

# Možnosti využití 2D a 3D skenovacích metod pro snímání povlakovaných povrchů

Jakub Jemelka

---

Bakalářská práce  
2016



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

**Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně**

**Fakulta technologická**

**Ústav výrobního inženýrství**

**akademický rok: 2015/2016**

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

**(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)**

**Jméno a příjmení: Jakub Jemelka**

**Osobní číslo: T150171**

**Studijní program: B3909 Procesní inženýrství**

**Studijní obor: Technologická zařízení**

**Forma studia: kombinovaná**

**Téma práce: Možnosti využití 2D a 3D skenovacích metod pro snímání povlakovaných povrchů**

**Zásady pro vypracování:**

- 1. Popište základní parametry jakosti povrchů vhodných pro výpočty korelací.**
- 2. Teoreticky popište matematický princip korelace.**
- 3. Na zadaných površích proveďte snímání kontaktním a bezkontaktním způsobem.**
- 4. Vybrané parametry vzájemně porovnejte a nalezněte korelaci.**

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. ČSN EN ISO 4287. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu. 1999.
2. ČSN EN ISO 4288. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu. 1999.
3. BUMBÁLEK,L- BUMBÁLEK,B: Pokrokové trendy v hodnocení textury povrchu, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Milena Kubišová**  
Ústav výrobního inženýrství

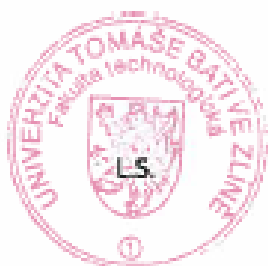
Datum zadání bakalářské práce: **8. ledna 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20. května 2016**

Ve Zlíně dne 29. ledna 2016

doc. Ing. František Buňka, Ph.D.

*děkan*



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.

*ředitel ústavu*

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 27.4.2016

  
.....

<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výtisky, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní díla:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odporčí-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užit či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

V této práci jsou popsány základní parametry jakosti povrchu vhodné pro výpočet korelací, včetně teoretického popisu i matematických vzorců. Další část se věnuje matematickému principu korelace.

Klíčová slova: Drsnost povrchu, korelace, kontaktní a bezkontaktní metoda měření jakosti povrchu,

## **ABSTRACT**

In this work we describe the basic parameters of surface quality suitable for the calculation of correlations, including the description of the theoretical as well as mathematical formulas. The next section is devoted to the mathematical principle of correlation.

Keywords: Roughness of surface, Correlation, Contact and non-contact method of measuring the surface quality

Tímto bych chtěl poděkovat především své vedoucí bakalářské práce Ing. Mileně KUBIŠOVÉ za její ochotu, trpělivost a cenné připomínky, které přispěly k vypracování této práce. Dále bych rád poděkoval mé rodině za podporu po celou dobu mého studia. Tato práce byla podpořena interním grantem z UTB ve Zlíně IGA/FT/2016/005 a financována z fondů pro specifický akademický výzkum.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>10</b>
<b>1 JAKOST POVRCHU</b> .....	<b>11</b>
1.1 ZÁKLADNÍ POJMY A DEFINICE.....	11
1.1.1 Struktura povrchu.....	11
1.1.2 Nedokonalost povrchu.....	11
1.1.3 Skutečný profil.....	11
1.1.4 Souřadnicový systém.....	11
1.1.5 Filtr profilu.....	12
1.1.6 Profil povrchu.....	12
1.1.7 Střední čáry.....	13
1.2 ZÁKLADNÍ GEOMETRICKÉ PARAMETRY.....	14
1.3 PARAMETRY PROFILU POVRCHU.....	15
1.3.1 Výškové parametry.....	15
1.3.2 Výškové parametry.....	16
1.3.3 Délkové parametry.....	17
1.3.4 Tvarové parametry.....	17
1.4 NORMY ZABÝVAJÍCÍ SE DRSNOSTÍ POVRCHU.....	18
<b>2 PRAVIDLA PRO POROVNÁNÍ MĚŘENÝCH HODNOT S TOLERANČNÍMI MEZEMI</b> .....	<b>19</b>
2.1 PLOCHY NA KONTROLOVANÝCH PRVCÍCH.....	19
2.2 PRAVIDLO 16 %.....	19
2.3 PRAVIDLO MAXIMA.....	19
2.4 NEJISTOTA MĚŘENÍ.....	19
<b>3 ZÁKLADNÍ ZPŮSOBY MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU</b> .....	<b>20</b>
3.1 VÝVOJ PŘÍSTROJŮ PRO SNÍMÁNÍ JAKOSTI POVRCHU.....	22
3.2 KONTAKTNÍ SNÍMÁNÍ JAKOSTI POVRCHU.....	23
3.3 BEZKONTAKTNÍ SNÍMÁNÍ JAKOSTI POVRCHU.....	24
3.3.1 Měřicí systémy pro bezkontaktní způsob snímání povrchu.....	25
3.3.2 Program Talymap.....	26
3.4 POROVNÁNÍ KONTAKTNÍHO A BEZKONTAKTNÍHO SNÍMÁNÍ JAKOSTI POVRCHU.....	27
3.4.1 Výhody kontaktního snímání jakosti povrchu.....	27
3.4.2 Výhody bezkontaktního snímání jakosti povrchu.....	27
<b>4 MATEMATICKÝ PRINCIP KORELACE</b> .....	<b>28</b>
4.1 KORELACE.....	28
4.2 PARAMETRY KORELACE.....	28
4.3 ČASOVÁ ŘADA.....	30
4.3.1 Rozdělení časových řad.....	30
Podle charakteru ukazatele:.....	30
4.3.2 Popisné charakteristiky časových řad.....	31
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>33</b>



<b>5</b>	<b>PŘEHLED ZKUŠEBNÍCH DESTIČEK .....</b>	<b>34</b>
5.1	MATERIÁL OBROBKU .....	37
5.1.1	Ušlechtilá ocel 1.2343 .....	37
5.2	NANÁŠENÍ PVD POVLAKŮ .....	37
5.3	NANÁŠENÍ PAPVD POVLAKŮ .....	38
5.4	CHARAKTRISTIKA POUŽITÝCH POVLAKŮ .....	38
<b>6</b>	<b>MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ .....</b>	<b>39</b>
6.1	TALYSURF CLI 500 .....	39
<b>7</b>	<b>MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU .....</b>	<b>40</b>
<b>8</b>	<b>PROGRAM TALYMAP .....</b>	<b>44</b>
8.1	MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI - ZKUŠEBNÍ DESTIČKA 1 .....	44
8.1.1	Naskenované povrchy a naměřené hodnoty jakosti povrchu po povlakování .....	44
8.1.2	Abbott Firestonova křivka .....	49
<b>9</b>	<b>KORELACE MĚŘENÍ .....</b>	<b>51</b>
9.1	GAUSSOVA KŘIVKA .....	51
9.2	POROVNÁNÍ NORMY ČSN EN ISO 4287 A ČSN EN ISO 25178-2 .....	52
9.2.1	ČSN EN ISO 4287 .....	52
9.2.2	ČSN EN ISO 25178-2 .....	52
9.3	GAUSSOVO POROVNÁNÍ 2D A 3D VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ .....	53
9.3.1	Gaussovo porovnání 2D a 3D měření - zkušební destička č. 1 .....	53
9.3.2	Gaussovo porovnání 2D a 3D měření - zkušební destička č. 2 .....	54
9.3.3	Gaussovo porovnání 2D a 3D měření - zkušební destička č. 3 .....	55
9.3.4	Gaussovo porovnání 2D a 3D měření - zkušební destička č. 4 .....	56
9.3.5	Gaussovo porovnání 2D a 3D měření - zkušební destička č. 5 .....	57
9.3.6	Gaussovo porovnání 2D a 3D měření - zkušební destička č. 6 .....	58
9.3.7	Gaussovo porovnání 2D a 3D měření - zkušební destička č. 7 .....	59
9.3.8	Gaussovo porovnání 2D a 3D měření - zkušební destička č. 8 .....	60
9.4	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ .....	61
9.4.1	Vyhodnocení zkušební destičky č. 1 .....	61
9.4.2	Vyhodnocení zkušební destičky č. 2 .....	61
9.4.3	Vyhodnocení zkušební destičky č. 3 .....	62
9.4.4	Vyhodnocení zkušební destičky č. 4 .....	62
9.4.5	Vyhodnocení zkušební destičky č. 5 .....	62
9.4.6	Vyhodnocení zkušební destičky č. 6 .....	63
9.4.7	Vyhodnocení zkušební destičky č. 7 .....	63
9.4.8	Vyhodnocení zkušební destičky č. 8 .....	63
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>64</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>65</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>68</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>70</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>72</b>

## ÚVOD

Tématem bakalářské práce jsou možnosti využití 2D a 3D skenovacích metod pro snímání povlakovaných povrchů.

Ve strojní výrobě je vysoký požadavek na kvalitu povrchu, kterou zjišťujeme moderními technologiemi za pomoci drsnosti povrchu. Kvalitní povrch má zásadní vliv na správnou funkci výrobku. Na povrchu obrobku vznikají charakteristické stopy při každé obráběcí metodě. Měření a hodnocení jakosti povrchu se stále rozvíjí v souladu se zaváděním přísnějších norem. Charakteristika struktury povrchu, včetně definice parametrů a jejich měření je součástí norem Geometrické požadavky na výrobky (GPS). Při měření se uplatňují i technická a ekonomická hlediska uživatelského prostředí.

Měření jakosti povrchu se nejprve provádělo vizuálním způsobem, kde se porovnával vyrobený povrch s kalibračním vzorkem. Tato metoda byla ale značně nepřesná. Proto se začaly používat optické měřicí přístroje, při kterých se povrch materiálu zvětšoval mikroskopem a následně porovnával s etanoly. Následně se vyvinuly digitální přístroje, které se využívají do dnešní doby. Na rozdíl od předchozích typů se tyto přístroje vyznačují vysokou přesností, rychlostí, malou hmotností apod.

Statistické závislosti měření matematicky popisuje korelace, kde se prolíná výpočetní i interpolační hledisko. Velký důraz je kladen na intenzitu (sílu) vzájemného vztahu. Čím jsou empirické hodnoty méně rozptýleny kolem regresivní čáry, tím jsou závislosti těsnější. Jsou-li hodnoty více rozptýleny kolem regresivní osy, jde o volnější závislosti. [1]

Cílem této práce je popsat základní parametry jakosti povrchů vhodných pro výpočet korelací, teoreticky popsat matematický princip korelace, dále na zadaných površích provést snímání drsnosti povrchu kontaktním i bezkontaktním způsobem, na závěr porovnat výsledky měření a nalézt korelaci.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 JAKOST POVRCHU

Povrch definujeme jako vrstvu makroskopického objektu, tvořící hranici mezi základním materiálem a okolím. Určuje vzhled povrchu a tvoří rozhraní mezi dvěma fázemi. [2]

Drsnost obráběného povrchu nebo strukturu povrchu definujeme jako jakost povrchu. Drsnost je souhrn nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, které vznikají při výrobě. Do drsnosti se nepočítají vady povrchu, které se vyskytují jen ojediněle (trhlinky, důlky rýsky, apod.) a které vznikají vadami materiálu, poškozením, apod.

Parametry drsností se vyhodnocují na skutečných profilech, které se získávají jako průsečnice kolmé popř. šikmé roviny se skutečným povrchem.

### 1.1 ZÁKLADNÍ POJMY A DEFINICE

#### 1.1.1 Struktura povrchu

Opakované nebo nahodilé úchytky od geometrického povrchu, které tvoří trojrozměrnou topografii povrchu.

Podle velikosti rozteče daných nerovností se struktura povrchu rozděluje:

- *Drsnost povrchu* - nejmenší rozteč
- *Vlnitost povrchu* - střední rozteč
- *Základní profil* - největší rozteč

#### 1.1.2 Nedokonalost povrchu

Mezi nedokonalosti povrchu patří např. trhliny, mikrotrhliny, rýhy, koroze, apod., které vznikly během výroby, skladováním nebo funkcí plochy. Nedokonalosti povrchu se nezahrnují do hodnocení struktury povrchu.

#### 1.1.3 Skutečný profil

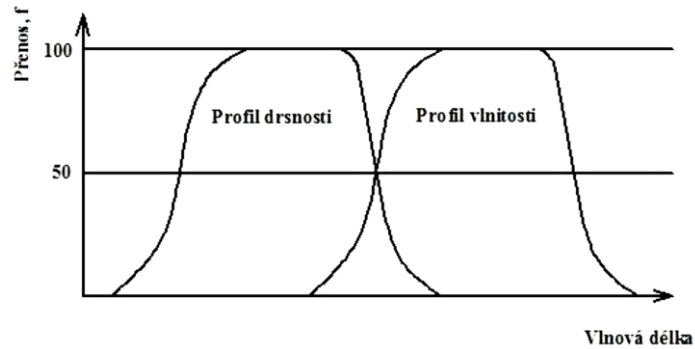
Povrch omezující těleso a oddělující ho od okolí.

