr2$           |

Tabulka 2 - funkční parametry[2]

**$S_k$**  – parametr vycházející z rozdílu výšek mezi 0% a 100% poměru plochy materiálu na ekvivalentní křivce. Konkrétně hodnota vytvořena odečtením minimální od maximální výšky na jádře povrchu.

**$S_{pk}$ ,  $S_{vk}$**  – reprezentují střední výšku vrcholů a den na jádře povrchu.

**$S_{mr1}$ ,  $S_{mr2}$**  – reprezentují procento povrchu na úroňové křižovatce maxima jádra povrchu a křivky poměru plochy materiálu, a procento povrchu na úroňové křižovatce minima jádra povrchu a křivky poměru plochy materiálu.



## 5. Měření drsnosti povrchu

V současné době můžeme metody měření povrchu rozdělit na dva typy, kontaktní a bezkontaktní měřicí metody. Nejběžnější kontaktní metoda je měřena pomocí stylus profilometru, která nejen že vypočítá hodnoty povrchu, ale také dokáže zaznamenávat obrysy povrchu. Nicméně tato metoda není vhodná pro obrobky, vystavené vysoké teplotě, protože je pak měření pomalé, méně přesné a způsobuje ztráty na obrobku. V porovnání s tímto přístupem, bezkontaktní měřicí metody zaručují malé ztráty, velkou teplotní odolnost a vysokou účinnost. Výzkum provedený na základě optických měření a počítačovém zobrazení je velice užíváno při bezkontaktních metodách měření, které využívají prvků optické interference, rozptylu světla a měření skvrn. [9]

Pokud měření nemusí být tolik přesné a má být rychlé, existují ještě vedlejší metody měření - dotyková a vizuální metoda pomocí lidských smyslů, jako je zrak a hmat a pomocí sbírky porovnávacích destiček. Je to nejzákladnější metoda měření drsnosti povrchu

### 5.1 Vizuální a dotyková metoda pomocí porovnávacích destiček

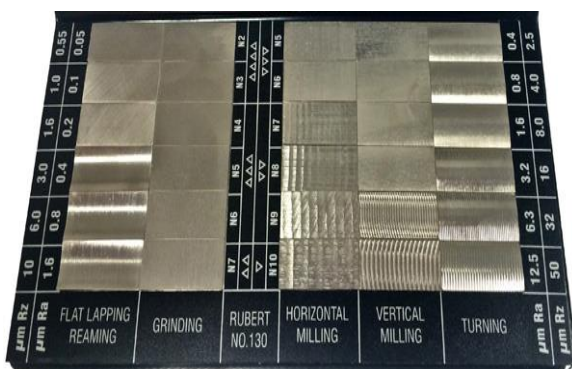
Základní metoda měření drsnosti povrchu je pomocí porovnávacích destiček. Tyto destičky obsahují určitý rozsah kovových nebo kompozitních materiálů s rozlišnými drsnostmi povrchu,

Jednotlivé povrchy výrobků nebo komponent mohou být porovnávány s destičkami buď vizuálně, nebo dotykem. Tato metoda měření je vysoce subjektivní. Používáním této metody je nemožné stanovit přesnou celkovou hodnotu drsnosti povrchu.

#### Kompozitní set Rubert 130

Set obsahující tři sady porovnávacích destičky, pokrývající 6 běžných obráběcích metod (6 soustružených, 6 koncově frézovaných, 6 horizontálně frézovaných, 6 povrchových, 3 lapované, 3 vystružené / vrtané) (viz obr. 5). Štítek vedle destičky vždy udává hodnoty parametru  $Ra$  každého vzorku v metrických a císařských jednotkách, ale i v číslech stupňů drsnosti, N12 – N1. tyto stupně korespondují s nominálními  $Ra$  hodnotami. N12 odpovídá hodnotě kolem  $50 \mu m$  a N1 odpovídá  $0,025 \mu m$ . Toto značení je typické pro evropské státy a dále například Japonsko a Rusko. V některých zemích, jako například v USA, jsou tyto hodnoty obráceny a N1 odpovídá  $50 \mu m$  a N12,  $0,025 \mu m$ . [9]

Vysoké hodnoty N značí u většiny států drsný povrch a nízké hladký povrch.



Obrázek 5 - porovnávací set rubert 130[20]

| N   | μm    |
|-----|-------|
| N1  | 0,025 |
| N2  | 0,05  |
| N3  | 0,1   |
| N4  | 0,2   |
| N5  | 0,4   |
| N6  | 0,8   |
| N7  | 1,6   |
| N8  | 3,2   |
| N9  | 6,3   |
| N10 | 12,5  |
| N11 | 25    |
| N12 | 50    |

Tabulka 3 - hodnoty N většiny států[9]

## 5.2 Měřicí zařízení

### Kontaktní metoda stylus

Přístroj se skládá z dotykového stylusu, který se pohybuje přes testovaný povrch ve směru povrchu (osy X) a ze snímače, který je převodníkem pohybů hrotu ve směru souřadnice Z. Data jsou převáděna do použitelného elektronického signálu. Tento signál je pak pomocí softwaru zpracován, aby graficky znázornil hodnoty v jednotlivých bodech povrchu. [9]

Výstupní data jsou uvedena v mřížce dané krokem s pevnou vzdáleností ve směru souřadnice X. Jednotlivé přístroje mají různé vzdálenosti mezi datovými body.[9]

Dalším způsobem sběru datových bodů je využití motoru pohánějícího pojezdovou jednotku. Tato metoda zahrnuje určitou formu polohové zpětné vazby od motoru. Vzhledem k tomu, že je známa rychlost motoru, lze určit polohu snímače v nastaveném časovém období, během měření, které určuje vzdálenost datového bodu. V tomto případě se spoléhá na to, že otáčky motoru jsou konstantní, aby poskytly přesné vzdálenosti mezi body (proto je nutno tyto otáčky před měřením i v průběhu měření kontrolovat). Přístroje používající pevnou mřížku, budou vždy poskytovat konstantní odstup datových bodů. [9]

## Vývoj stylus metody

Stylus metoda funguje už od prvních přístrojů z dvacátých let 20. století na stejném principu. Hlavní vývoj spočívá zejména v digitalizaci výsledků a zvětšení přesnosti výsledků použitím modernějších převaděčů. V tabulkách 4 a 5 jsou porovnány vlastnosti starých a nových přístrojů.

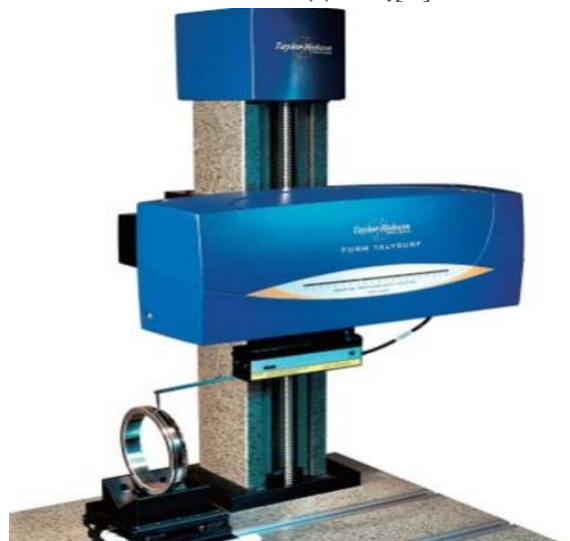
Obrázek 7 - starý přístroj[9]



- Pohybuje se ve směru osy X.
- Stylus se pohybuje ve směru Z
- Zdvih se vztažným bodem smyku.
- Manuální sloupec.
- Elektronika ventilu pro pohon pojezdu.
- Analogový měřicí signál pro zvětšení/analýzu.
- Měřič pro integraci signálu a displeje CLA.

Tabulka 4 vlastnosti nového přístroje[9]

Obrázek 6 - nový přístroj[9]



- Pohybuje se ve směru X.
- Stylus se pohybuje ve směru Z + volitelný zdvih.
- Interní vztažný bod.
- Motorizovaný sloup + volitelný náklon.
- Ovládání joystickem.
- Digitální zpracování.
- Plně programovatelné.

Tabulka 5 - vlastnosti nového přístroje[9]

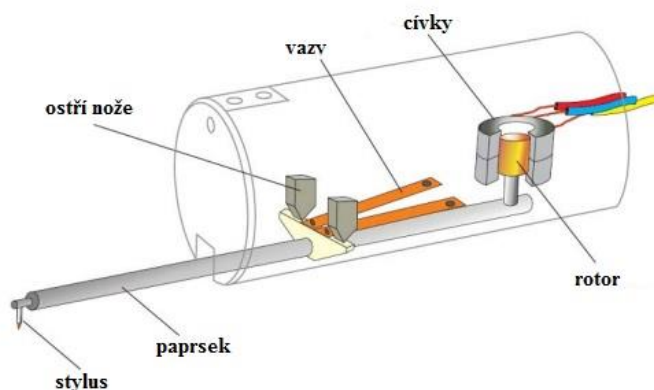
## Rozlišení kontaktních zařízení

Všechna zařízení využívající kontaktní metodu, fungují na stejném principu (pojezdem hrotu po povrchu). Jejich funkce a vlastnosti ovšem můžeme měnit pomocí použití různých typů převodníků, anebo typu hrotu.

Typy převodníků: indukční převodník, Piezoelektrický převodník, interferometrický převodník fázové mřížky.