#### 1.1.4 Souřadnicový systém

System, kde jsou definovány parametry drsnosti povrchu. Nejčastěji je používán pravoúhlý kartézský souřadnicový systém, orientovaný vůči povrchu (Obr. 2). *Osa X* je souběžná se střední čarou, *osa Y* leží na skutečném povrchu a *osa Z* směřuje z materiálu do okolí. [3]

### 1.1.5 Filtr profilu

Filtr profilu byl zaveden z důvodu různých nerovností, lišící se zejména roztečemi a vlivem na funkci povrchu. Rozděluje profily na krátkovlnné a dlouhovlnné složky (Obr. 1). [3]



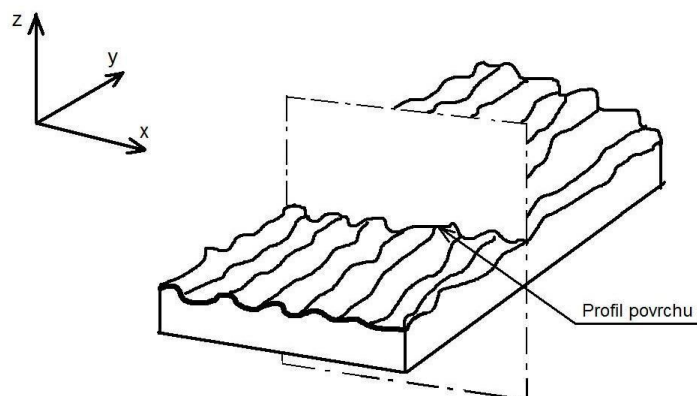
Obr. 1 Přenosová charakteristika [3]

Norma definuje tři základní filtry profilu:

- $\lambda_s$  filtr profilu - definuje rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln přítomnými na povrchu (Obr. 1). [4]
- $\lambda_c$  filtr profilu - definuje rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti (Obr. 1). [4]
- $\lambda_f$  filtr profilu - definuje rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln přítomnými na povrchu (Obr. 1). [4]

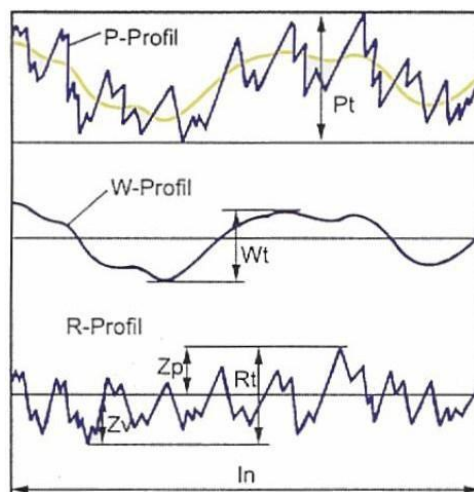
### 1.1.6 Profil povrchu

Profil vzniklý jako průsečnice skutečného povrchu a dané roviny, která je kolmá k rovině rovnoběžné se skutečným povrchem ve vhodném směru (Obr. 2). Je to základní zdroj informací pro posuzování struktury povrchu. [3]



Obr. 2 Profil povrchu [3]

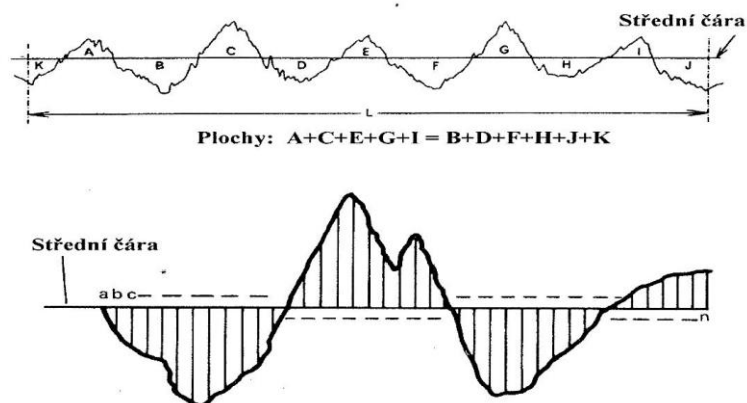
- Základní profil (P-profil) - tvoří základ pro hodnocení základního profilu, tzv. *P-parametrů* (Obr. 3). Tvar povrchu vzniká špatnou přímostí vodících ploch, nedostatečnou tuhostí, nebo teplem, které může způsobit deformaci obrobeneé plochy. [3]
- Profil drsnosti (R-profil) – jiným slovem mikronerovnosti, vychází z nich hodnocení parametrů profilu struktury povrchu, tzv. *R-parametrů* (Obr. 3). Drsnost povrchu je způsobena blízkými nepravidelnostmi, které vznikly během výrobního procesu [3]
- Profil vlnitosti (W-profil) – jiným slovem makronerovnosti, jsou základem pro hodnocení parametrů profilu vlnitosti, tzv. *W-parametrů* (Obr. 3). Vlnitost povrchu je nejčastěji způsobena deformací, chvěním nebo zpevněním materiálu. [3]



Obr. 3 Profil povrchu [3]

### 1.1.7 Střední čáry

Střední čára - čára probíhající středem vrcholů a prohlubní, kdy součet ploch ohraničených profilem nerovnosti nad touto čarou je roven součtu ploch pod touto čarou (Obr. 4). [4]



Obr. 4 Střední čára [3]

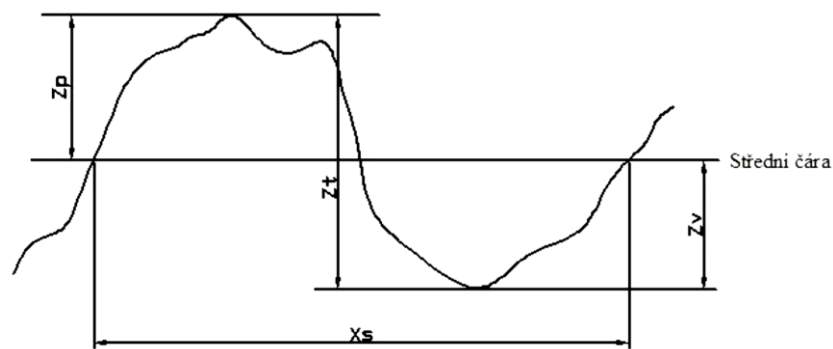
Střední čára profíle drsnosti – čára odpovídající dlouhovlnné složce profílu potlačené filtrem profílu  $\lambda_c$ . [3]

Střední čára profílu vlnitosti – čára odpovídající dlouhovlnné složce profílu potlačené filtrem profílu  $\lambda_f$ . [3]

Střední čára základního profílu – čára nejmenších čtverců přiléhající jmenovitému tvaru základního profílu. [3]

## 1.2 ZÁKLADNÍ GEOMETRICKÉ PARAMETRY

Prvek profílu - výstupěk profílu a přilehlá prohlubeň (Obr. 5).



Obr. 5 Prvek profílu [3]

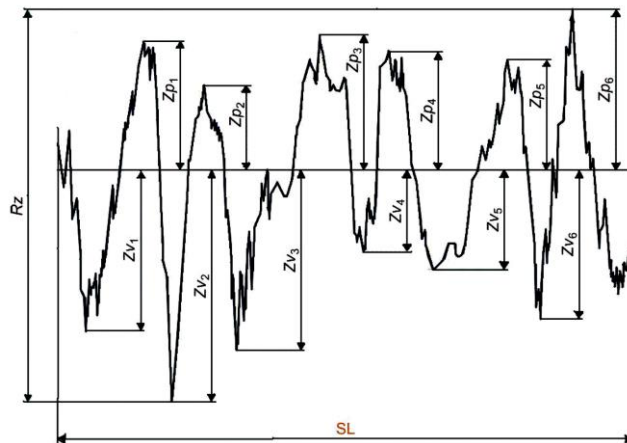
- Hodnota pořadnic,  $Z(x)$  - výška posuzovaného profílu v libovolné poloze souřadnice  $x$  (Obr. 5). [3]
- Výška výstupku profílu,  $Z_p$  - vzdálenost nejvyššího bodu profílu od osy  $x$  (Obr. 5). [3]
- Hloubka prohlubně profílu,  $Z_v$  - vzdálenost mezi osou  $x$  a nejnižším bodem prohlubně (Obr. 5). [3]
- Výška prvku profílu,  $Z_t$  - součet výšky výstupku a hloubky prohlubně prvku profílu (Obr. 5). [3]
- Šířka prvku profílu,  $X_s$  - délka úseku osy  $x$  protínající prvek profílu (Obr. 5). [3]
- Výstupěk profílu – z povrchu ven do okolí směřující část posuzovaného profílu spojující dva přilehlé body na průsečíku profílu s osou  $x$ . [3]
- Prohlubeň profílu – z okolí do materiálu směřující část posuzovaného profílu spojující dva přilehlé body na průsečíku profílu s osou  $x$ . [3]

## 1.3 PARAMETRY PROFILU POVRCHU

### 1.3.1 Výškové parametry

Z výškových parametrů se udávají hodnoty výstupků a prohlubní.

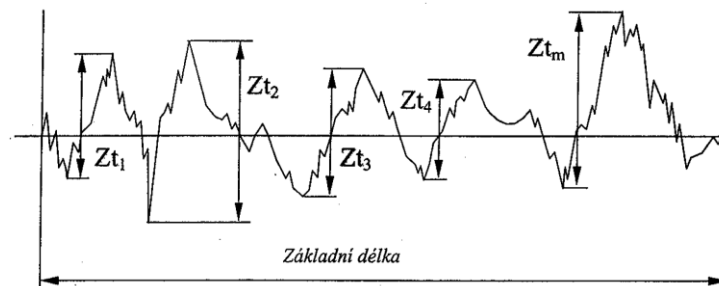
- Největší výška výstupku profilu  $R_p$  - výška  $Z_p$  nejvyššího výstupku profilu a rozsahu základní délky (Obr. 6). [3]



Obr. 6 Největší výška výstupního profilu [3]

- Největší hloubka prohlubně profilu  $R_v$  – hloubka  $Z_v$  nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky (Obr. 6). [3]
- Největší výška profilu  $R_z$  – součet výšky  $Z_p$  nejvyššího výstupku profilu a hloubky  $Z_v$  nejnižší prohlubně v rozsahu základní délky (Obr. 6). [3]
- Průměrná výška prvků profilu  $R_c$  – průměrná hodnota výšek  $Z_t$  prvků profilu v rozsahu základní délky (Obr. 7). [3]

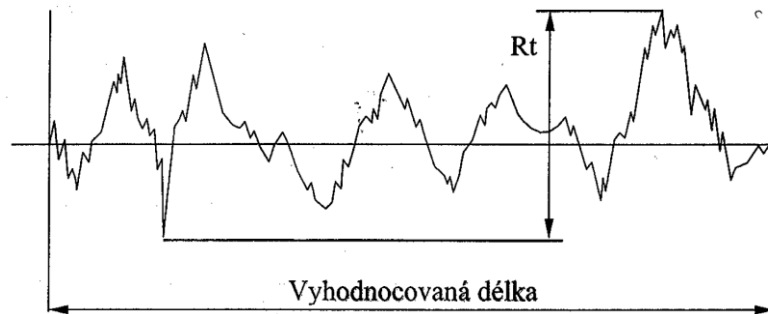
$$R_c = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_{ti} \quad (1)$$



Obr. 7 Průměrná výška prvků profilu [5]



- Celková výška profilu  $R_t$  – součet výšky  $Z_p$  nejvyššího výstupku profilu a hloubky  $Z_v$  nejnižší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky (Obr. 8). [3]

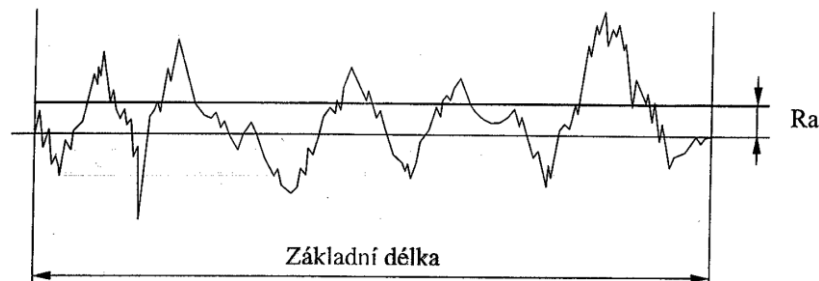
Obr. 8 Celková výška profilu  $R_t$  [5]

### 1.3.2 Výškové parametry

Nejdůležitější parametr je drsnost povrchu ve směru výšky  $R_a$ .

- Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu,  $R_a$  – aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic  $Z(x)$  v rozsahu délky  $l_r$  (Obr. 9). [3]

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (2)$$

Obr. 9 Aritmetická úchylka  $R_a$  [5]

- Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu  $R_q$  – kvadratický průměr pořadnic  $Z(x)$  v rozsahu délky  $l_r$ . [3]

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l |Z^2(x)| dx} \quad (3)$$

- Šikmost posuzovaného profilu  $R_{sk}$  – podíl průměrné hodnoty třetích mocnin pořadnic  $Z(x)$  a třetí mocniny hodnoty  $R_q$  v rozsahu délky  $l_r$ . [3]

$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \left[ \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z^3(x)| dx \right] \quad (4)$$

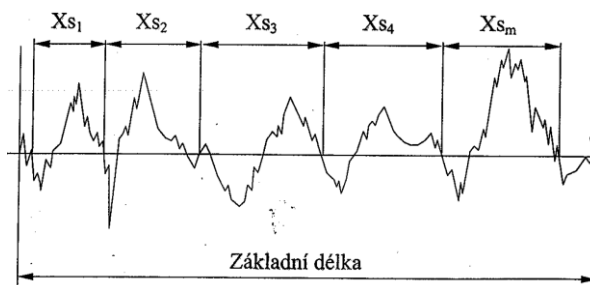
- Špičatost posuzovaného profilu  $Rku$  – podíl poměrné hodnoty čtvrtých mocnin pořadnic  $Z(x)$  a čtvrté mocniny hodnoty  $R_q$  v rozsahu základní délky  $lr$ . [3]

$$Rku = \frac{1}{R_q^2} \left[ \frac{1}{lr} \int_0^{lr} |Z^4(x)| dx \right] \quad (5)$$

### 1.3.3 Délkové parametry

- Průměrná šířka prvků profilu  $RS_m$  - aritmetický průměr šířek  $X_s$  prvků profilu v rozsahu základní délky (Obr. 10). [3].

$$RS_m = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{s_i} \quad (6)$$



Obr. 10 Průměrná šířka  $RS_m$  [5]

### 1.3.4 Tvarové parametry

- Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu  $P\Delta_q$ ,  $R\Delta_q$ ,  $W\Delta_q$  - tvarový parametr hodnocení struktury povrchu je kvadratický průměr sklonu pořadnic  $dz/dx$  na základní délce. Úhel mezi profilem a směrem střední čáry (Obr. 11). [6]

$$P\Delta_q, R\Delta_q, W\Delta_q = \sqrt{\frac{1}{lr} \int_0^{lr} \left( \frac{dz}{dx} \right)^2 dx} \quad (7)$$

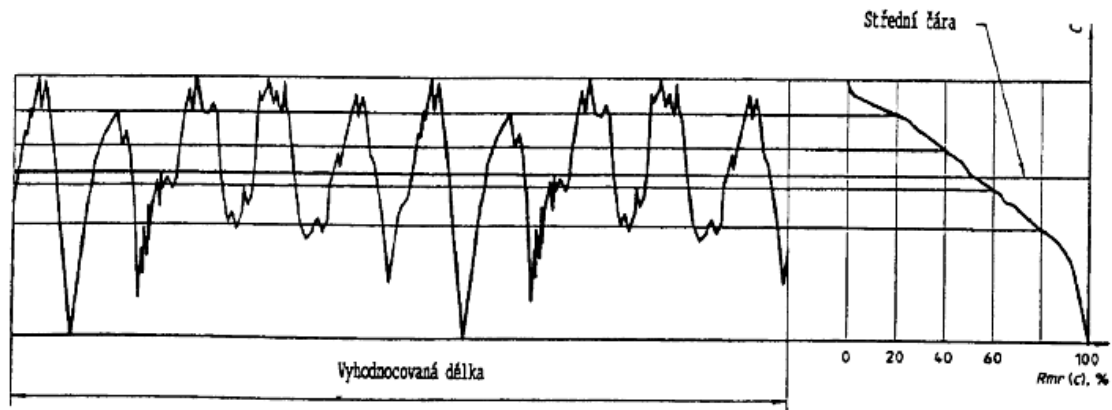


Obr. 11 Místní sklon [3]

- Materiálový poměr profilu drsnosti  $Rmr$  – poměr délky materiálu elementů profilu drsnosti  $MI$  a vyhodnocované délky  $ln$ . [3]

$$Rmr = \frac{MI}{ln} \quad (8)$$

- Křivka materiálového podílu (Abbott Firestoneovava křivka) – grafická závislost hodnot podílu materiálu od polohy řezu profilu, výškového rozdílu řezu profilu znázorňujícího vzdálenost mezi dvěma řezy v určeném materiálovém podílu profilu relativního materiálového podílu profilu  $R_{mr}$  a rozdělení hustoty odchylek profilu.[3]