## Indukční převodník

Indukční převodník slouží k převodu signálu vycházejícího z hrotu na digitální formu hodnot pomocí cívek a rotoru. [9]

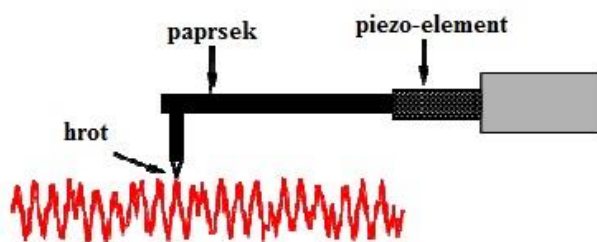


Obrázek 8 - indukční převodník[9]

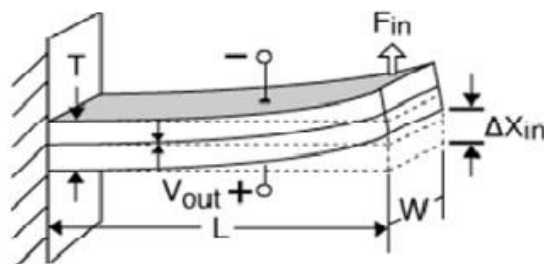
Dotykový hrot je umístěn na jednom konci nosníku, který se otáčí na hranách nožů. Druhý konec nosníku je tvořen rotorem s feritovým uzávěrem, který se pohybuje uvnitř dvou cívek, což způsobuje změnu relativní indukčnosti. [9]

Když se hrot pohybuje dolů, feritová klapka se zvedne, při stoupání hrotů se feritová klapka sníží. Na konci cívky převodníku jsou dodávány 2 signály při 10kHz v protifázi. Zpětný signál, od středového kohoutu cívky je demodulován tak, aby reprezentoval jakýkoliv pohyb hrotu. Jeli klapka ve střední poloze, signál návratu je nulový. Hrot zůstává v kontaktu s povrchem celou dobu pomocí hran nožů a jemné pružiny, která působí na nosník. [9]

## Piezoelektrický převodník



Obrázek 10 - piezoelektrický převodník[9]

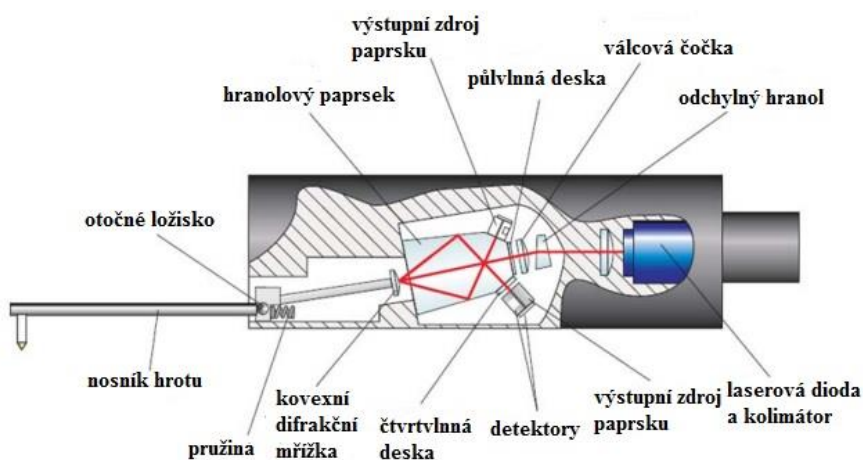


Obrázek 9 - piezoelektrický krystalový prvek[9]

Piezoelektrický převodník obsahuje Piezoelektrický krystalový prvek, který má schopnost vyvíjet napětí na elektrodách na čelních plochách prvků, při deformaci krystalu. Pohybem hrotu se vytváří ohybový moment a následný napěťový výstup se převádí do Z souřadnice. Nízkofrekvenční odezva snímače ho činí nevhodným pro FORM měření (nízká frekvence a dlouhá vlnová délka). [9]

## Interferometrický převodník fázové mřížky

Na této konkrétní části měřidla je zakřivená fázová mřížka připevněna ke konci otočného ramena hroty. Pohyblivou částí interferometru je již zmíněné rameno.



Obrázek 11 - interferometrická převodník fázové mřížky[9]

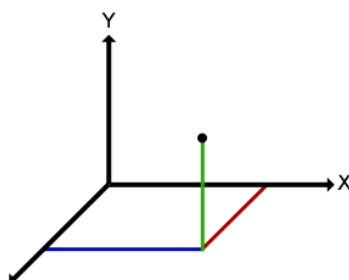
Vlnová délka mřížky poskytuje referenční hodnotu pro měření. Čtyři fotodiody detekují interferenční okrajový vzor vytvořený pohybem hroty, který interpoluje výstupní signál. Tento typ převodníku poskytuje značný poměr rozsahu a rozlišení[9]

## 5.3 Optické měřící metody

V mnoha výrobních firmách byla zjištěna větší poptávka po automatických systémech kontrolujících drsnost a tvar povrchu, zejména při dokončovacích operacích. Poptávka byla především po rychlých měřeních, při kterých by tyto přístroje měly být málo citlivé na vibrace, prašnost a další atributy, které by mohly působit problémy při měření. Kontaktní metody už nebyly schopné plnit všechny tyto požadavky poptávky, a proto začala vzrůstat obliba bezkontaktní měřící metody.

### Souřadnice XYZ

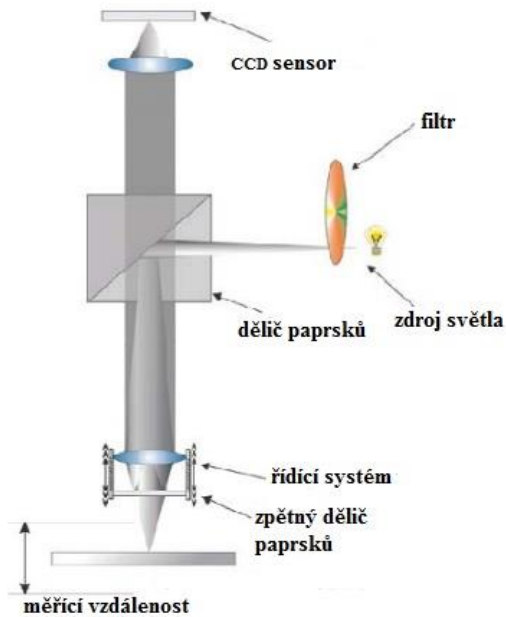
Při zpracování dat do 3D, je důležité si specifikovat osy XYZ, které jsou vidět na obrázku 12. Tyto souřadnice mohou být u každého měření různá. Nejvyužívanější značení: Osa X je šířka, osa Y výška a Z hloubka snímku.



Obrázek 12 - souřadnice XYZ[21]

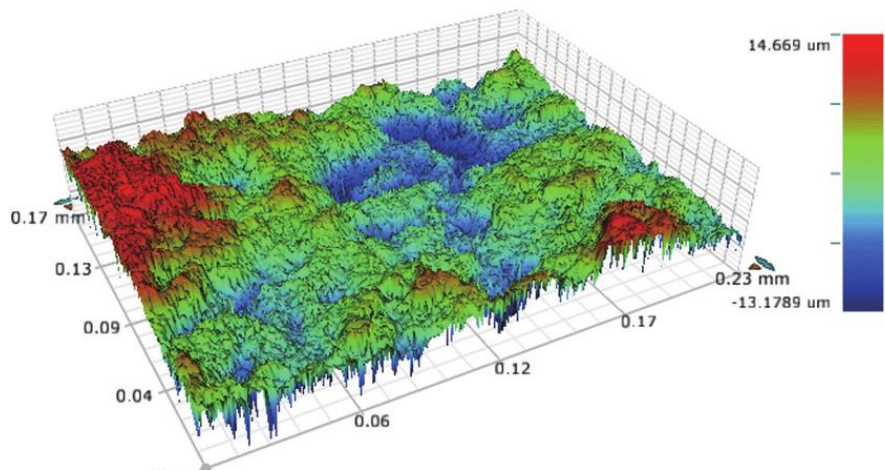
## Princip optických měřidel

Optické měřicí přístroje fungují na principu rozložení bílého světla na různé vlnové délky (princip CLA – Chromatic Length Aberration). V každém bodě povrchu je zaostřena pouze jedna vlnová délka. Světlo odražené z povrchu prochází otvorem, který propustí pouze světlo zaostřené vlnové délky. Poté je světlo vychýleno na maticový sensor (CCD sensor), kde má každý bod svou přidělenou prostorovou polohu. Tato poloha je následně počítačově zpracována a vyhodnocena. celá tato soustava je vidět na obrázku 13. [6]



Obrázek 13 - složení optického měřidla[9]

Stejně důležitý jako hardware je software, který zpracovává data, naměřená parametrickým měřidlem drsnosti. Tato data jsou zpracovávána do 3D souřadnicového systému XYZ buď jednobarevně, nebo barevně, například podle jednotlivých zaostřených vlnových délek jako na obrázku 14. Výhodou tohoto měření je, že je možno vybrat z měřené plochy libovolný průřez, promítnout jej ve 2D, kde je jednodušší určit jednotlivé parametry. [6]



Obrázek 14 - 3D snímek povrchu[22]

## 5.4 Přesnost měření

Jako při každém měření je nutno určit přesnost měření, chyby měření a pravidla vyhodnocení závěrů. Protože absolutně přesné měření neexistuje

Příčiny vzniku chyb při měření jsou různé, patří mezi ně: [18]

**Chyba v měřidle či měřicím systému** jako je nedokonalost a nespolehlivost přístroje.

**Použitá měřicí metoda** – špatná metoda způsobená například nevhodnými přístroji.

**Špatné podmínky měření** jako například teplota, tlak apod. Tyto chyby lze eliminovat i zvolením jiné metody či jiného měřidla.

**Chyby způsobené lidským faktorem**, mezi které patří nedostatečná zručnost, zkušenost, rozlišovací schopnost apod. [18]

### Dělení chyb

Dle časové závislosti – statické / dynamické

Dle možnosti vyloučení – odstranitelné / neodstranitelné

Dle způsobu výskytu – hrubé / systematické / náhodné (nahodilé)

### *Hrubé chyby*

Příčiny hrubých chyb jsou nesprávné odečtení údajů, nesprávný způsob zpracování dat, vada přístroje, nebo nesprávná manipulace s měřidlem. [18]

Hrubé chyby jsou chyby, které dělají výsledek měření nepoužitelným a musí se vyloučit ze souboru hodnot. V měření by se nemělo pokračovat, dokud nejsou příčiny vzniku chyb odstraněny. [18]

Při testování hrubých chyb měření postupujeme

1. Výpočtem střední hodnoty a výběrové směrodatné odchylky.
2. Výpočtem normovaných hodnot  $H_2, H_n$ .
3. Určením mezní hodnoty  $H$  pro předem stanovenou pravděpodobnost  $P$  a počet měření  $N$ .
4. Porovnáním podmínek  $H_2 < H$  a  $H_n > H$  s jednotlivými výsledky měření.
5. Při nesplnění podmínek, hodnotu, která je zatížena hrubou chybou, vyloučíme. [18]

## *Systematické chyby*

Vznikají z příčin, které se projevují pořád a jednoznačně. Dají se zjistit změnou měřidla[18]

Dělíme je podle poznatelnosti na:

- známé (mají konkrétní znaménko a lze je použít pro korekci)
- neznámé (nemají konkrétní znaménko, považují se za chyby nahodilé)

a podle příčin vzniku:

- chyby měřidla.
- chyby měřící metody.
- chyby osobní.
- chyby způsobené vlivem prostředí. [18]

## *Náhodné chyby*

Náhodné chyby jsou způsobeny příčinami neznámého charakteru. Téměř každé měření obsahuje náhodné chyby, které při výpočtu způsobují větší rozptyl výsledků. Při opakování měření se mohou být tyto chyby eliminovány. [18]

## *Výpočty chyby*

Absolutní chyba – rozdíl mezi naměřenou hodnotou  $M$  a skutečnou hodnotou  $S$  měřené veličiny. Skutečnou hodnotu zjišťujeme lepším měřením, teoretickým výpočtem nebo aritmetickým průměrem z většího počtu měření  $\Delta = M - S$ [18]

Relativní (poměrná) chyba -  $\delta = \Delta / N \cdot 100$ [18]

## *Vyhodnocení měření drsnosti*

### *Pravidlo maxima*

Povrch odpovídá maximálním požadavkům, pokud žádná z naměřených hodnot na definovaném povrchu nepřesáhne předepsanou horní mezní hodnotu. [6]

### *Pravidlo 16%*

Povrch je považován za přijatelný, pokud maximálně 16 % všech naměřených hodnot parametru na hodnoceném povrchu přesáhne horní mezní hodnotu. Toto pravidlo je standardní a nepředepisuje se. [6]



## 6. Inovace a inovativní metody měření parametrickými měřidly

Ačkoliv parametrické měřicí přístroje v dnešní době využívají stejného principu odrazu světla od povrchu, stále jsou vyvíjeny nové, nebo jsou vylepšovány staré metody měření a metody zpracování výsledků pomocí různých nových softwarů a výpočtů. Díky tomu jsou redukovány invazivní vlivy na měření a zvyšuje se přesnost naměřených hodnot a zpracovaných výsledků.

Dále jsou tu také inovativní metody pro předpověď a matematický odhad změny povrchu v průběhu opotřebení, jak při běžném používání, tak při výrobních procesech. Protože měření, označování a vyhodnocování jednotlivých měření v každé fázi procesu bylo časově i finančně náročné. Tyto metody byly zjišťovány na základě algoritmů a korelačních koeficientů z naměřených skutečných dat a ze simulovaných dat pro zvětšení přesnosti odhadu. Věda zabývající se tímto oborem se nazývá tribologie.

Tyto metody se snaží zaměřovat na určité druhy výrobků a na různé druhy povrchů tak, aby efektivita měření byla co nejvyšší. Ne všechny nově objevené metody se dají využít univerzálně pro všechny povrchy.

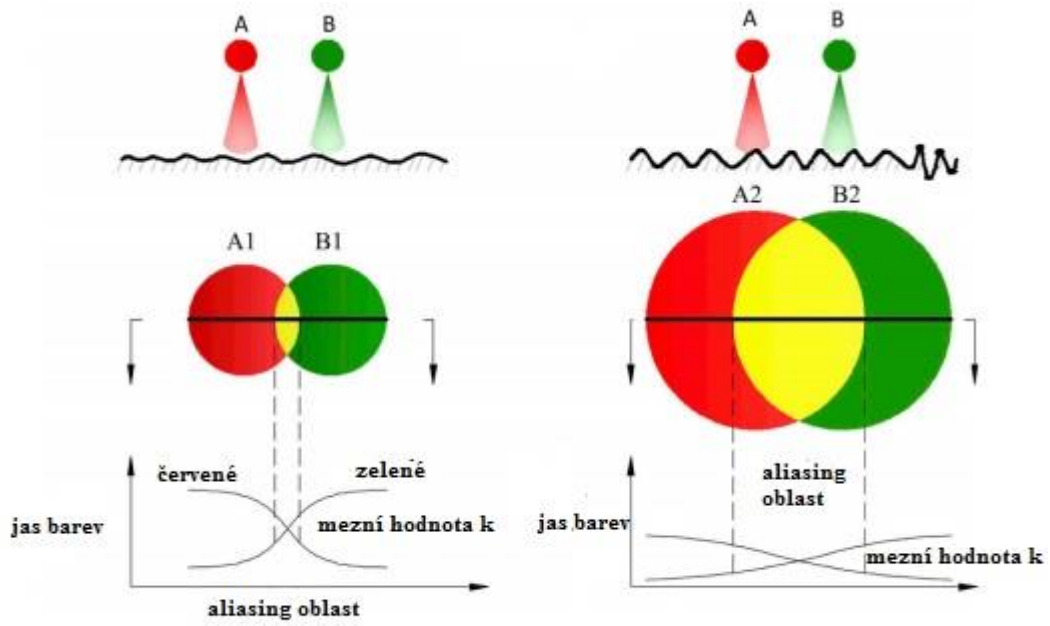
### 6.1 Metoda založená na červenozeleném aliasingu.

#### Popis metody

Metoda využívá simulovaných dat a indexu aliasingu oblasti pro lepší kalkulaci výsledků v jednotlivých fázích výroby nebo opotřebení. V reakci na špatnou schopnost zobecnění prediktivního modelu způsobeného nedostatečnými testovacími daty byla navržena nová metoda. Podle učení teorie indukčního přenosu může tato metoda zlepšit přesnost vizuálního měření drsnosti povrchu broušením, jak ze skutečných, tak ze simulovaných dat. Metoda se používá zejména u broušených materiálů. Výsledky z experimentálního výzkumu této metody dokazují, že metoda je schopna si udržet nízký poměr relativní chyby -> průměrně 12.57% i s nedostatečnými testovacími daty. [13]

#### Teoretická analýza indexu aliasingu ARA

Podle článku [16], je známo, že i malý předmět může být považován za bodový světelný zdroj, když na něj svítí světlo. Poté co byl světelný zdroj odražen drsným povrchem, plocha virtuálního bodu se mění na základě různé drsnosti odrazného povrchu. Pokud se drsnost povrchu zvýší, bude plocha větší a jas tudíž nižší. Předpokládá se, že existují 2 bodové zdroje světla, které jsou červené a zelené. Virtuální obrazy A a B odražené povrchem s různou drsností tvoří ideální kružnice, jak je znázorněno na obrázku 15. [13]



Obrázek 15 - červenozelený aliasing [13]