Obr. 12 Křivka materiálového podílu. [3]

#### 1.4 NORMY ZABÝVAJÍCÍ SE DRSNOSTÍ POVRCHU

ČSN EN ISO 4287 – mezinárodní norma, která stanovuje termíny, definice a parametry pro určování struktury povrchu (drsnosti, vlnitosti,...) profilovou metodou. [3]

ČSN EN ISO 4288 – tato mezinárodní norma stanoví pravidla pro porovnání měřených hodnot s tolerančními mezemi stanovenými pro parametry struktury povrchu, které obsahuje norma ISO 4287, ISO 12085, ISO 13565-2 a ISO 13565-3. Dále specifikuje standardní pravidla pro výběr mezních vlnových délek cut-off  $\lambda_c$  pro parametry profilu drsnosti podle ISO 4287, měřených pomocí dotkových (hrotových) přístrojů podle ISO 3274). [6]

ČSN EN ISO 25178-2 – jde o obecnou normu geometrických specifikací produktu (GPS). Tato část normy ISO 25178 popisuje terminologii, pojmy a parametry pro plošnou povrchovou texturu. [7]

## 2 PRAVIDLA PRO POROVNÁNÍ MĚŘENÝCH HODNOT S TOLERANČNÍMI MEZEMI

### 2.1 PLOCHY NA KONTROLOVANÝCH PRVCÍCH

Plochy se kontrolují vizuální zkouškou. Struktura povrchu kontrolovaných obrobků je buď homogenní, nebo může být na jednotlivých plochách zcela různorodá. Pokud je struktura povrchu homogenní, hodnoty parametrů určené z celého povrchu budou použity pro porovnání s požadavky uvedenými na výkrese, nebo ve výrobní dokumentaci. Jsou-li na povrchu jednotlivé plochy s rozdílnou strukturou, hodnoty parametrů určené pro jednotlivou plochu budou porovnány s požadavky specifikovanými na výkrese, nebo ve výrobní dokumentaci odděleně. [4,6]

### 2.2 PRAVIDLO 16 %

Povrch je považován za přijatelný, jestliže méně než 16% všech naměřených hodnot parametru  $R_a 12,5$  na vyhodnocované délce přesahuje předepsanou hodnotu horní meze. Značka se nepředepisuje. [4,6]

### 2.3 PRAVIDLO MAXIMA

Povrch odpovídá požadavku maxima, pokud žádná z naměřených hodnot parametru na celém kontrolovaném povrchu nepřesahuje ani v jednom případě hodnotu horní meze. [4,6]

### 2.4 NEJISTOTA MĚŘENÍ

Shoda či neshoda měření se specifikovanými mezními hodnotami, danými výkresovou dokumentací se určuje podle normy ISO 14253-1. Při porovnávání výsledků s horními a dolními mezemi neuvažujeme *pravidlo 16 %*. [4,6]

### 3 ZÁKLADNÍ ZPŮSOBY MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU

Měřicí technika a zařízení se v posledních letech velmi rozvinula. Se zvyšujícími nároky na přesnost výroby stoupají také požadavky na přesnost měření, stabilitu a opakovatelnost naměřených výsledků. S přesností souvisí také dostatečné vertikální a horizontální rozlišení vzhledem k plánované aplikaci. Tyto požadavky jsou rozhodujícím faktorem v procesu volby měřicího přístroje. Spolu s rychlostí snímání a možným největším rozsahem měření jsou dány do poměru k ekonomické dostupnosti pro zákazníka. [8,9]

Výrobci přesné měřicí techniky musí věnovat zvýšenou pozornost citlivosti přístrojů na vnější vlivy, zejména na okolní vibrace, nebo v případě bezdotykových přístrojů na okolní světlo. [10]

Způsoby měření: [11]

- Absolutní – měří se celkové rozměry součástí.
- Komparační – zjišťují se hodnoty úchylek od jmenovitého rozměru.
- Toleranční – zjišťuje se pouze, zda je nebo není splněn daný předpis.

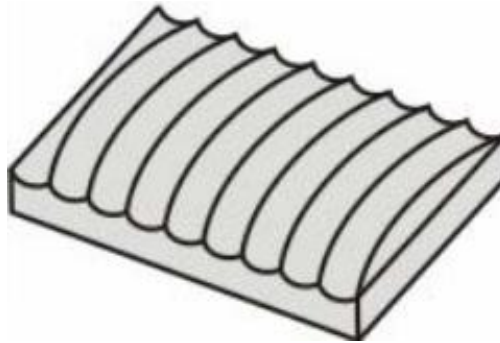
Základní skupiny metod měření textury povrchu dle normy ČSN EN ISO 25178-6: [12]

- Snímání profilu
- Snímání plochy
- Průměrování na ploše

Během každé povrchové úpravy materiálu vznikají na jeho povrchu stopy. Ty jsou prostorově uspořádány a jejich vyhodnocení je technologicky velmi náročné. Z tohoto důvodu se nejčastěji používá zjednodušená metoda měření drsnosti povrchu v jednom řezu těchto nerovností. [13]

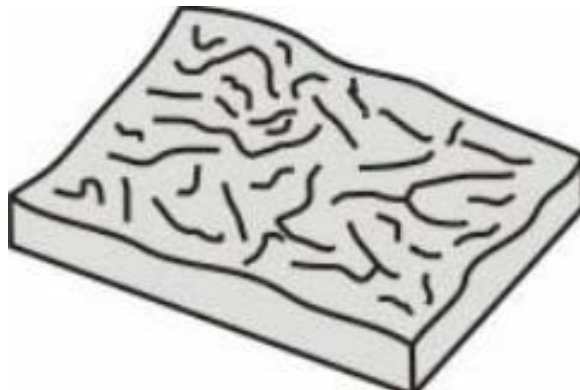
Směr nerovností – může být buď výrazný (periodický) nebo nevýrazný (aperiodický). Rozdíl je patrný na Obr. 13 a Obr. 14. [13]

- Periodický povrch – vzniká při soustružení, frézování, vrtání, broušení apod., pokud nástroj vyvábí na povrchu součásti rýhy v určitém směru. (Obr. 13)



Obr. 13 Periodický prvek [13]

- Aperiodický povrch – vzniká při kování, odlévání apod., v tomto případě nástroj nevytváří nerovnosti ve význačném směru. (Obr. 14)



Obr. 14 Aperiodický prvek [13]

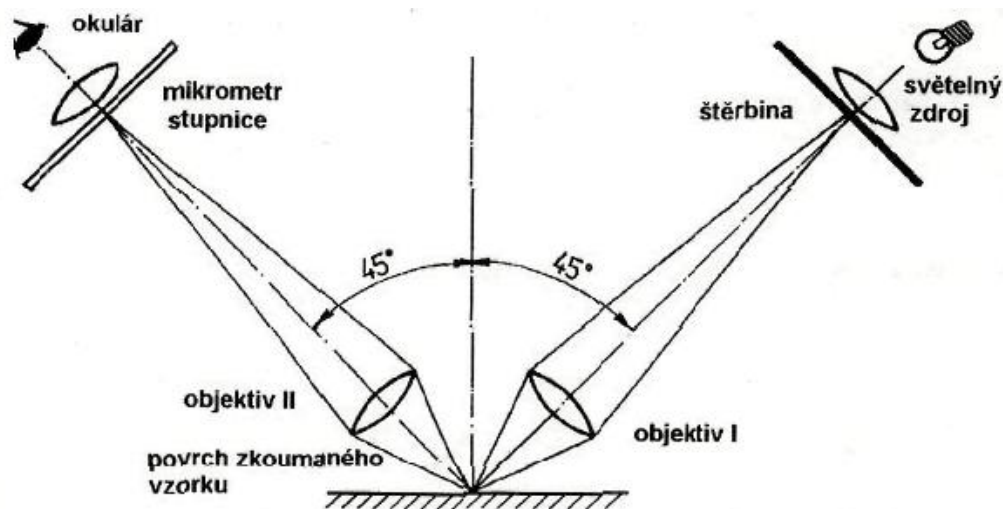
### 3.1 VÝVOJ PŘÍSTROJŮ PRO SNÍMÁNÍ JAKOSTI POVRCHU

- Vizuálně (vzorkovnice, lupy)



Obr. 15 Vzorkovnice drsnosti povrchu broušení ploch. [14]

- Opticky (Schmaltzuv mikroskop) - rovnoběžný svazek paprsků omezený štěrbinou do tvaru velmi tenké, světelné roviny je promítán optickým systémem pod úhlem  $45^\circ$  na měřený povrch. Průnikem této roviny nerovnosti povrchu vznikne obraz profilu šikmého řezu nerovnosti plochy, který má většinou tvar světlozelené stužky v tmavém poli mikroskopického obrazu (Obr. 15). [15]



Obr. 16 Metoda světelného řezu [15]

- Kontaktně
- Bezkontaktně – CLI/CLA
- Bezkontaktně – laserově
- SEM, AFM,...

### 3.2 KONTAKTNÍ SNÍMÁNÍ JAKOSTI POVRCHU

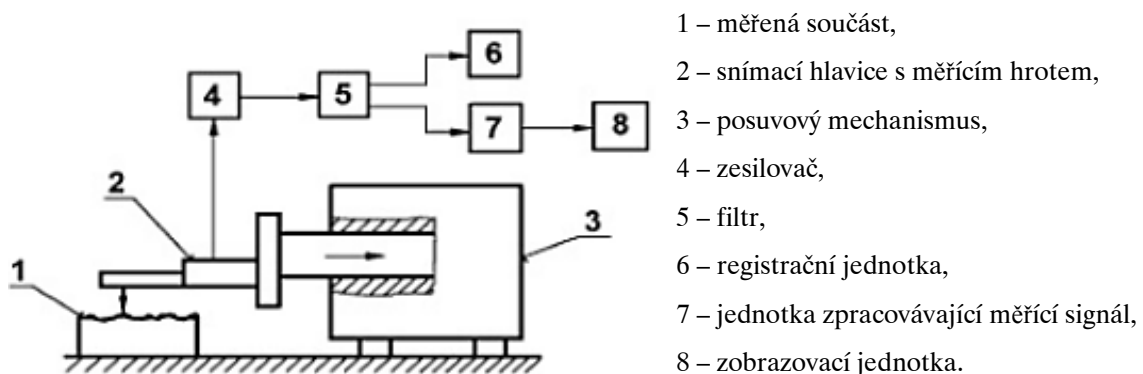
Vyhodnocování textury povrchu dotykovou metodou je tradiční a v průmyslu nejčastěji používaný způsob měření. Tato metoda umožňuje zjišťování číselných hodnot jednotlivých parametrů drsnosti. Můžeme ji využívat pro nejmodernější statistická a spektrální hodnocení nerovností povrchu. Dotykový měřicí přístroj zkoumá dané povrchy snímacím hrotem, získává úchytky ve formě profilu povrchu, vypočítává parametry a zároveň tento profil zaznamenává. Skládá se z elektrické a mechanické části. [10,16]

Mechanická část - obsahuje stůl, na který se umísťuje měřená součást, rameno se snímacím hrotem, které se pohybuje konstantní rychlostí a elektromotorek zajišťující přímočarý vratný pohyb. [16]

Elektrická část – transformuje mechanický signál generovaný snímacím hrotem sledujícím nerovnosti povrchu měřené plochy na elektrický signál, který je zpracováván. Pohyb snímacího hrotu musí být přesný (přímý, rovnoměrný). Rychlost musí být volena s ohledem na dynamické vlastnosti snímacího systému. Vlastnosti snímacího systému ovlivňují získaný profil. [16]

Výhodou kontaktního měření oproti optickému je větší tolerance vůči znečištění. Snímací hrot odsunuje malé nečistoty a nevádí mu olejová vrstva. Optická sonda vyžaduje čistý měřený povrch. Velkou výhodou je snadná obsluha zařízení, rychlost měření a malé rozměry snímače. [17]

Dotykovým měřením nemůžeme změřit technické povrchy, kde velké rozměrové rozdíly profilu povrchu znemožňují použití snímacího hrotu. [17]

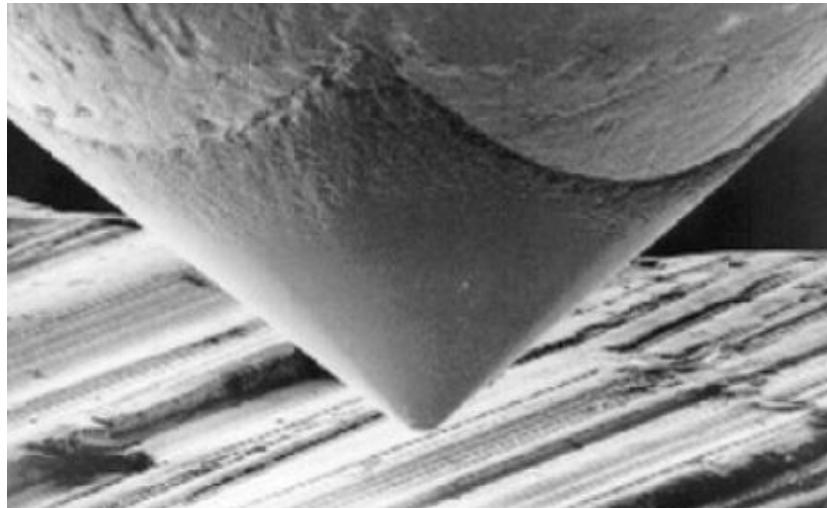


Obr. 17 Dotykový profilometr. [16]



*Měřicí hrot* – je přitlačován k povrchu tahovou silou, aby při pohybu snímače byla jeho špička neustále ve styku s měřeným povrchem (Obr. 18). Zda dojde při měření k zachycení celého tvaru nerovnosti na dno největších prohlubní, závisí na geometrii hrotu (tj. na poloměru kulového zakončení hrotu a na jeho vrcholovém úhlu).

Ideální tvar snímacího hrotu je dle normy ČSN EN ISO 3274 kužel s kulovou špičkou. Jeho jmenovitý poloměr zaoblení špičky je 2  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$  nebo 10  $\mu\text{m}$ . Úhel kužele je 60° nebo 90°.