Na obrázku 15, se předpokládá, že energie zdrojů A a B jsou značeny  $E_A$  a  $E_B$  v tomto pořadí.  $A1$ ,  $A2$ ,  $B1$  a  $B2$  jsou virtuální obrazy A a B bez ohledu na ztrátu energie. Poloměry virtuálních obrazů  $A1$ ,  $A2$ ,  $B1$  a  $B2$  jsou označeny  $r_{A1}$ ,  $r_{B1}$ ,  $r_{A2}$  a  $r_{B2}$  v tomto pořadí, kde  $r_{A1} < r_{A2}$  a  $r_{B1} < r_{B2}$  a aliasing plocha je na  $A1 \cap B1$ , a dále  $A2 \cap B2$ . hodnota RGB jednoho pixelu je  $(R_{A1(i,j)}, G_{A1(i,j)}, B_{A1(i,j)})$ ,  $(R_{A2(i,j)}, G_{A2(i,j)}, B_{A2(i,j)})$ . Tady  $B_{A1(i,j)} = B_{A2(i,j)} \approx 0$ ,  $L_{(A2 \cap B2)}$  reprezentuje jas aliasingové plochy v obrázku 15. Po určení jednotlivých značení můžeme získat tyto vztahy:

$$R_{A1(i,j)} \propto \frac{E_A}{r_{A1}^2} \geq R_{A2(i,j)} \propto \frac{E_A}{r_{A2}^2} \quad (3.1)$$

$$R_{B1(i,j)} \propto \frac{E_B}{r_{B1}^2} \geq R_{B2(i,j)} \propto \frac{E_B}{r_{B2}^2} \quad (3.2)$$

$$G_{A1(i,j)} = R_{B1(i,j)} \approx 0 \quad (3.3)$$

$$L_{(A2 \cap B2)(i,j)} = R_{A2(i,j)} + G_{B2(i,j)} \propto \frac{E_A}{r_{A2}^2} + \frac{E_B}{r_{A2}^2} \quad (3.4)$$

$$|R_{A1(i,j)} - G_{A1(i,j)}| \geq |R_{A2(i,j)} - G_{A2(i,j)}| \quad (3.5)$$

$$|G_{B1(i,j)} - R_{B1(i,j)}| \geq |G_{B2(i,j)} - R_{B2(i,j)}| \quad (3.6)$$

$$\sum_{A1} I(|R_{A1(i,j)} - G_{A1(i,j)}| \leq k) \leq \sum_{A2} I(|R_{A2(i,j)} - G_{A2(i,j)}| \leq k) \quad (3.7)$$

$$\sum_{B1} I(|R_{B1(i,j)} - G_{B1(i,j)}| \leq k) \leq \sum_{B2} I(|R_{B2(i,j)} - G_{B2(i,j)}| \leq k) \quad (3.8)$$

Podle (3.5) a (3.6) je možno zjistit, že po odrazu světla na velkém povrchu drsnosti je absolutní rozdíl červené a zelené komponenty v pixelu na obraze malý. Ve článku [16], je index barevného rozdílu navržen v souladu s těmito vztahy. Pak je model předpovědi hrubosti, založený na indexu barevného rozdílu, stanoven vektorovým podpůrným strojem (SVM) a jsou získány uspokojivé experimentální výsledky. [13]

Při transferovém učení by mělo být nejprve určeno, které znalosti jsou sdíleny v různých měřeních, protože pouze tyto znalosti mohou být využity ke zlepšení výkonnosti a efektivity predikčního modelu v cílovém měření. Na pozadí stroje pro měření drsnosti, založeného na optickém měření drsnosti povrchu, se zvyšují červené a zelené aliasingové efekty jak skutečného, tak simulovaného obrazu s rostoucí drsností plochy na kterém se odráží světlo. Tyto sdílené znalosti tak mohou být přeneseny ze simulovaných dat, pro zlepšení výkonu cílového modelu, pokud jsou skutečná testovací data nedostatečná. [13]

Index rozdílu barev navržen v článku 16. Není určený pouze červeným a zeleným spektrem aliasing obrazu, ale také normálním světlem odrážejícím se od povrchu, které nebude při každém měření stejné, proto není možno využívat tuto metodu se stejnými hodnotami pro dvě různá měření. V důsledku toho určujeme index aliasingové oblasti (*ARA*), který závisí pouze na červeném a zeleném aliasingu a má silnou korelaci s drsností povrchu. Lze jej získat ze vzorců (3.7) a (3.8). Kde  $I(\cdot)$ , značí indikační funkci. Když absolutní hodnota  $R_{(i,j)} - G_{(i,j)} \leq k$ ,  $I = 1$ , v jiném případě  $I=0$ ,  $0 \leq K \leq 255$  je předdefinovaná mezní hodnota. [13]

Sběrná oblast pixelů, jejichž absolutní hodnota rozdílu barev mezi červenou a zelenou složkou není vyšší než mezní hodnota  $K$ , je definována jako aliasing oblast, jak je znázorněno v obrázku 15. Pak lze získat index plochy aliasing oblasti počítáním množství pixelů v oblasti: [13]

$$ARA = \sum_i^M \sum_j^N I(|R_{(i,j)} - G_{(i,j)}| \leq k) \quad (3.9)$$

Ze vzorců (3.7) a (3.8) můžeme sledovat, že *ARA* je minimalizován, když je drsnost odrazového povrchu nejmenší a zvyšuje se při drsnějším povrchu. [13]

## Výsledky porovnání s ostatními modelovacími metodami

Na základě zkoumání metody červenozeleného aliasingu, byl proveden experiment, kde se porovnávala tato nová metoda se třemi dalšími modelovacími metodami. Nejprve byly porovnávány pomocí korelačního koeficientu  $R^2$ , a dál se předpovědi těchto metod porovnávaly se skutečnými výsledky naměřenými stylus metodou, a relativní chybou, které se tyto metody dopustily.

Porovnání bylo provedeno na třech souborech zkušebních vzorků, jednoho datového setu složeného z 50 vzorků, který spadá do simulačního měření a z dvou setů skutečných měření, tréninkový set (8 vzorků) a testovací set (32 vzorků) [13]

### *Ostatní metody*

#### Metoda *Ga*

Metoda založena na principu střední hodnoty šedých stupňů povrchového snímku. Popsána v referenci [14]. Je to hlavní index prostorově orientovaného měření.

Hlavní vzorec pro výpočet tohoto parametru:

$$Ga = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |I(i, j) - I_m| \quad (3.10)$$

Kde

$$I_m = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I(i, j) \quad (3.11)$$

#### Metoda *F1*

Metoda založena na hlavní vrcholové frekvenci. Je to hlavní metoda frekvenčního hodnocení měření šedých snímků povrchu. Řídí se učením v referenci [15]

Hlavní vzorec pro výpočet tohoto parametru:

$$F1 = (u_1^2 + v_1^2)^{1/2}$$

Kde

$(u_1, v_1)$  jsou hlavní maximální vrcholové souřadnice vrcholového spektra. To je:

$$p(u_1, v_1) = \max[p(u, v) \forall (u, v) \neq (0, 0)]$$

## Metoda CD

Metoda založena na stejném principu červenozeleného spektra jako index ARA, který dosahuje lepších výsledků než metody založené na šedých snímcích.[13]

Hlavní vzorec pro výpočet tohoto parametru:

$$CD = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |R_{(i,j)} - G_{(i,j)}| \quad (3.12)$$

## Porovnání na základě korelace s povrchem

Determinační koeficient  $R^2$  určuje korelaci mezi povrchy a jednotlivými porovnávanými indexy. Jednotlivé hodnoty byly získány z [13].

|       | Ga     | CD     | F1     | Ara ( $k = 25$ ) |
|-------|--------|--------|--------|------------------|
| $R^2$ | 0,9134 | 0,9241 | 0,8881 | 0,9669           |

Tabulka 6 - hodnota korelačního koeficientu[13]

V Tabulce lze sledovat, že modelovací indexy založené na šedých snímcích mají slabší efekt při predikování povrchu, než snímky s indexy barevného světla. Korelace nemůže být sama o sobě brána jako závěr, určující, která metoda je lepší a která horší.

## Porovnání na základě naměřených výsledků a relativní chyby.

Měření skutečných výsledků pro kontrolu, bylo provedeno kontaktním měřicím přístrojem Form Talysurf PGI 800 od firmy Taylor and Hobson, který využívá stylus metodu. Tato metoda byla využita celkem na 8 testovacích vzorcích z tréninkového setu. [13]

| #     | stylus<br>hodnota | Ga        |          | CD        |          | F1        |          | Ara       |          |
|-------|-------------------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
|       |                   | předpověď | $\delta$ | předpověď | $\delta$ | předpověď | $\delta$ | předpověď | $\delta$ |
| 1     | 0.0958            | 0.1315    | 37.31    | 0.0997    | 4.08     | 0.1148    | 19.85    | 0.1145    | 19.49    |
| 2     | 0.1708            | 0.1740    | 1.89     | 0.1636    | 4.24     | 0.1952    | 14.26    | 0.1850    | 8.33     |
| 3     | 0.2604            | 0.2646    | 1.61     | 0.2939    | 12.87    | 0.2504    | 3.84     | 0.2355    | 9.57     |
| 4     | 0.2789            | 0.2212    | 20.69    | 0.2663    | 4.53     | 0.2229    | 20.10    | 0.2752    | 1.31     |
| 5     | 0.3360            | 0.4020    | 19.64    | 0.3581    | 6.57     | 0.3471    | 3.30     | 0.3599    | 7.12     |
| 6     | 0.3789            | 0.3047    | 19.58    | 0.3245    | 14.36    | 0.3390    | 10.53    | 0.3289    | 13.20    |
| 7     | 0.4261            | 0.3462    | 18.75    | 0.3605    | 15.39    | 0.4493    | 5.46     | 0.3958    | 7.11     |
| 8     | 0.5111            | 0.4150    | 18.80    | 0.4040    | 20.96    | 0.4371    | 14.48    | 0.5057    | 1.06     |
| Aver  |                   |           | 17.28    |           | 10.37    |           | 11.48    |           | 8.40     |
| Stdev |                   |           | 11.41    |           | 6.38     |           | 6.80     |           | 6.03     |

Tabulka 7 - porovnání hodnot předpovědi se skutečností[13]

Na základě naměřených hodnot  $Ra$  byla vypočtena relativní chyba u každého měření a průměrná relativní chyba jednotlivých předpovídajících metod. Z těchto výsledků je patrné, že metody založené na využití červenozelených světel mají nižší průměrnou relativní chybu než metody využívající šedivé snímky.

## 6.2 Metoda měření vláknovým optickým senzorem

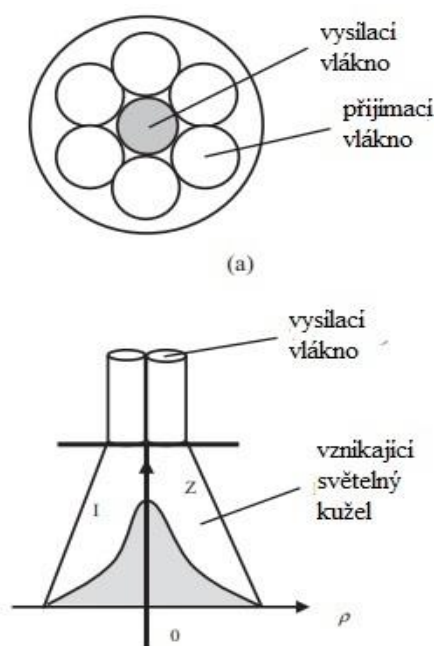
### Popis metody

Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly díky vysokým požadavkům na přesné měření drsnosti povrchu obráběných výrobků v optickém inženýrství, byla vyvinuta nová metoda měření založená na laserovém rozptylu. Přístroj pracující na základě této metody využívá snímání povrchu pomocí optických vláken. Tento přístroj se nazývá optický senzor s rozšířenou vlnovou délkou. Drsnost povrchu se extrahuje z poměru intenzity rozptylu světla od hrubého povrchu pomocí různých vlnových délek. Výsledky ukazují, že poměr intenzity laserového rozptylu má pozitivní vztah s drsností povrchu. [11]

### Teoretický základ měření

Metoda předpokládá, že náhodné rozdělení je znázorněno na průběhu Gaussovy funkce

Metoda využívá technologie snímání povrchu optickými vlákny pro zkoumání jak samotné drsnosti povrchu, tak i jeho hlavních vlastností. Sensor je navržen tak, že, jeho čelní struktura snímací sondy se skládá z vysílacího vlákna a šesti přijímacích vláken, které jsou rovnoměrně, natěsno rozmístěny kolem vysílacího vlákna, jak je znázorněno na obrázku 16. Za podmínky, že přijímací vlákno a přenášející vlákna jsou těsně uspořádána, průměr svazku vláken se nezvyšuje a maximální počet vláken je šest. Konstrukce může zajistit, aby přijímací vlákna snímala odražené světlo v co největším rozsahu. Dále tato struktura zaručuje jednoduchý, spolehlivý a malý rozměr. [11]



Obrázek 16 - struktura čela sondy [11]

Funkce modulace intenzity svazku se považuje za součet funkcí modulace intenzity šesti dvojic jednotlivých vláken. Efektivní plocha jednoho páru vláken je definována takto: [11]

$$S_r = \begin{cases} 0 \rightarrow \text{když } d \ll d_0 \\ \varphi q^2 + \arcsin\left(\frac{q \sin \varphi}{r_2}\right) * r_2^2 - pq \sin \varphi \rightarrow \text{když } d_0 < d \ll d_1 \\ \varphi q^2 + \left[\pi - \arcsin\left(\frac{q \sin \varphi}{r_2}\right)\right] * r_2^2 - pq \sin \varphi \rightarrow \text{když } d_1 < d < d_2 \\ \pi r_2^2 \rightarrow \text{když } d \gg d_2 \end{cases} \quad (3.13)$$

Kde

$r_1$  je poloměr jádra vysílacího vlákna.

$r_2$  je poloměr jádra přijímacího vlákna.

$a$  je vzdálenost dvou optických vláken.

$d$  je vzdálenost mezi optickými vlákny a měřeným vzorkem.

Axiální vzdálenost vysílacího a přijímacího vlákna je  $p = r_1 + a + r_2$ . Poloměr světelného bodu odraženého světla na čelní straně vlákna je  $q = r_1 + 2d \tan \theta_{N1}$ ,  $\theta_{N1} = \arcsin NA_1$ ,  $NA_1$  je numerická velikost optického otvoru vysílacího vlákna. Parametry  $d_0$ ,  $d_1$ ,  $d_2$  a  $\varphi$  mohou být vyjádřeny jako: [11]

$$d_0 = \frac{p - r_1 - r_2}{2 \tan \theta_{N1}} \quad (3.14)$$

$$d_1 = \frac{\sqrt{p^2 + r_2^2} - r_1}{2 \tan \theta_{N1}} \quad (3.15)$$

$$d_2 = \frac{p - r_1 + r_2}{2 \tan \theta_{N1}} \quad (3.16)$$

$$\varphi = \arccos\left(\frac{p^2 + q^2 - r_2^2}{2pq}\right) \quad (3.17)$$

V této metodě je vysílací vlákno jednovlnným vláknem, jehož rozložení světla je podle Gaussovy funkce, takže rozložení světla bude také podle Gaussovy funkce. Za předpokladu, že reflexní plocha je ideálním zrcadlem, může být odražená intenzita čelní plochy přijímacího vlákna ve vzdálenosti  $d$  vnímána jako intenzita, kterou virtuální vysílací vlákno vyzařuje ve vzdálenosti  $2d$  a může být matematicky vyjádřeno jako: [11]

$$I_r(\rho, d) = I(\rho, 2d) = \frac{P_t}{q^2(2d)} \exp\left[-\frac{\rho^2}{q^2(2d)}\right] \quad (3.18)$$

Kde  $P_t$  je síla vysílacího vlákna,  $q(2d)$  je poloměr světelného bodu odcházejícího paprsku ve vzdálenosti  $2d$ .  $\rho$  je vzdálenost mezi pozorovacím bodem a bodovým středem. Výkon přijímacího vlákna lze vypočítat vztahem: [11]

$$P_r(\rho, d) = \iint I_r(\rho, d) ds \iint \frac{P_t}{\pi q^2(2d)} \times \exp\left[-\frac{\rho^2}{q^2(2d)}\right] ds \quad (3.19)$$

Za předpokladu, že intenzita ve středu přijímacího vlákna je průměrná intenzita čelní plochy vlákna, pak lze změnit vzorec (3.19) za následující vzorec (3.20). [11]

$$P_r(\rho, d) = \iint I_r(\rho, d) ds = \iint \frac{P_t}{\pi q^2(2d)} \exp\left[-\frac{\rho^2}{q^2(2d)}\right] ds \quad (3.20)$$

Dosažením vzorce (3.13) do vzorce (3.20) lze získat funkci modulace intenzity jednoho páru vláken a vzniká: [11]

$$= \begin{cases} 0 \rightarrow \text{když } d \ll d_0 \\ \int_b^c \frac{1}{\pi q^2(2d)} \exp\left[\frac{\rho^2}{q^2(2d)}\right] * 2 \arccos\left[\frac{\rho^2 + (p - r_2)^2 + 2r_2(p - r_2)}{r_2(p - r_2 + \rho)}\right] d\rho \rightarrow \text{když } d_0 < d < d_2 \\ \frac{r_2^2}{q(2d)^2} \exp\left[-\frac{\rho^2}{q^2(2d)}\right] \rightarrow \text{když } d \gg d_2 \end{cases} \quad (3.21)$$

Kde parametry  $b = p - r_2$ ,  $c = r_1 + 2d \tan(\theta_{N1})$ .

Jak lze vidět ve vzorci (3.21), funkce modulace intenzity ( $M$ ) souvisí s parametry struktury dvojice vláken a výkonových parametrů optického vlákna vzdálenosti  $d$ . Když je zvolena axiální vzdálenost dvojice vláken a samostatného optického vlákna, závisí ( $M$ ) především na vzdálenosti  $d$ . Když  $NA_2 \gg NA_1$  lze zjednodušit vzorec (3.21) na [11]

$$M_{\text{páru}} = f(r_1, r_2, NA_1, p, d) \quad (3.22)$$

kde  $NA_2$  je numerický velikost otvoru přijímacího vlákna. Funkce modulace intenzity svazku vláken je dáno: [11]

$$M_S = 6M_{\text{páru}}(r_1, r_2, NA_1, p, d) \quad (3.23)$$

Průměrová rozptylová síla hrubého povrchu je dána na základě Beckmanova modelu rozptylové geometrie z ref. [23]: [11]



$$P(\theta_i, \theta_s, \varphi_s) = \rho_s^2 e^{-g(\theta_i, \theta_s)} + D(\theta_i, \theta_s, \varphi_s) \quad (3.24)$$

Kde  $\rho_s$  je koeficient rozptylu za podmínky  $|\rho_s| \ll 1$ ,  $D$  je irelevantní složka způsobena rozšířeným rozptylem;  $g(\theta_i, \theta_s)$ , který řídí zrcadlově odraženou složku. Je vyjádřen: [11]

$$g(\theta_i, \theta_s) = \sigma^2 v_z^2(\theta_i, \theta_s) = \left[ -\frac{2\pi\sigma}{\lambda} (\cos\theta_i + \cos\theta_s) \right]^2 \quad (3.25)$$

A rozptylový koeficient je

$$\langle \rho_s \rangle = \rho_0 \exp \left[ -\frac{2\pi^2\sigma^2}{\lambda^2} (\cos\theta_i + \cos\theta_s)^2 \right] \quad (3.26)$$