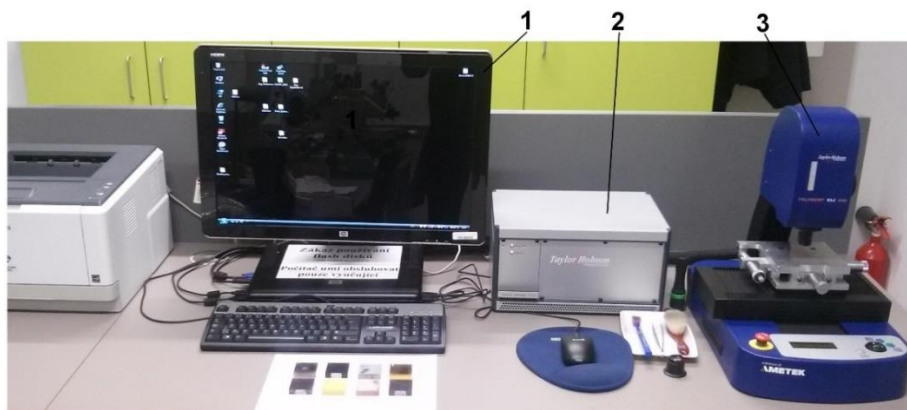


*Obr. 18 Měřicí hrot [17]*

### **3.3 BEZKONTAKTNÍ SNÍMÁNÍ JAKOSTI POVRCHU**

Používá se při měření povrchů citlivých na mechanické poškození, měkkých materiálů apod. Kontrolovaný povrch je sledován zaostřenou měřicí hlavou. Při měření se využívá světelného paprsku, který se odráží nebo rozptyluje na zkoumaném povrchu.

Nejznámějším tradičním výrobcem měřicí techniky je tradiční Taylor Hobson Ltd., který vyrábí vysoce kvalitní systémy, přístroje na měření tvaru a textury povrchu, je aktivně zapojen do přípravy i normalizace metodik měření, zpracování výsledků a jejich vyhodnocení formou parametrů. Dále nabízí plynule inovovaný komplexní program prostorového hodnocení textury povrchu Talymap. [18]



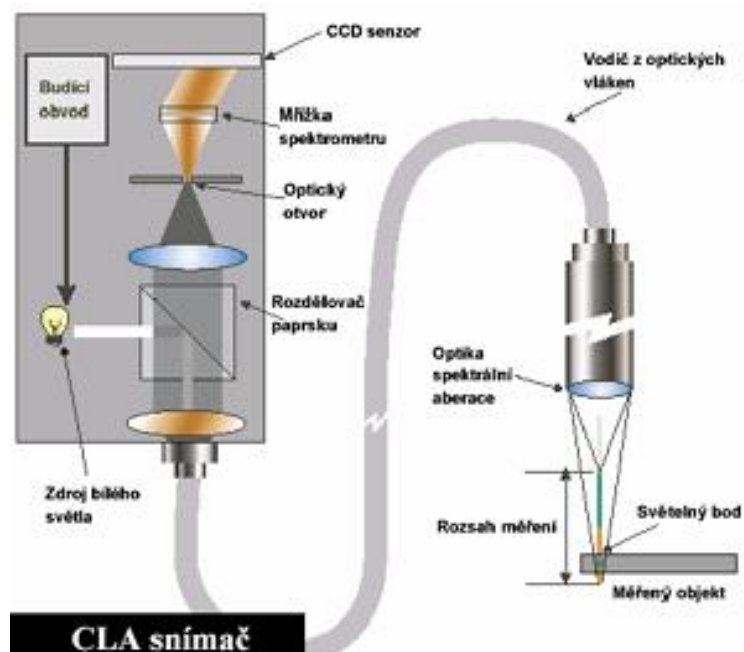
Obr. 19 Bezkontaktní způsob snímání povrchu

1 – vyhodnocovací zařízení, 2 – zdroj, 3 – Talysurf CLI 500

### 3.3.1 Měřicí systémy pro bezkontaktní způsob snímání povrchu

CLA snímač – vysoce přesný bezkontaktní snímač (Obr. 20). Bílé světlo se rozkládá a optická sonda se spektrální aberací ho směřuje na kontrolovaný povrch. Optika rozkládá světlo podle vlnových délek a v každém bodě povrchu je zaostřena jen určitá vlnová délka. Odražené světlo z povrchu prochází otvorem, který propouští jen světlo zaostřené vlnové délky. Spektrometr vychýlí světlo na CCD senzor, kde je každému bodu přiřazena prostorová poloha. [19]

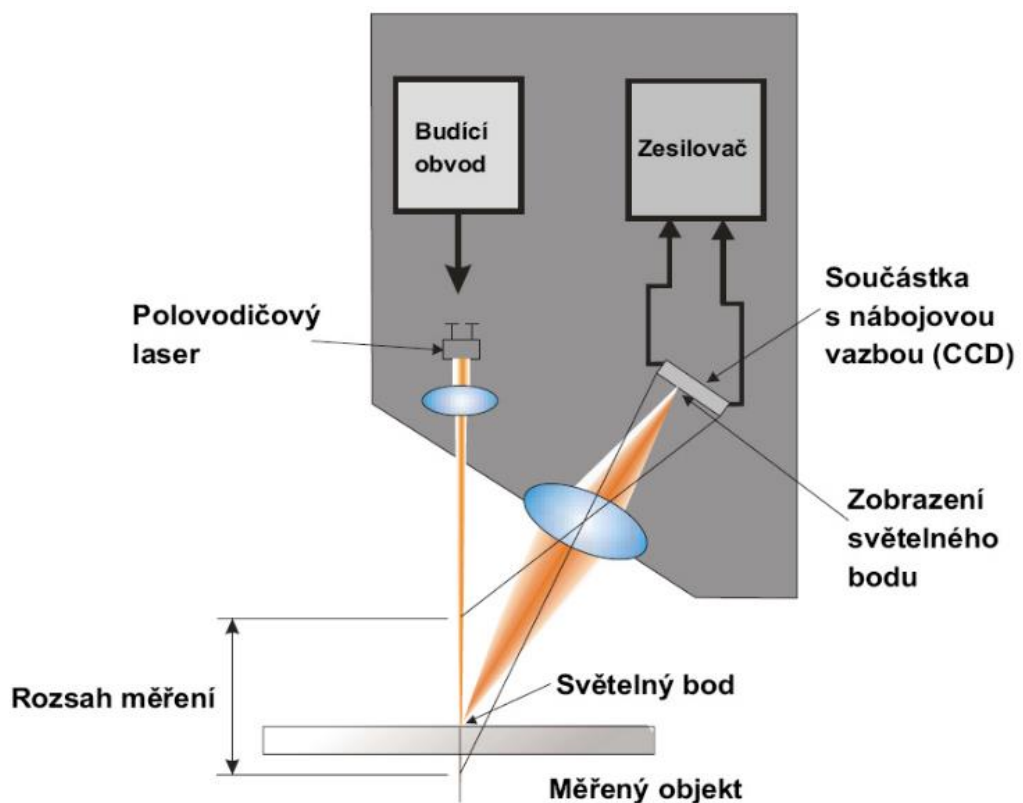
Mezi výhody CLA snímače patří vynikající rozlišení, rychlost snímání, vysoká přesnost a bezdotykové snímání. [19]



Obr. 20 CLA snímač [19]

*Laserový triangulační snímač* – rychlý bezkontaktní snímač (Obr. 21). Paprsek polovodičového laseru se odrazí od měřeného povrchu do přijímacího optického systému. Paprsek je zaostřen na CCD snímacím poli. CCD zajišťuje špičkovou hodnotu rozdělení množství světla v bodě paprsku. CCD obrazové prvky (jednotlivé CCD snímané element) na ploše bodu paprsku jsou použity pro určení přesné polohy zaměřeného bodu. [19]

Výhodou laserového triangulačního snímače je široký rozsah, rychlost kontroly, efektivní cena a bezdotykové snímání. [19]



Obr. 21 Schéma laserového snímače. [19]

### 3.3.2 Program Talymap

Výkonný program pro analýzu dat, který je základem vybavení přístrojů Talysurf CLI. Zabezpečuje veškeré řídicí, kontrolní, vyhodnocovací a informační služby. Zahrnuje standardní funkce vyhodnocení struktury povrchu 2D a 3D, včetně vyjmutí profilu 2D z povrchu 3D, měření ploch, objemů, výšky a vzdálenosti stupňů, analýzy výstupků, apod. Zajišťuje rychlejší proces analýzy i jednotnou formu prezentace výsledků měření. [19]

### **3.4 POROVNÁNÍ KONTAKTNÍHO A BEZKONTAKTNÍHO SNÍMÁNÍ JAKOSTI POVRCHU**

#### **3.4.1 Výhody kontaktního snímání jakosti povrchu**

- Lze měřit součásti, které nejsou ve vodorovné poloze.
- Postupy měření jsou uznávány a rozšířeny.
- Překoná zbytky materiálu a olejový film.
- Jednoznačně definované ISO standardy a povrchy.

#### **3.4.2 Výhody bezkontaktního snímání jakosti povrchu**

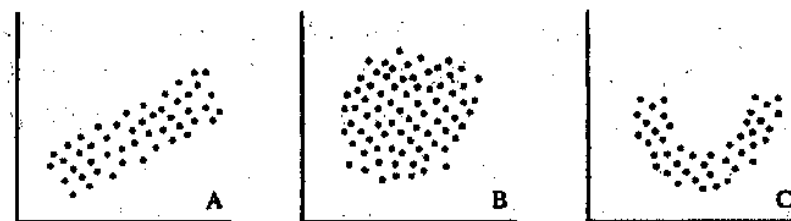
- Můžeme měřit na citlivých, pružných a měkkých materiálech.
- Součást nemůže poškodit snímač.
- Vysoká rychlost měření (oboustranné snímání povrchu snižuje dobu cyklu).
- Je možné bezpečně přejít jevy, které se vymykají rozsahu (hrany apod.).

## 4 MATEMATICKÝ PRINCIP KORELACE

### 4.1 KORELACE

*Korelace* – jde o matematický popis systematických okolností, které provází statistické závislosti. Znázorňuje relativní míru závislosti vzájemného vývoje dvou časových řad. Při korelaci se prolíná výpočetní a interpolační hledisko. Klade se větší důraz na intenzitu (sílu) vzájemného vztahu než na zkoumání veličin ve směru příčina – následek. [13,20]

Čím jsou empirické hodnoty méně rozptýleny kolem regresivní čáry, tím jsou závislosti těsnější. Jsou-li hodnoty více rozptýleny kolem regresivní osy, jedná se o volnější závislosti. [12]



Obr. 22 Typy statistických závislostí [13]

A – Těsná (silná) lineární závislost

B – Volná (slabá) závislost

C – Silná nelineární závislost

### 4.2 PARAMETRY KORELACE

- *Koeficient korelace* – bezrozměrná veličina, která se využívá pro hodnocení lineární závislosti v intervalu  $(-1, 1)$ . Jestliže se hodnoty korelace blíží 1, dané časové řady se vyvíjí skoro shodně a vykazují stejnou relativní míru ve společném vývoji. Pokud se hodnoty korelace blíží hodnotě -1, časové řady mají v časovém vývoji naprosto opačný směr. Neexistuje-li lineární závislost, je rovna nule. [20]

$$r_{yx} = r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2\right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2\right)}} \quad (9)$$

$r_{xy}$  ... výběrový koeficient korelace

$r_{yx} = r_{xy}$  ... záměna souřadnicového systému nemá vliv na velikost koeficientu korelace  $r$

Jestliže se soubor výběrových koeficientů korelace blíží 0, má přibližně normální rozdělení se střední hodnotou  $\bar{r}$  a směrodatnou odchylkou  $s_r$ . [13]

- Směrodatná odchylka - charakterizuje rozptyl naměřených hodnot kolem výběrového průměru  $\bar{X}$ . Vypočítá se jako odmocnina z rozptylu  $S^2$ . [3]

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (10)$$

- Hodnota testovacího kritéria t: platí pro předpoklad, že  $\rho = 0$ .

$$t = \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \sqrt{n-2} \quad (11)$$

- Koeficient determinace  $r_{yx}^2$  - kvadrát, jehož stonásobek vyjadřuje procentuální závislost mezi veličinami  $x, y$ . [13]
- Index korelace  $I_{yx}$  - měří těsnost lineární závislosti, kde  $I_{yx} > |r_{xy}|$ . Slouží ke zjištění, zda použitá regresivní čára dobře aproximuje pozorované hodnoty. Nabývá hodnot v intervalu  $\langle 0,1 \rangle$ . Čím blíže je k jedničce, tím je sledovaná závislost těsnější. U indexu korelace neplatí  $I_{xy} = I_{yx}$ . [13]

$$I_{xy} = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n \hat{y}_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2)}} \quad (12)$$

- Index determinace  $I_{yx}^2$  - kvadrát, který je-li vynásobený stem, udává v procentech, jaký podíl variability hodnot proměnné  $y$  lze vysvětlit regresní funkcí. [13]
- Korelační poměr  $\eta_{yx}$  - rozptyl výběrových parametrů  $\bar{y}$ . Využívá se v případech, kdy nedovedeme vyjádřit závislost analytickou funkcí (pomocí metody nejmenších čtverců) nebo, když je regresivní funkce příliš složitá, ztěžující praktickou interpretaci. Nabývá hodnot v intervalu  $\langle 0,1 \rangle$ . [13]

$$\eta_{yx} = \sqrt{\frac{s_{\bar{y}}^2}{s_y^2}} \quad (13)$$

Intervalové rozdělení četností  $y_i$ :

$$s_{\bar{y}}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^r (\bar{y}_i - \bar{y})^2 n_i \quad (14)$$

$\bar{y}_i$  ... rozptyl výběrových průměrů

$r$  ... počet intervalů, do kterých je celý interval rozdělen

Poměr determinace  $\eta_{yx}^2$  - jeho stonásobek vyjadřuje procentuální závislost mezi veličinami  $x, y$ . [13]

- Spearmanův koeficient korelace – počítá míru vzájemné závislosti hodnot  $x$ ,  $y$ . Používá se v případech, jsou-li hodnoty  $x$ ,  $y$  zadány pouze pořadím v intervalu  $(-1, 1)$ . [19]

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (15)$$

$d_i$  ... *diference pořadí znaků  $x$  a  $y$*

### 4.3 ČASOVÁ ŘADA

Časová řada – posloupnost hodnot, měřených v rovnoměrných (ekvidistantních) časových intervalech. Hodnoty jsou seřazeny chronologicky od minulosti do přítomnosti. Pro zobrazení časových řad se využívají spojnicové grafy, kde na *ose y* jsou znázorněny naměřené hodnoty a *osu x* tvoří časová proměnná. [21,22]

#### 4.3.1 Rozdělení časových řad

##### Stacionární a nestacionární časová řada:

- Stacionární časová řada – u této časové řady nejsme schopni na základě zjištěných statistických parametrů (rozptyl, aritmetický průměr) odlišit jeden úsek řady od druhého. [20]
- Nestacionární časová řada – tato řada vykazuje změny v chování, tzn. aritmetický průměr hodnot je na začátku řady signifikantně jiný než průměr členů na konci. [19]

##### Podle charakteru ukazatele:

- Okamžité – hodnota ukazatele k určitému okamžiku.
- Intervalové – velikost sledovaného ukazatele závisí na délce sledovaného intervalu.

##### Podle druhu ukazatelů:

- Absolutní ukazatele – očištěné
- Odvozené ukazatele – součtové, poměrové

### 4.3.2 Popisné charakteristiky časových řad

#### Charakteristiky polohy (průměry)

- Prostý aritmetický průměr:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{t=1}^n y_t}{n} \quad (16)$$

- Vážený aritmetický průměr:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{t=1}^n v_t y_t}{\sum_{t=1}^n v_t} \quad (17)$$

$v_t$  ... váha ukazatele

$y_t$  ... ukazatel

$t$  ... čas

- Vážený chronologický průměr:

$$\bar{y}_{ch} = \frac{\frac{y_1+y_2}{2}d_2 + \frac{y_2+y_3}{2}d_3 + \dots + \frac{y_{n-1}+y_n}{2}d_n}{d_1+d_2+\dots+d_n} \quad (18)$$

$d_t$  ... délka jednotlivých časových intervalů

#### Charakteristiky variability

- Rozptyl – aritmetický průměr kvadrátů odchylek od aritmetického průměru. [20]

$$s_y^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2 \quad (19)$$

- směrová odchylka:

$$s_y = \sqrt{s_y^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2} \quad (20)$$

#### Míra dynamiky

Míry dynamiky - umožňují charakterizovat základní rysy chování časových řad. [21]

- absolutní přírůstek (první diference):

$$\Delta y_t = y_t - y_{t-1} \quad (21)$$

- průměrný absolutní přírůstek:

$$\bar{\Delta} = \frac{\sum_{t=2}^n \Delta y_t}{n-1} = \frac{y_n - y_1}{n-1} \quad (22)$$

- koeficient růstu:

$$k_t = \frac{y_t}{y_{t-1}} \quad (23)$$



- průměrný koeficient růstu:

$$\bar{k} = \sqrt[n-1]{k_2 \cdot k_3 \dots k_n} = \sqrt[n-1]{\frac{y_n}{y_1}} \quad (24)$$

- meziroční koeficient růstu:

$$k_{(4),t} = \frac{y_t}{y_{t-4}} \quad (25)$$

- relativní přírůstek:

$$\delta_t = \frac{\Delta y_t}{y_{t-1}} = \frac{y_t}{y_{t-1}} - 1 \quad (26)$$

- průměrný relativní přírůstek:

$$VR\bar{\delta} = \bar{k} - 1 \quad (27)$$

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 PŘEHLED ZKUŠEBNÍCH DESTIČEK

Tab. 1 Přehled destiček.

<i>Název</i>	<i>Označení vzorku</i>	<i>Materiál</i>	<i>Tepelné zpracování</i>	<i>Povlak</i>	<i>Metoda povlakování</i>
Zkušební destička 1	1	1.2343	Kalit 50±2 HRC	TiB <sub>2</sub>	PAPVD
Zkušební destička 2	10	1.2343	Kalit 50±2 HRC	CrN	PVD
Zkušební destička 3	12	1.2343	Kalit 50±2 HRC	CrN	PVD
Zkušební destička 4	14	1.2343	Kalit 50±2 HRC	TiN	PVD
Zkušební destička 5	19	1.2343	Kalit 50±2 HRC	TiAlN	PVD
Zkušební destička 6	20	1.2343	Kalit 50±2 HRC	TiN	PVD
Zkušební destička 7	24	1.2343	Kalit 40±2 HRC	TiCN	PAPVD
Zkušební destička 8	29	1.2343	Kalit 40±2 HRC	TiAlN	PVD



Obr. 23 Skutečný povrch zkušební destičky 1



Obr. 24 Skutečný povrch zkušební destičky 2



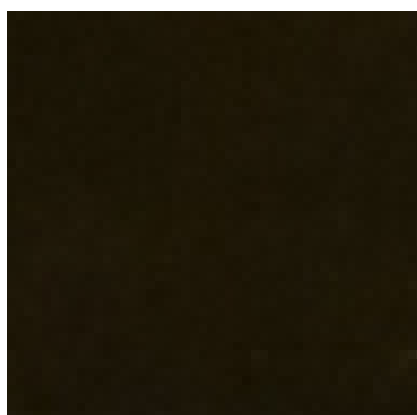
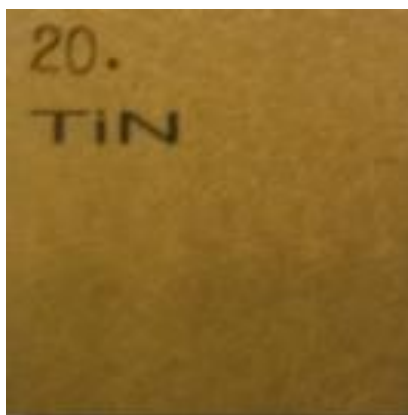
*Obr. 25 Skutečný povrch zkušební destičky 3*



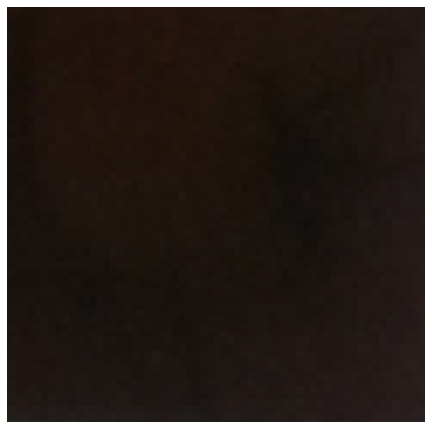
*Obr. 26 Skutečný povrch zkušební destičky 4*



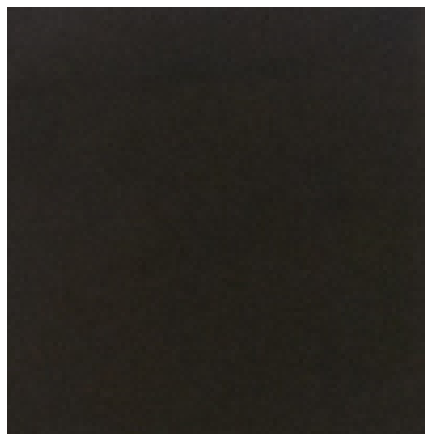
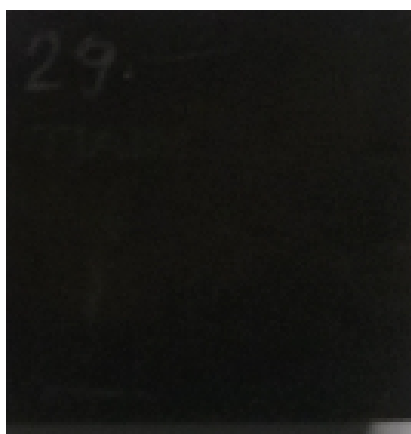
*Obr. 27 Skutečný povrch zkušební destičky 5*



*Obr. 28 Skutečný povrch zkušební destičky 6*



*Obr. 29 Skutečný povrch zkušební destičky 7*



*Obr. 30 Skutečný povrch zkušební destičky 8*

## 5.1 MATERIÁL OBROBKU

### 5.1.1 Ušlechtilá ocel 1.2343

<i>DIN-označení:</i>	X38 CrMoV 5 1					
<i>Pevnost: (N/mm<sup>2</sup>)</i>	±780					
<i>Směrová analýza: (%)</i>	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
	0,38	1,0	0,4	5,3	1,2	0,4

#### *Tepelné zpracování:*

- *Měkké žíhání* – 800-840, 3-6 hodin s pomalým ochlazováním v peci.
- *Žíhání za nízkého napětí* – slouží k odstranění napětí po hrubém opracování k zamezení deformace při kalení. 600-650, 2-3 hodiny za pomalého ohřívání a chlazení.
- *Kalení* – předehřívát ve stupních na 400 a 800, poté uvést na kalící teplotu 1000-1500.
- *Ochlazování* – po ochlazení na teplotu cca 100 musí být výrobky převedeny okamžitě do vyhřáté popouštěcí pece.
- *Popouštění* – asi 1 hodina na každých 20 mm tloušťky stěny, nejméně však 2-3 hodin. Vícenásobné popouštění zvyšuje houževnatost a odolnost proti změně teploty.

## 5.2 NANÁŠENÍ PVD POVLAKŮ

Povlaky PVD (Physical Vapour Deposition) jsou vytvářeny za nízkého tlaku (0,1 – 1,0 Pa) kondenzací částic, které jsou uvolňovány ze zdroje částic fyzikálními metodami rozprašováním nebo odpařováním. Uvolněné částice jsou ionizovány, reagují s atmosférou komory a záporným předpětím jsou urychlovány k povrchu substrátu, kde se usazují ve formě tenkého homogenního povlaku.

Povlak je tvořen z jednotlivých dopadajících atomů, které se na povrchu nejdříve zachytí procesy sorpce, dále se pohybují po povrchu a následně jsou buď trvale zachyceny, nebo zpětně uvolněny. Další dopadající atomy se spojí s dříve zachycenými atomy a postupně vytvářejí ionizované zárodky a ostrůvky rostoucí vrstvy. Ty se potom spojují a vytvářejí souvislou vrstvu, která dále roste a zvětšuje svoji tloušťku.

### 5.3 NANÁŠENÍ PAPVD POVLAKŮ

Na upravený povrch se nanášejí vrstvy 1  $\mu\text{m}$  z par kovů, nejčastěji titanu, odpařených elektronovým dělem za asistence vysokonapěťového pulzního plazmového oblouku zařízením HCA (High Current Pulsed Arc Evaporator), kdy dochází k vytvoření slitin Me-Zn se zinkem s lepší korozní odolností než čistý zinek. Následným krátkodobým žiháním lze vytvořit buď strukturu s vhodným gradientem koncentrace Me-Zn slitiny nebo vrstvu slitiny Me-Zn. Případně se vytváří kompozitní vrstvy s nitridem titanu TiN. Proces plazmově aktivovaného PVD (PAPVD) probíhá kontinuálně optimální rychlostí vyhovující všem procesům.

### 5.4 CHARAKTRISTIKA POUŽITÝCH POVLAKŮ

- **TiN** – základní a nejdéle používaná vrstva. Používá se pro obrábění nízkými řeznými rychlostmi oceli s nízkou pevností. Použitelná téměř u všech metod povlakování. Mikrotvrdotost je 20 až 25 GPa, zlatá barva. Má výbornou odolnost proti abrazivnímu opotřebení, dobrá elasticita a adheze, o 30-40% větší trvanlivost ostří oproti nepovlakovaným nástrojům. [23]
- **TiCN** – povlaky s vysokou odolností vůči otěru, s nízkým koeficientem tření. Mikrotvrdotost od 30 do 40 GPa, hnědo – černá barva. Povlak se používá pro frézování ocelí se středním obsahem uhlíku, s nižší až střední pevností a pro frézování šedé litiny. Má dobrou houževnatost a kvalitní chlazení. [23]
- **TiAlN** – univerzální povlak pro obrábění materiálů středních a vyšších pevností, středními a vyššími řeznými rychlostmi. Mikrotvrdotost od 25 do 30 GPa, fialová až černo – šedá barva. Má výbornou odolnost vůči vysokým teplotám, poměr tvrdosti a houževnatost. [23]
- **CrN** – nejlepší volba pro aplikace, kde je požadována odolnost proti otěru, korozi a oxidaci. Má vysokou tvrdost a přílnavost, velmi dobrá chemická odolnost a nízké napětí. Stříbrno – šedá barva. [23]
- **TiB<sub>2</sub>** – používá se pro vysoko-výkonné obrábění hliníku, hliníkových a neželezných slitin. Jeho extrémně hladký povrch redukuje tření nástroje, ulehčuje obrábění, s plynulejším odvodem třísky. Je velice odolný vůči abrazivnímu opotřebení. Stříbrno – šedá barva. [23]

## 6 MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ

### 6.1 TALYSURF CLI 500

Měřicí přístroj Talysurf typu CLI má malé rozměry a je ekonomicky i prostorově efektivní. Používá se především u rozměrů s malými rozměry. Analyzuje kvalitu jakosti povrchu z jednoho profilu řezu (2D) i profilu plochy povrchu (3D). Systém CLI umožňuje měření i analýzu povrchu ve třech osách (x, y, z), pro dotykové i bezdotykové měření.

Přístroj je vybaven programem Talymap, který vykonává řídicí, kontrolní, vyhodnocovací a informační služby. Umožňuje standardní funkce vyhodnocení povrchu ve 2D i 3D, např. měření ploch, objemů, výšky, analýza výstupků, nosného podílu, velikosti a hustotu zrn, vyjmutí povrchu 2D ze 3D, apod. Program využívá pro prostorové měření povrchu amplitudové parametry, parametry popisující materiálový poměr povrchu (ISO 13565-2), parametry vztahované k rozmístění nerovnosti a objemové parametry.



#### Parametry Talysurf CLI 500

- <u>Rozměry přístroje:</u>	500 x 310 x 450 mm
- <u>Měřicí prostor:</u>	50 x 50 x 50 mm
- <u>Délka posuvu:</u>	50 mm
- <u>Osové rozlišení:</u>	5 $\mu$ m
- <u>Nosnost:</u>	10 kg
- <u>Hmotnost:</u>	55 kg
- <u>Rychlost měření:</u>	0,5; 1; 5; 10; 15; 30 mm/s

Obr.31 Talysurf CLI 500. [24]



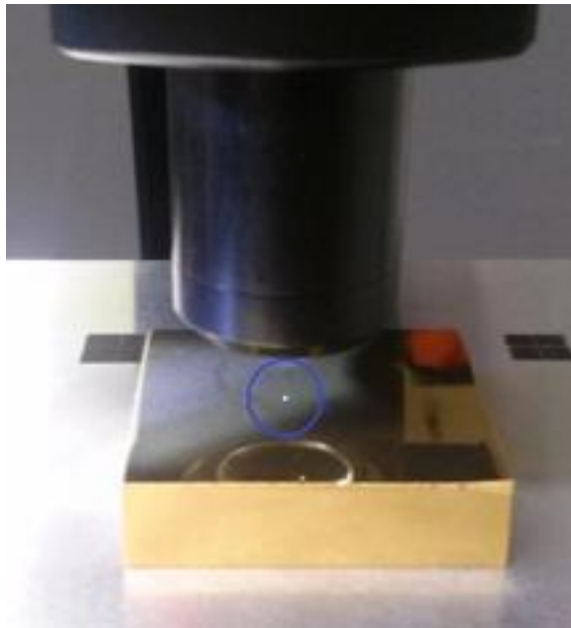
## 7 MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU

Měření jakosti povrchu zvolených materiálů bylo provedeno na bezdotykovém měřícím zařízení Talysurf CLI 500 od firmy Taylor & Hobson (Obr. 18).

Testovací materiály ve tvaru krychle byly upevněny na měřící plochu ve vodorovném směru s měřící čočkou (Obr. 32).