Kde  $\rho_0$  je rozptylový koeficient hladkého povrchu,  $\theta_i, \theta_s$  jsou úhel dopadu a úhel rozptylu;  $r$  je střední kvadratická hodnota,  $k$  je vlnová délka dopadu. [11]

Když  $\theta_i = \theta_s$ , koeficient rozptylu a průměrný výkon jsou v zrcadlově odraženém směru. [11]

$$\langle \rho_{spec} \rangle = \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{4\pi\sigma}{\lambda} \cos\theta_i \right)^2 \right] \quad (3.27)$$

$$P_S = \rho_s^2 e^{-g(\theta_i, \theta_s)} \quad (3.28)$$

Když světlo dopadá kolmo na hrubý povrch tj.  $\theta_i = \theta_s = 0$  ze vztahů (3.25), (3.27) a (3.28), průměrný výkon v zrcadlově rozptýleném směru může být popsán jako: [11]

$$P_S = \exp \left[ -2 \left( \frac{4\pi\sigma}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (3.29)$$

Intenzita výstupu vláknového senzoru je:

$$I = I_0 * O_S * M_S = I_0 * M_S * \exp \left[ -2 \left( \frac{4\pi\sigma}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (3.30)$$

Kde  $I_0$  je intenzita dopadajícího světla

Vztah mezi intenzitou odrazu, drsností povrchu a pracovní vlnovou délkou je uveden v rovnicích (9) a (18). Kvůli nesystematické chybě označované jako  $\beta(\lambda)$ , přesnost je měření optickým sensorovým systémem velice ovlivněno. Tato nesystematická chyba může být výrazně snížena použitím více vlnových délek. [11]

Vícevlenný optický systém je navržen pro tuto metodu měření povrchových vlastností, na základě jednovlenného optického senzoru. Účinky interferenčních faktorů pro dvojité světelné zdroje jsou  $\beta(\lambda_1)$  a  $\beta(\lambda_2)$ . Při uvážení těchto poznatků lze vzorec (3.30) změnit na následující tvar. [11]

$$I_{\lambda_1} = O_{0-\lambda_1} * M_S * \exp \left[ -2 \left( \frac{4\pi}{\lambda_1} \sigma \right)^2 + \beta(\lambda_1) \right] \quad (3.31)$$

$$I_{\lambda_2} = O_{0-\lambda_2} * M_S * \exp \left[ -2 \left( \frac{4\pi}{\lambda_2} \sigma \right)^2 + \beta(\lambda_2) \right] \quad (3.32)$$

Vzhledem k použití stejných optických vláken, je předpokládáno, že tento druh vlivu chyby je stejný tj.  $\beta(\lambda_1) = \beta(\lambda_2)$ . Poměr odražené intenzity dvou vlnových délek je definován: [11]

$$\frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_2}} = \frac{O_{0-\lambda_1} \exp \left[ -2 \left( \frac{4\pi}{\lambda_1} \sigma \right)^2 + \beta(\lambda_1) \right]}{O_{0-\lambda_2} \exp \left[ -2 \left( \frac{4\pi}{\lambda_2} \sigma \right)^2 + \beta(\lambda_2) \right]} = \frac{I_{0-\lambda_1}}{I_{0-\lambda_2}} \exp \left[ 2 \left( \frac{4\pi}{\lambda_2} \sigma \right)^2 - 2 \left( \frac{4\pi}{\lambda_1} \sigma \right)^2 \right] \quad (3.33)$$

Kde  $\lambda_1$  a  $\lambda_2$  jsou pracující vlnové délky měření. Střední kvadratická hodnota  $\sigma$  je vypočítána:

$$\sigma^2 = \frac{1}{2} * \frac{1}{(4\pi)^2} * \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2}{(\lambda_1^2 - \lambda_2^2)} \ln \left[ \frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_2}} * \frac{I_{0-\lambda_2}}{I_{0-\lambda_1}} \right] \quad (3.34)$$

Kde  $I_{\lambda_1}$  a  $I_{\lambda_2}$  jsou odražené intenzity,  $I_{0-\lambda_1}$  a  $I_{0-\lambda_2}$  jsou intenzity incidentů ve dvou vlnových délkách. Povrchová drsnost  $R_a$  je dána: [11]

$$R_a = \frac{4}{5} \sigma \quad (3.35)$$

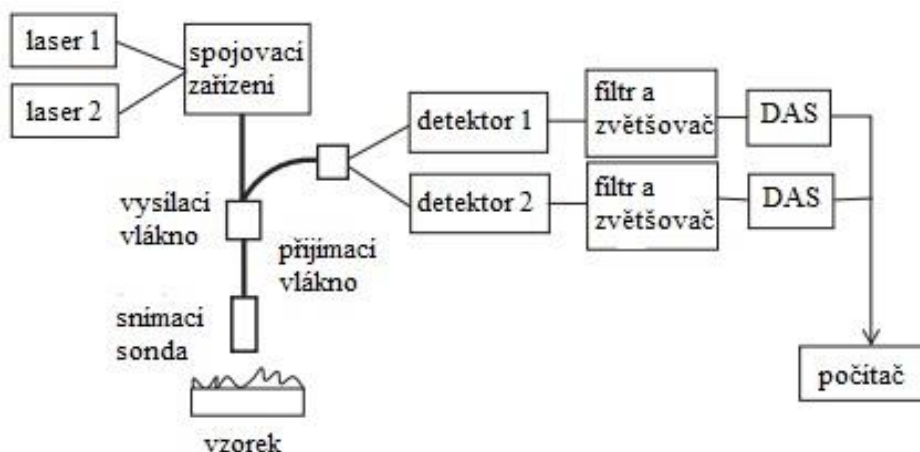
## Experimentální porovnání s předcházející metodou

V porovnávacím experimentu je srovnáván vláknový optický sensor, který snímá pouze pomocí jedné vlnové délky a vícevlenný optický sensor. [11]

### Sestavení experimentu

Experimentální uspořádání je znázorněno na obrázku 17. Jako světelné zdroje byly použity 3 typy diodových laserů pracujících při 650 nm, 1310 nm a 1550 nm. Poloměr jádra přenosového vlákna v experimentu je 8,2  $\mu m$ . Malé jádro s jedním módem. Všechna přijímací vlákna multimodální vlákna s velkým jádrem 400  $\mu m$ . Číselná velikost otvoru přijímacího vlákna je  $NA_2 = 0,22$ . Tato velikost je menší než velikost otvoru vysílacího vlákna, která je  $NA_1=0,14$ . Pro oddělení světelných zdrojů s jinou vlnovou délkou jsou použity dva detektory.

Pro sběr dat zrnitosti na povrchu je využit počítačový systém DAS (data acquisition systém). Po přijetí odraženého světla přijímacím vláknem je signál převeden do dvou detektorů. První detektor je na křemíkové bázi, typ: DET02AFC s rozsahem vlnových délek 400-1000 nm a druhý detektor je s vazbou optických vláken InGaAs, typ: DET01CFC s rozsahem vlnových délek 800-1700 nm. Poté je optický signál převeden na napěťový signál, kde je vyfiltrován a zvětšen. Vstup do počítače je zajištěn pomocí A/D převodu a následně zpracován systémem DAS. [11]



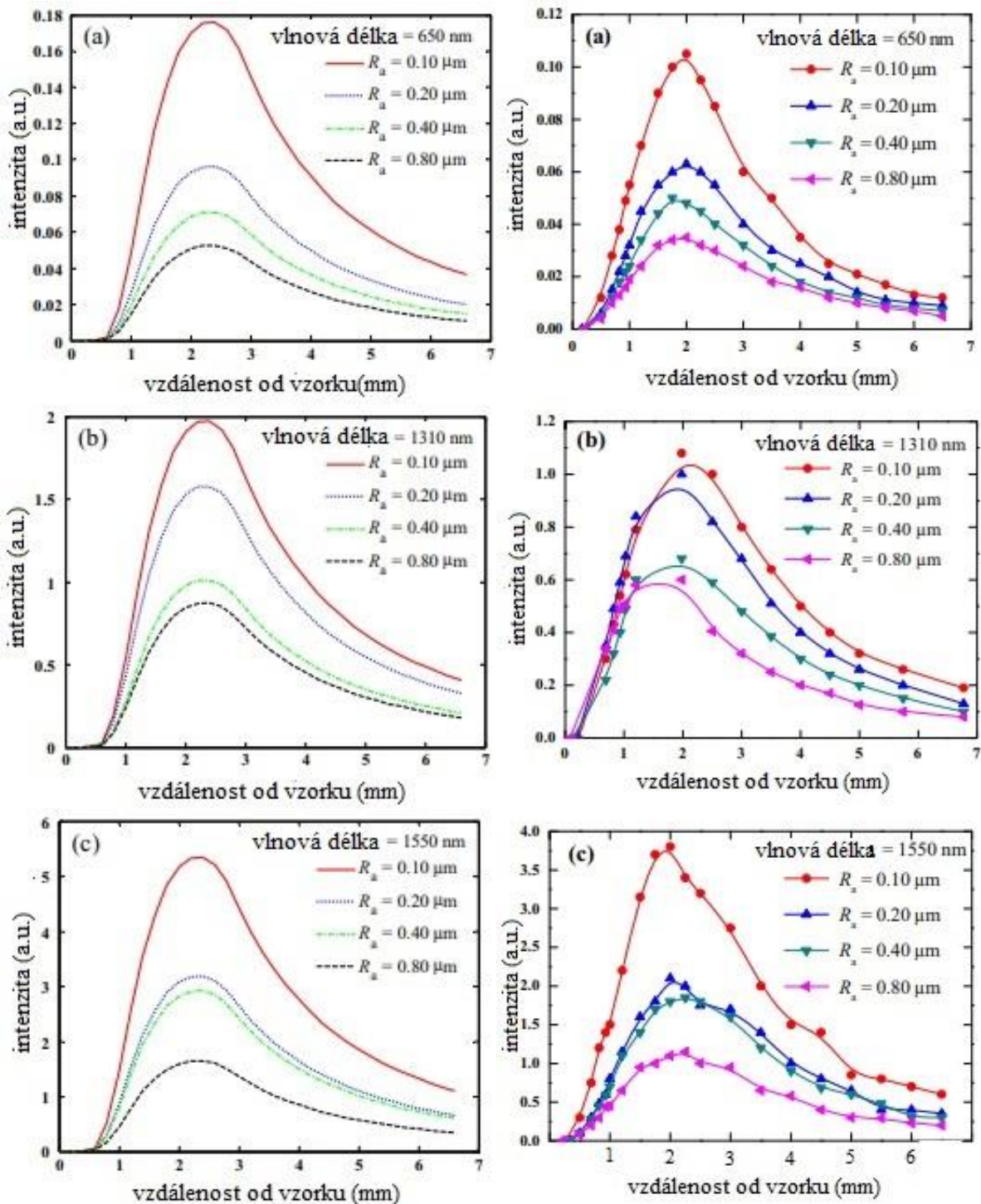
Obrázek 17 - experimentální soustava [11]