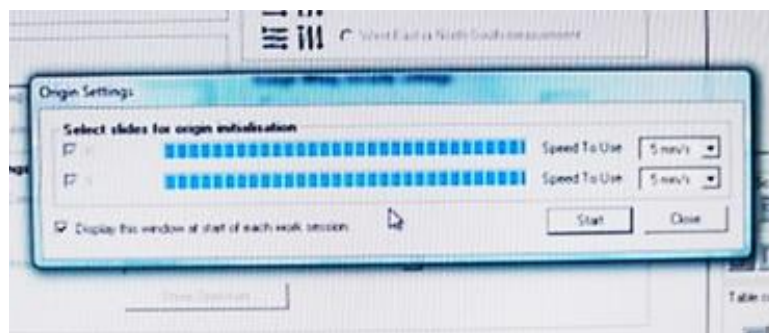


Obr. 32 Upevnění měřeného vzorku



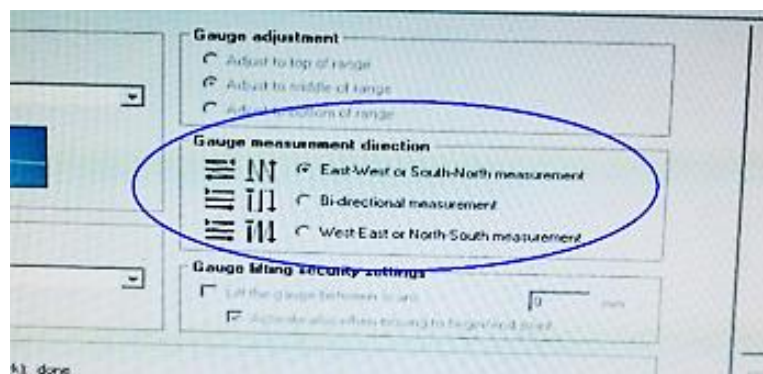
Obr. 33 Detail ustavení zkoumaného materiálu

Po usazení vzorku na pracovní plochu jsme spustili software, kde jsme nejprve spustili automatickou kalibraci přístroje (Obr. 34).



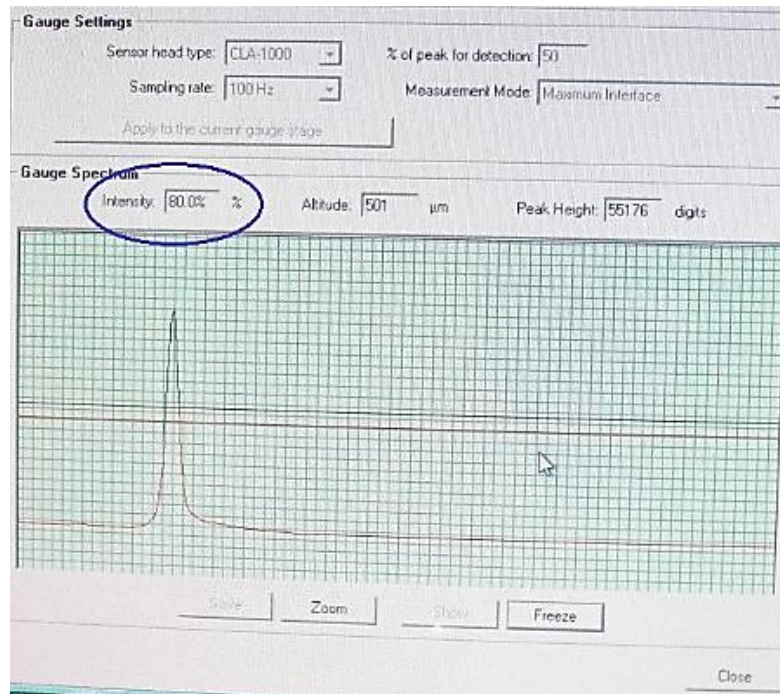
Obr. 34 Automatická kalibrace zařízení Talysurf CLI 500

Poté jsme nastavili směr měření (Obr. 35).



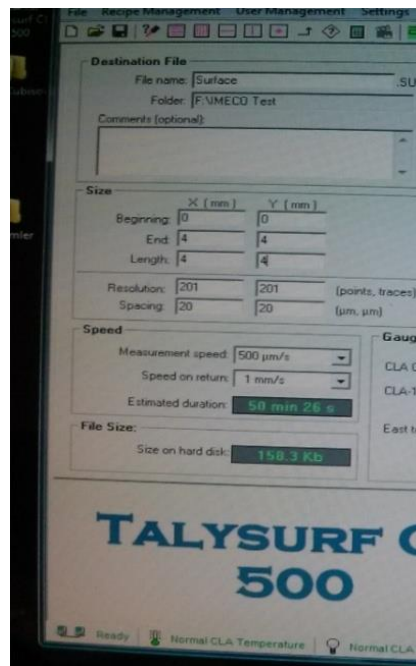
Obr. 35 Nastavení směru měření přístroje Talysurf CLI 500

V následujícím kroku se nastavila odrazivost přístroje (Obr. 36). Toho jsme dosáhli nastavením vzdálenosti snímací čočky přístroje a snímací plochy. Odrazivost by neměla být menší než 50%.



Obr. 36 Nastavení odrazivosti přístroje Talysurf CLI 500

Posledním krok před samostatným měřením zahrnoval nastavení parametrů pro snímání (Obr. 37).



Obr. 37 Parametry nastavení Talysurf CLI 500.

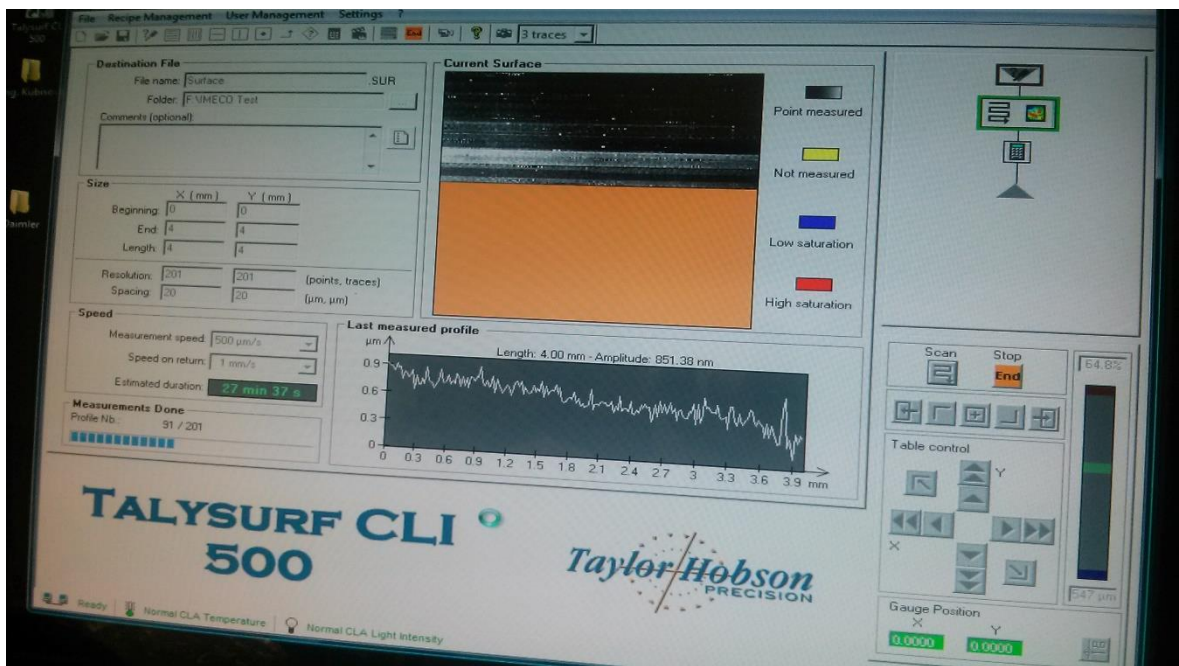
Nastavené parametry:

- Velikost snímané plochy: 4 x 4 mm
- Počet příčných a podélných řezů na snímací ploše: 201 x 201
- Rychlost posuvu při snímání: 500  $\mu\text{m/s}$
- Rychlost posuvu při návratu: 1  $\mu\text{m/s}$
- Počáteční a koncový bod snímání

Výsledné hodnoty:

- Přibližná doba snímání jednoho vzorku: 50 min

Po nastavení těchto parametrů jsme spustili snímání zadaných součástí kliknutím na tlačítko SCAN (Obr. 38).



Obr. 38 Částečné zobrazení povrchu snímaného materiálu

Následné zpracování naměřených dat bylo zpravováno v programu TalyMap.

## 8 PROGRAM TALYMAP

Z tohoto programu jsme získali potřebné snímky požadovaných materiálových vlastností.

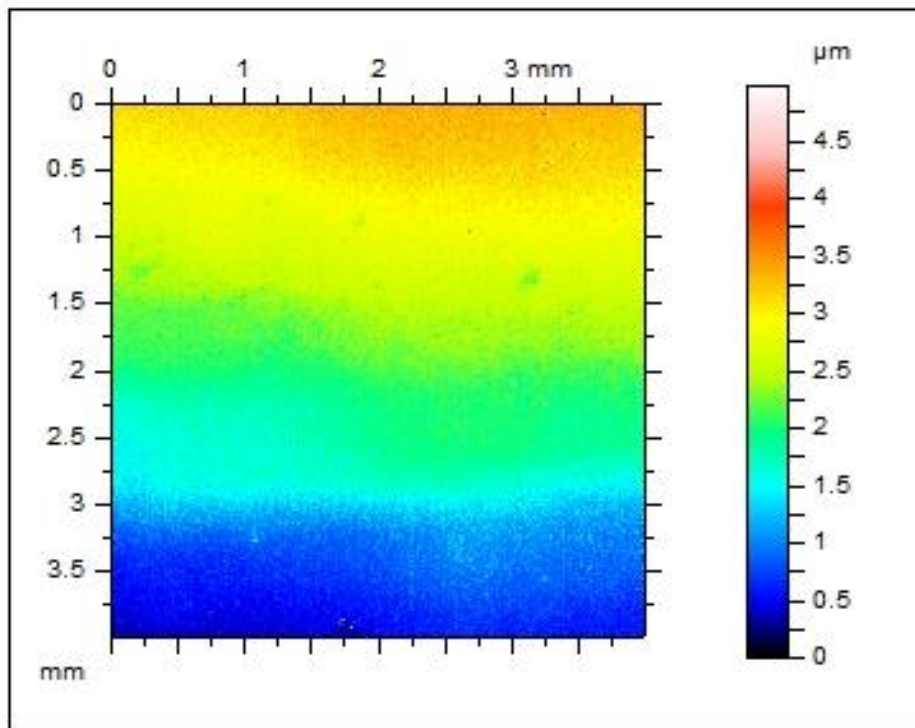
Parametry  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_v$ ,  $R_p$ ,  $R_t$  jsem získal dle norem ČSN EN ISO 4287 a ČSN EN ISO 4288.

### 8.1 MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI - zkušební destička 1

#### 8.1.1 Naskenované povrchy a naměřené hodnoty jakosti povrchu po povlakování

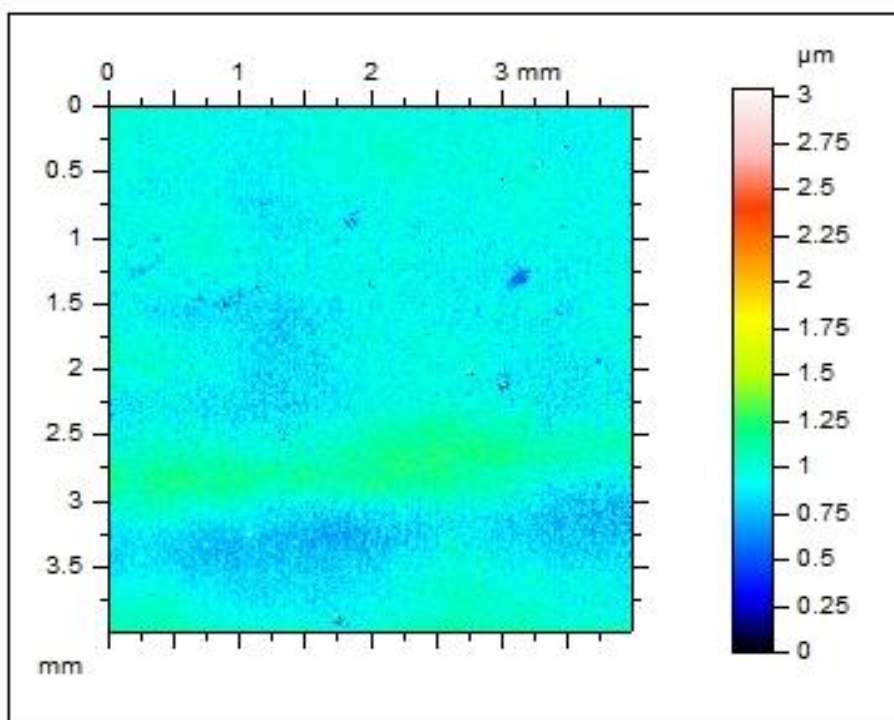
Pro vyhodnocení drsnosti povrchu jsem bylo zapotřebí odfiltrovat tvar a vlnitost.

Hodnocení proběhlo v souladu s normami ČSN ISO 4287 a ČSN ISO 4288.

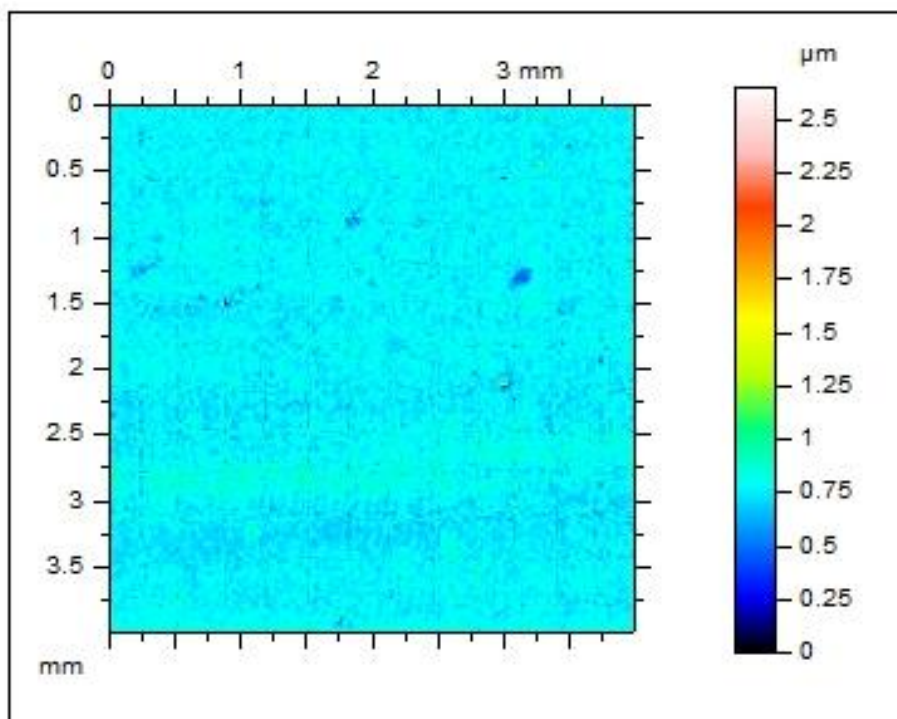


Obr. 39 Nasnímaný povrch zkušební destičky 1 - Tvar, drsnost, vlnitost

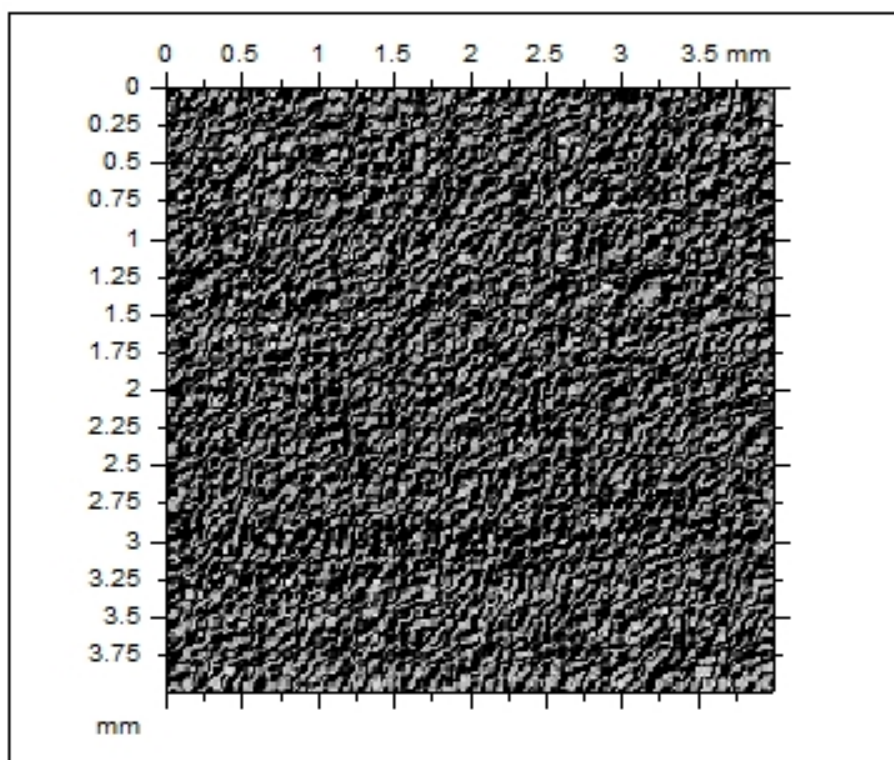
Vzniklé plochy obsahují 201 příčných a 201 podélných řezů ve směrech N-S (sever-jih) a W-E (západ-východ). Velikost snímané plochy je 4x4 mm.



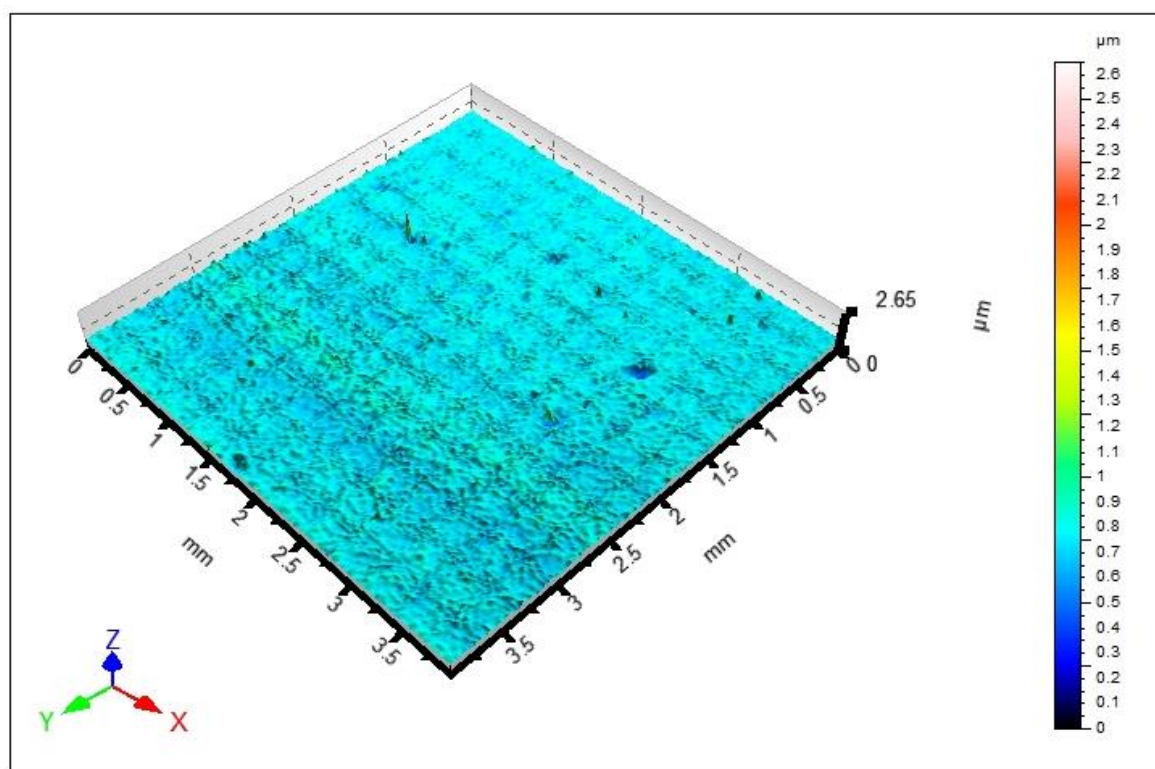
Obr. 40 Nasnímaný povrch zkušební destičky 1 - Drsnost, vlnitost



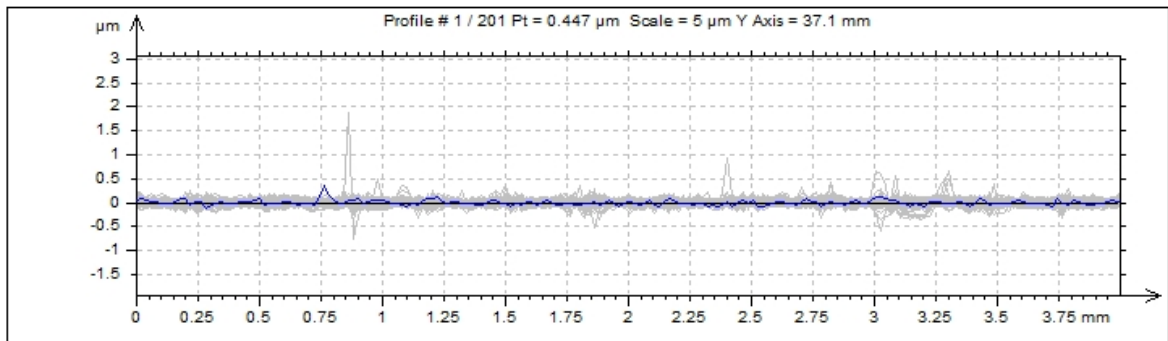
Obr. 41 Nasnímaný povrch zkušební destičky 1 – Drsnost



Obr. 42 - Fotosimulace drsnosti zkušební destičky 1



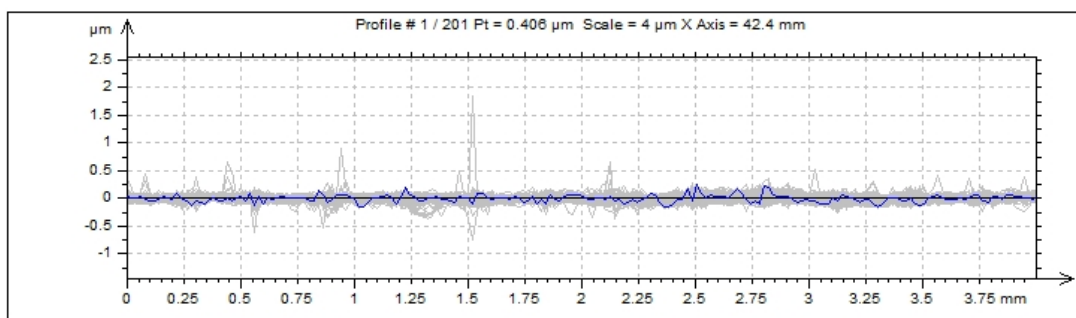
Obr. 43 Nasnímaný povrch zkušební destičky 1 - 3D pohled



Obr. 44 Zobrazení 201 řezů drsnosti ve směru W-E (východ-západ)

Tab. 2 Naměřená data z programu TalyMap ve směru W-E

ISO 4287						
		Mean	Std dev	Min	Max	Median
Amplitude parameters - Roughness profile						
Rp	µm	0.0892	0.0428	0.0535	0.527	0.0823
Rv	µm	0.0839	0.0248	0.0463	0.251	0.0798
Rz	µm	0.173	0.0602	0.108	0.777	0.164
Rc	µm	0.0935	0.0239	0.0599	0.251	0.0876
Rt	µm	0.258	0.156	0.133	1.92	0.222
Ra	µm	0.0295	0.00643	0.0192	0.0534	0.0286



Obr. 45 Zobrazení 201 řezů drsnosti ve směru N-S (sever-jih)



Tab. 3 Naměřená data z programu TalyMap ve směru N-S

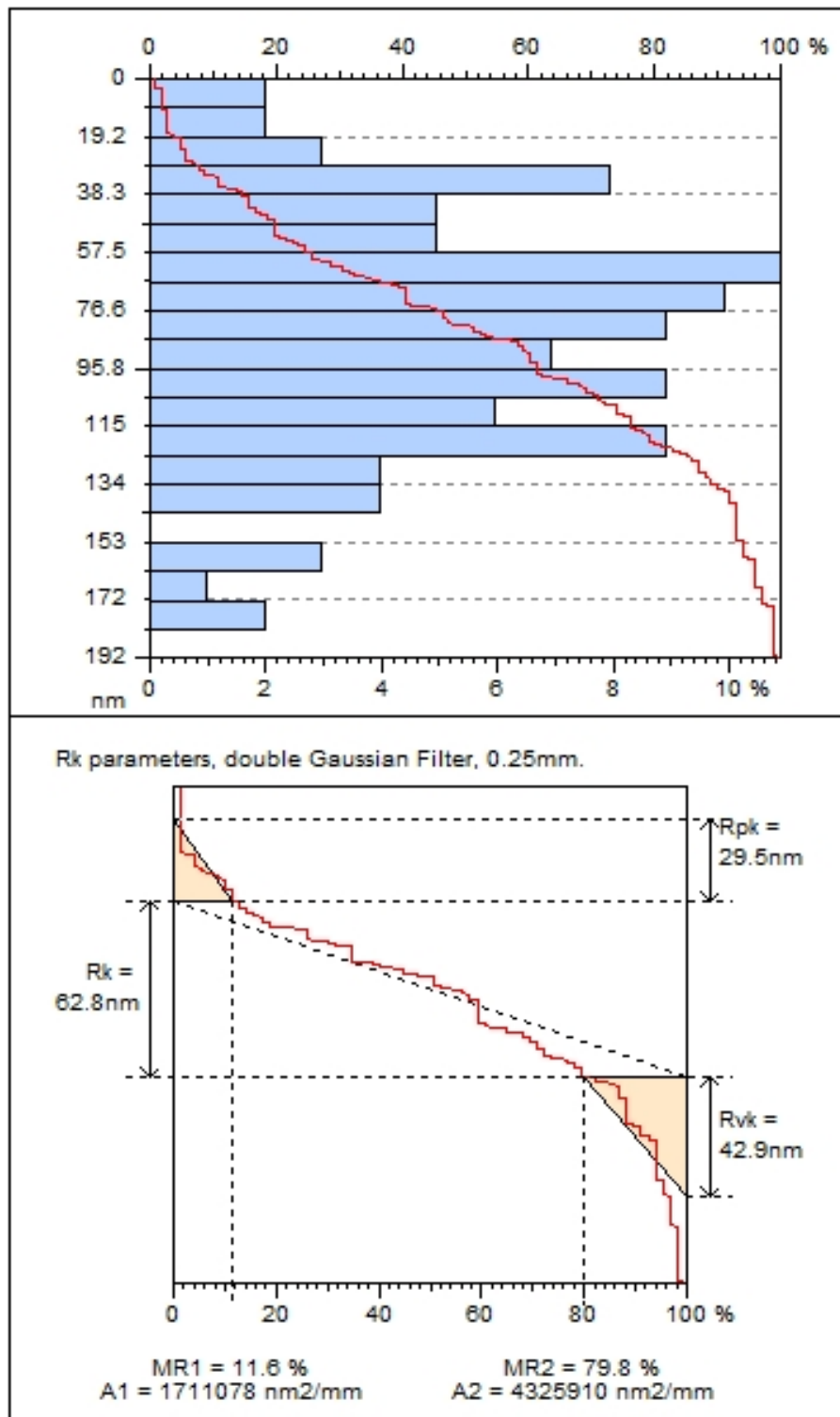
ISO 4287						
		Mean	Std dev	Min	Max	Median
Amplitude parameters - Roughness profile						
Rp	μm	0.0926	0.0461	0.047	0.554	0.0815
Rv	μm	0.0891	0.0315	0.046	0.294	0.0823
Rz	μm	0.182	0.0646	0.0973	0.66	0.166
Rc	μm	0.0979	0.0233	0.0608	0.228	0.0933
Rt	μm	0.267	0.152	0.123	1.69	0.228
Ra	μm	0.0304	0.0059	0.0194	0.0505	0.0288