Nejprve bylo třeba sledovat vliv drsnosti povrchu na vlastnosti laserového rozptylu pro zjištění neoptimálnější měřící vzdálenosti. Aby bylo možno tyto vlivy sledovat, byly využity broušené vzorky s různou drsností ( $Ra = 0,10 \mu m, 0,20 \mu m, 0,40 \mu m, 0,80 \mu m$ ) vyrobeny výrobci precizních šablon v Harbinu (standard GB6060.2-85). Tyto vlivy byly zkoumány jak teoreticky tak experimentálně. [11]

### Optimální měřící vzdálenost

Intenzita povrchového rozptylu broušených vzorků se mění v závislosti na pracovní vzdálenosti jak v teoretické, tak experimentální části. Jak je znázorněno na obrázcích 18 a 19, intenzita rozptylu měřená s ohledem na broušený povrch se zjevně snižuje s nárůstem drsnosti povrchu. Naměřená intenzita rozptylu má maximum v určité vzdálenosti, při zvyšování pracovní vzdálenosti od nuly. Rozdíly této intenzity je možné sledovat mnohem lépe na grafech obrázků 18 a 19. Kde je znázorněno měření pomocí jedné vlnové délky. Míry útlumu intenzity při jednotlivých vlnových délkách jsou pro  $650 \text{ nm} = 0,905\%$ ,  $1310 \text{ nm} = 12,1\%$ ,  $1550 \text{ nm} = 36,5\%$ . Intenzita rozptylu světla je nejcitlivější na změnu drsnosti v oblasti vrcholu. [11]

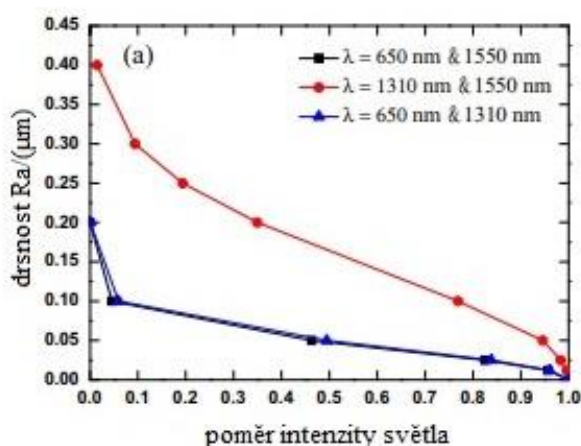
Ze znázornění na obrázku 19, vyplývá, že čím menší je vlnová délka, tím pomaleji se zvyšují intenzity rozptylů jednotlivých vlnových délek. Ačkoliv je výstupní intenzita optického senzoru teoreticky závislá na vzdálenosti  $d$ , střední hodnotě  $r$  a dopadající vlnové délce  $k$ , přijímací vlákno stále může přijímat odražené světlo i v malém rozsahu. [11]



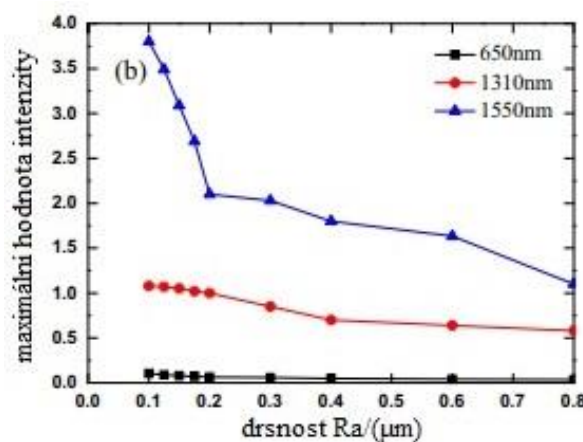
Obrázek 19 - intenzita  $\times$  vzdálenost od vzorku [11]      Obrázek 18 - intenzita  $\times$  vzdálenost od vzorku 2 [11]

dle závěrů z grafů na obrázcích 18 a 19 bylo možno určit, že největší intenzita rozptylu je ve vzdálenosti 2 mm od vzorku, proto byla označena jako optimální měřící vzdálenost pro měření tohoto experimentu. [11]

Vztahy mezi poměrem intenzity rozptylu a drsností s dopadající vlnovou délkou jsou popsány v grafech obr. 20 a 21. Broušené vzorky byly testovány pomocí tří párů vlnových délek, 650nm a 1310 nm, 650 nm a 1550 nm, 1310 nm a 1550 nm.



Obrázek 21 - poměr intenzity světla X drsnost [11]



Obrázek 20 - maximální hodnota interference X drsnost [11]

Obr. 20, ukazuje, že změna maximální hodnoty intenzity rozptylu ve vzdálenosti 2 mm je pomalá, když je drsnost povrchu větší při vlnových délkách 650 a 1310 nm. V případě vlnové délky 1550 nm, maximální hodnota intenzity rozptylu klesá velice rychle až do hodnoty 0,2 μm, od které klesá pomalu.

### Měření drsnosti

V tabulkách 8 a 9 byla porovnána měření dvěma optickými senzory. Jeden využívající jednu vlnovou délku a druhý využívající vícevlákná snímací vlákna.

| #. vzorku                 | 1                        | 2                        | 3                        | 4                       | 5                       | 6                        |
|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| standartní hodnota Ra(μm) | 0.012                    | 0.025                    | 0.05                     | 0.1                     | 0.2                     | 0.4                      |
| poměr odražené intenzity  | 0.9962                   | 0.9837                   | 0.9460                   | 0.7688                  | 0.3494                  | 1.489 × 10 <sup>-2</sup> |
| naměřená hodnota Ra(μm)   | 1.235 × 10 <sup>-2</sup> | 2.835 × 10 <sup>-2</sup> | 4.615 × 10 <sup>-2</sup> | 0.1109                  | 0.1865                  | 0.3873                   |
| absolutní chyba           | 3.50 × 10 <sup>-4</sup>  | 3.35 × 10 <sup>-3</sup>  | 3.85 × 10 <sup>-3</sup>  | 1.09 × 10 <sup>-2</sup> | 1.35 × 10 <sup>-2</sup> | 1.27 × 10 <sup>-2</sup>  |
| relativní chyba           | 2.92%                    | 13.4%                    | 7.70%                    | 10.9%                   | 6.75%                   | 3.18%                    |

Tabulka 8 - výsledky měření vícevlákným senzorem [11]

Tab.8, ukazuje hodnoty drsnosti povrchu získané vláknovým senzorem s více vlnovými délkami. Dopadající vlnové délky jsou 1310 a 1550 nm. Tab.9, ukazuje hodnoty drsnosti povrchu s jednou vlnovou délkou 1550 nm. Rozsah relativních chyb v tabulce 1 je 2,92% – 13,4% a v tabulce 2 7,92% - 24,2%. Největší relativní chyba u obou měření je u drsnosti povrchu 0,025 μm. Průměrné relativní chyby v tabulkách jsou 7,48% v tab.8 a 14,7% v tab.9 . Dle vyhodnocení těchto chyb lze říci že vícevlákný senzor je přijatelný pro měření drsnosti povrchu a je vhodnější než senzor s jednou vlnovou délkou.

| #. vzorku                 | 1                        | 2                        | 3                        | 4                       | 5                       | 6                       |
|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| standartní hodnota Ra(μm) | 0.012                    | 0.025                    | 0.05                     | 0.1                     | 0.2                     | 0.4                     |
| poměr odražené intenzity  | 5.28                     | 4.97                     | 4.77                     | 3.54                    | 2.64                    | 1.84                    |
| naměřená hodnota Ra(μm)   | 1.295 × 10 <sup>-2</sup> | 3.105 × 10 <sup>-2</sup> | 4.305 × 10 <sup>-2</sup> | 0.1154                  | 0.1685                  | 0.3563                  |
| absolutní chyba           | 9.50 × 10 <sup>-4</sup>  | 6.05 × 10 <sup>-3</sup>  | 6.95 × 10 <sup>-3</sup>  | 1.54 × 10 <sup>-2</sup> | 3.15 × 10 <sup>-2</sup> | 4.37 × 10 <sup>-2</sup> |
| relativní chyba           | 7.92%                    | 24.2%                    | 13.9%                    | 15.4%                   | 15.8%                   | 10.9%                   |

Tabulka 9 - výsledky měření jednovlákným senzorem [11]

## 7. Závěr

Úvod práce informoval o problematice drsnosti povrchu, definoval jasně pojmy, které byly použity v práci a které se běžně používají při měření drsnosti povrchu. Dále byly stanoveny a porovnány normy, podle kterých se práce řídila. Bylo jasně stanoveno značení jednotlivých parametrů.

Práce objasnila principy jednotlivých, základních druhů měření a jejich komponent. Dále tyto měřidla byly znázorněny graficky na obrázcích. U každého typu měření byly stanoveny výhody a nevýhody těchto měření a poukázáno na jejich ekonomickou situaci.

Byly zmíněny jednotlivé druhy chyb, jejich příčiny, postupy zjišťování těchto chyb a návrhy na odstranění. Dále byly zařazeny výpočty absolutní a relativní chyby, které byly využity ve vyhodnocování jednotlivých metod. V práci bylo stanoveno přípustné maximální nerovnosti drsnosti povrchu podle volby měřitele.

Závěr práce byl věnován seznámení s teorií dvou nových metod měření. Jedna zabývající se modelováním drsností povrchu pomocí simulovaných dat, pro ušetření času a finančních prostředků. Druhá byla zaměřena na využití nové konstrukce sondy, která snímá povrch a využítí více vlnových délek najednou.

Po seznámení se s teorií bylo na řadě vyhodnocení výsledků experimentů a porovnání s metodami, které byly využívány dříve. V prvním experimentu bylo dosaženo velice pozitivních výsledků v porovnání s předcházejícími metodami. Metoda dosáhla nejvyššího korelačního koeficientu 0,9669 a nejmenší relativní chyby 8,40%. Druhá metoda taktéž skončila pozitivněji než zastaralá metoda s relativní chybou průměrnou relativní chybou 7,48%

Téměř všechny údaje byly převzaty z cizojazyčných zdrojů, pro větší rozhled a nastínění problematiky i z cizích zemí

## zdroje a reference

- [1] BLATEYRON, François. *Profile Parameters* [online]. Francie: digital surf, c2006-2018 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://guide.digitalsurf.com/en/guide-profile-parameters.html>
- [2] KEYENCE. *Introduction to roughness* [online]. -: Keyence, c2019 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/line/index.jsp>
- [3] KEYENCE. *Introduction to surface roughness measurement* [online]. -: Keyence, c2012 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: [https://sernia.ru/upload/pdf\\_files/Introduction%20to%20surface%20roughness%20measurement.pdf](https://sernia.ru/upload/pdf_files/Introduction%20to%20surface%20roughness%20measurement.pdf)
- [4] JANKOVÝCH, Róbert – BUMBÁLEK, Bohumil. Výškové parametry textury povrchu. *MM průmyslové spektrum* [online]. mmspektrum, 2014, **2014**(11), 106 [cit. 2019-03-25]. DOI: 141103. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyskove-parametry-textury-povrchu.html>
- [5] MITUTOYO. *Quick guide to surface roughness measurement: reference guide to for laboratory and workshop* [online]. In: . USA: Mitutoyo, 2016 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: [https://www.mitutoyo.com/wp-content/uploads/2012/11/1984\\_Surf\\_Roughness\\_PG.pdf](https://www.mitutoyo.com/wp-content/uploads/2012/11/1984_Surf_Roughness_PG.pdf)
- [6] M&B CALIBR. *Měření drsnosti* [online]. Česká Republika: M&B calibr, - [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://www.mbcaltibr.cz/mereni-drsnosti.html>
- [7] *Drsnost povrchu* [online]. česká republika: SPŠ Zengrova [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: [https://www.spszengrova.cz/texty/texty/TEK/Drsnost\\_povrchu.pdf](https://www.spszengrova.cz/texty/texty/TEK/Drsnost_povrchu.pdf)
- [8] PRECISION DEVICES. *Surface roughness terminology and parameters* [online]. Milán: Precision devices, c1998-2013 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: [http://www.predev.com/pdf/files/surface\\_roughness\\_terminology\\_and\\_parameters.pdf](http://www.predev.com/pdf/files/surface_roughness_terminology_and_parameters.pdf)
- [9] AMETEK. *Surface Finish measurement methods and instrumentation* [online]. Berwyn: Ametek, c2017 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://www.taylor-hobson.com/-/media/ametektaylorhobson/files/learning%20zone/teleconference%20archives/surface%20finish%20measurement%20methods%20and%20instrumentation.pdf?la=en>

- [10] ABOUELATTA, Ossama. *3D Surface Roughness Measurement Using a Light Sectioning Vision System* [online]. London: -, 2010 [cit. 2019-03-25]. ISBN 978-988-17012-9-9. ISSN 2078-0966. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/45534474\\_3D\\_Surface\\_Roughness\\_Measurement\\_Using\\_a\\_Light\\_Sectioning\\_Vision\\_System](https://www.researchgate.net/publication/45534474_3D_Surface_Roughness_Measurement_Using_a_Light_Sectioning_Vision_System)
- [11] NAN-NAN, Zhu – ZHANG, Jun. Surface roughness measurement based on fiber optic sensor. *Elsevier* [online]. 2016, **2016**(86), 239-245 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224116001342?via%3Dihub>
- [12] RUIPENG, Guo. *Theoretical and Experimental Investigation of Inprocess Measurement of Surface Characteristic Parameter Based on Laser Scattering*. Shanghai, 2011. Vědecká publikace. Shanghai Jiao Tong University.
- [13] HANG, Zhang – JIAN, Liu – ENHUI, Lu – XINYU, Suo – NING, Chen. A novel surface roughness measurement method based on the red and green aliasing effect. *Elsevier* [online]. 2019, **2019**(131), 579-590 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X1830553X?via%3Dihub>
- [14] B.M., Kumar – M.M., Ratnam. Machine vision method for non-contact measurement of surface roughness of a rotating workpiece. *Emerald insight*. Emerald Group Publishing Limited, 2015, **2015**(35), 10-19. Dostupné z: <https://doi.org/10.1108/SR-01-2014-609>
- [15] KAMGUEM, Rene – TAHAN Antoine Souheil – SONGMENE, Victor. Evaluation of machined part surface roughness using image texture gradient factor. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* [online]. 2013, **2013**(14), 183-190 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12541-013-0026-x>
- [16] HUAIAN, Yi – JIAN, Liu – ENHUI, Lu – HANG, Zhang. Visual method for measuring the roughness of a grinding piece based on color indices. *Optics Express* [online]. 2016, **2016**(24), 172215-17233 [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://www.osapublishing.org/oe/abstract.cfm?uri=oe-24-15-17215>
- [17] ČEP, Robert. *Strojírenská technologie 2*. Ostrava, -. Dostupné také z: [homel.vsb.cz/cep77/](http://homel.vsb.cz/cep77/). Skripta. Technická univerzita Ostrava.



- [18] *Positive skewness* [online]. -: asset insights, c2000-2013 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: [http://www.assetinsights.net/Glossary/G\\_Positive\\_Skewness.html](http://www.assetinsights.net/Glossary/G_Positive_Skewness.html)
- [19] BUSHAN, Bharat. *Surface Roughness Analysis and Measurement Techniques*. In: *Ufam* [online]. Ohio: CRC press, c2001 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: [http://home.ufam.edu.br/berti/nanomateriais/8403\\_PDF\\_CH02.pdf](http://home.ufam.edu.br/berti/nanomateriais/8403_PDF_CH02.pdf)
- [20] *Roughness Comparison Specimens*. In: *Gardco* [online]. -: Paul and Gardner, c2019 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: [https://gardco.com/pages/surface\\_pro/roughness\\_comparison.cfm](https://gardco.com/pages/surface_pro/roughness_comparison.cfm)
- [21] *Roughness Comparison Specimens*. In: *Mediacollege* [online]. -: mediacollege, - [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <https://www.mediacollege.com/3d/intro.html?fbclid=IwAR1IJcrjI66g6UumHMPqlbBciw2Pqe1Xxm5fvS4gXNHKAaw1k3c-vT-DuTE>
- [22] JUNE, Shim. *Effect of air-particle pressures on the surface topography and bond strengths of resin cement to the hybrid ceramics*. In: *Researchgate* [online]. -: researchgate, c2019 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/D-images-of-the-surface-roughness-for-various-airborne-abrasion-pressures-Representative\\_fig1\\_316200566](https://www.researchgate.net/figure/D-images-of-the-surface-roughness-for-various-airborne-abrasion-pressures-Representative_fig1_316200566)
- [23] XIAOMEI, Xu. *Inner surface roughness measurement of holes based on reflective intensity modulation fiber optic sensor*. Harbin, 2010. Odborný článek. Harbin Institute of Technology.
- [24] *3D (Areal) Filtering* [online]. Michigan: Michigan Metrology, c2010-2019 [cit. 2019-03-31]. Dostupné z: [https://www.michmet.com/3d\\_filtering.htm](https://www.michmet.com/3d_filtering.htm)
- [25] BUMBÁLEK, B. – ODVODY, V. – OŠŤÁDAL, B.: *Drsnost povrchu*. Praha, 1989.