Tab. 4 Naměřená 3D data  
z programu TalyMap

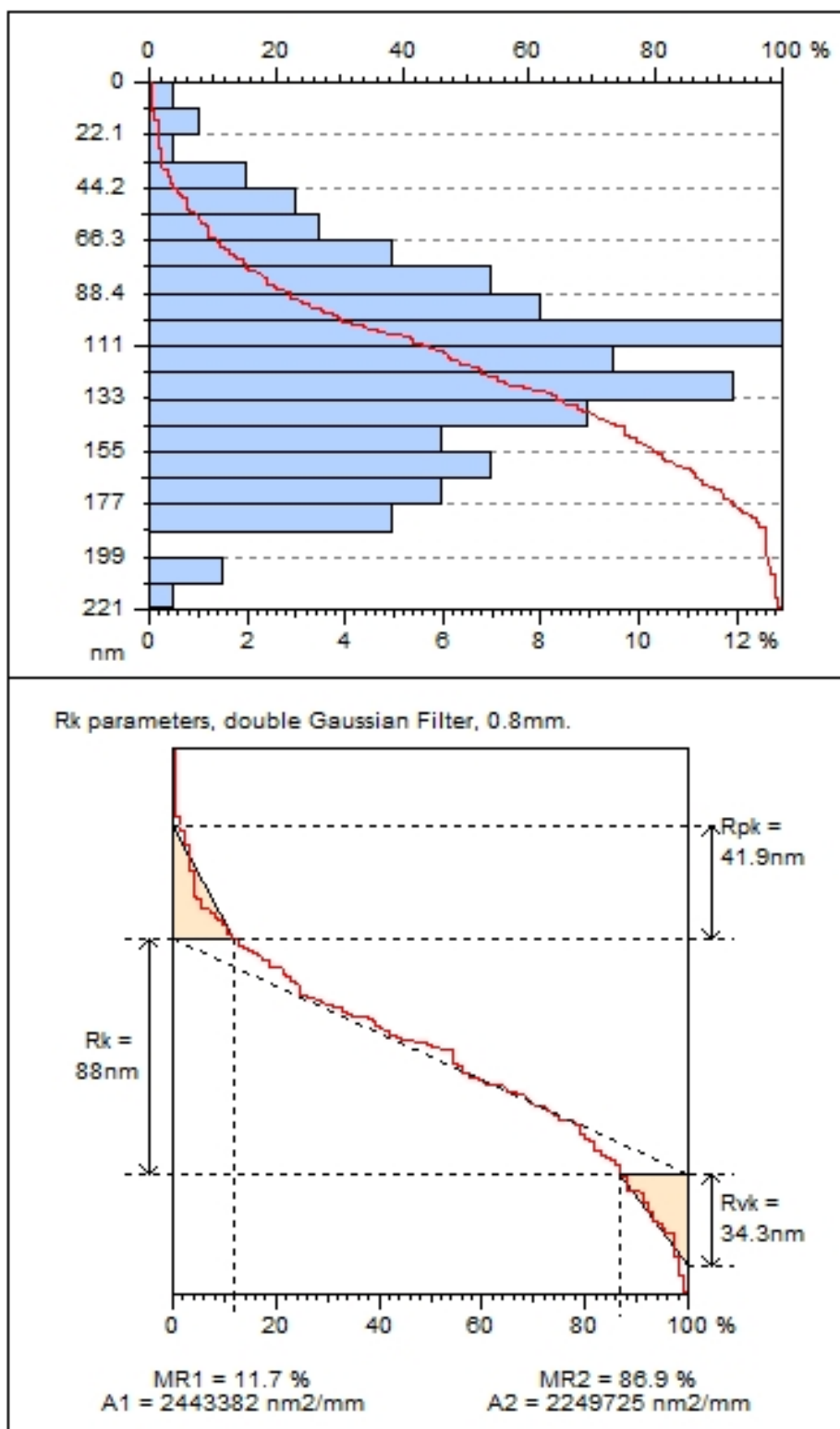
ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.0396	μm
Ssk	0.405	
Sku	13	
Sp	0.818	μm
Sv	0.498	μm
Sz	1.32	μm
Sa	0.0295	μm

### 8.1.2 Abbott Firestonova křivka

Velikost snímané plochy je 4x2 mm.



Obr. 46 Abbott Firestonova křivka pro řez ve směru W-E (východ-západ)

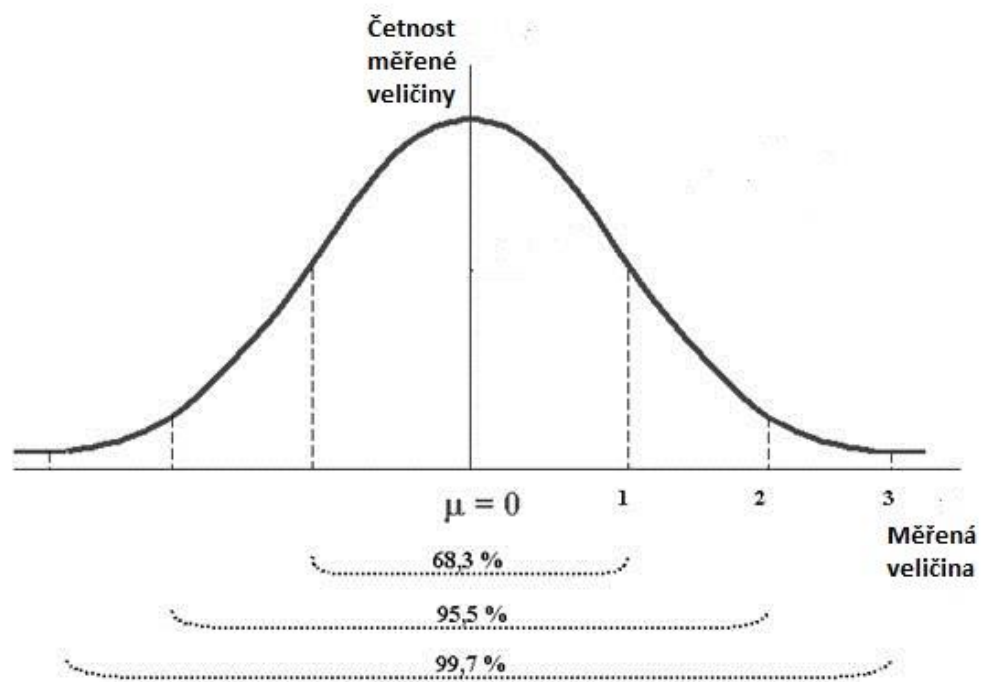


Obr. 47 Abbott Firestonova křivka ve směru N-S (sever-jih)

## 9 KORELACE MĚŘENÍ

### 9.1 GAUSSOVA KŘIVKA

Gaussova křivka (hustota pravděpodobnosti) popisuje normální rozdělení hodnot. Náhodné rozdělení plně charakterizuje *střední hodnota*  $\bar{X}$  a *rozptyl*  $S^2$ . Křivka je *symetrická*, tzn. výsledky vychýlení nad i pod střední hodnotou jsou přibližně stejně časté. Střední hodnota  $\bar{X}$  leží pod vrcholem křivky. Rozptyl  $S^2$  určuje, jak těsně přiléhá ke střední hodnotě  $\bar{X}$  (čím nižší je tento parametr, tím je křivka ostřejší). [25]



Obr. 48 Obecná Gaussova křivka

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

$\bar{X}$ ,  $S^2$  (latinka) .... charakteristiky výběru,

$\mu$ ,  $\sigma^2$  (řecká písmena) ... charakteristiky základního souboru,

## 9.2 POROVNÁNÍ NORMY ČSN EN ISO 4287 a ČSN EN ISO 25178-2

V normě ČSN EN ISO 25178-2 je definováno sedm výškových parametrů textury povrchu. Výškové parametry představují statistické charakteristiky výšky  $z(x, y)$  posuzované plochy. Tato norma vznikla za účelem zavedení nových 3D parametrů textury povrchu. Je analogií termínů profilových parametrů z normy ČSN EN ISO 4287.

2D Parametr  $R_a$  (průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu), který je popsán v normě ČSN EN ISO 4287 vyjadřuje stejné vlastnosti jako 3D parametr  $S_a$  (aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu) dle normy ČSN EN ISO 25178-2.

Měření povrchu 3D systémem je výrazně přesnější, protože má k hodnocení drsnosti povrchu větší soubor dat než 2D systémem.

### 9.2.1 ČSN EN ISO 4287

- Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu,  $R_a$  – aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic  $Z(x)$  v rozsahu základní délky  $l$ . [3]

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (30)$$

$Z(x)$  ... výška posuzovaného profilu v libovolné poloze  $X$ .

$l$  ... základní délka ve směru osy  $X$ , použitá pro rozpoznání nerovností charakterizujících vyhodnocovaný profil.

### 9.2.2 ČSN EN ISO 25178-2

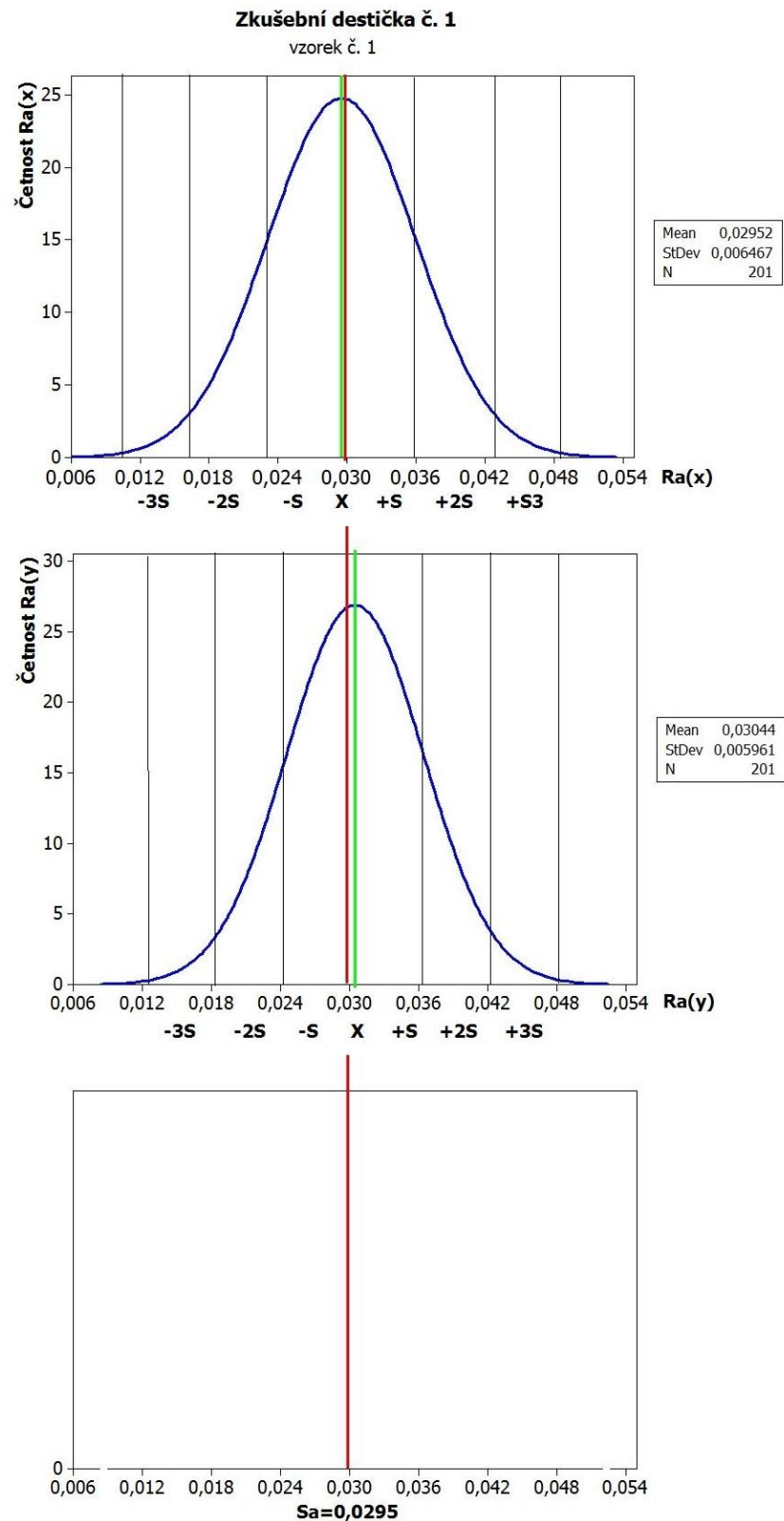
- Aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu,  $S_a$  – aritmetický průměr absolutních hodnot koordinace uvnitř určené plochy  $A$ . [8]

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(y, x)| dx dy \quad (31)$$

$A$  ... určená plocha

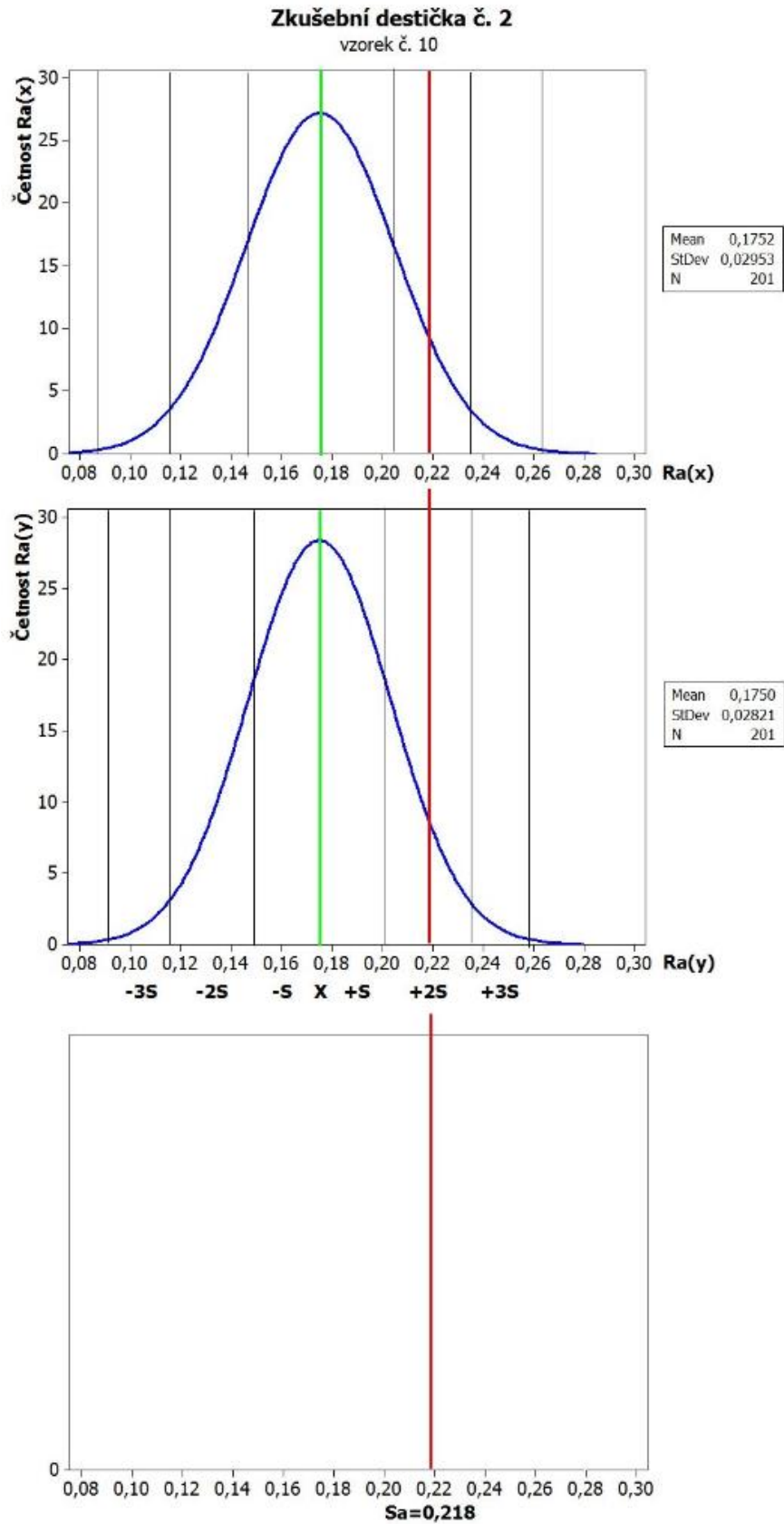
## 9.3 GAUSSOVO POROVNÁNÍ 2D a 3D VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

### 9.3.1 Gaussovo porovnání 2D a 3D měření - zkušební destička č. 1



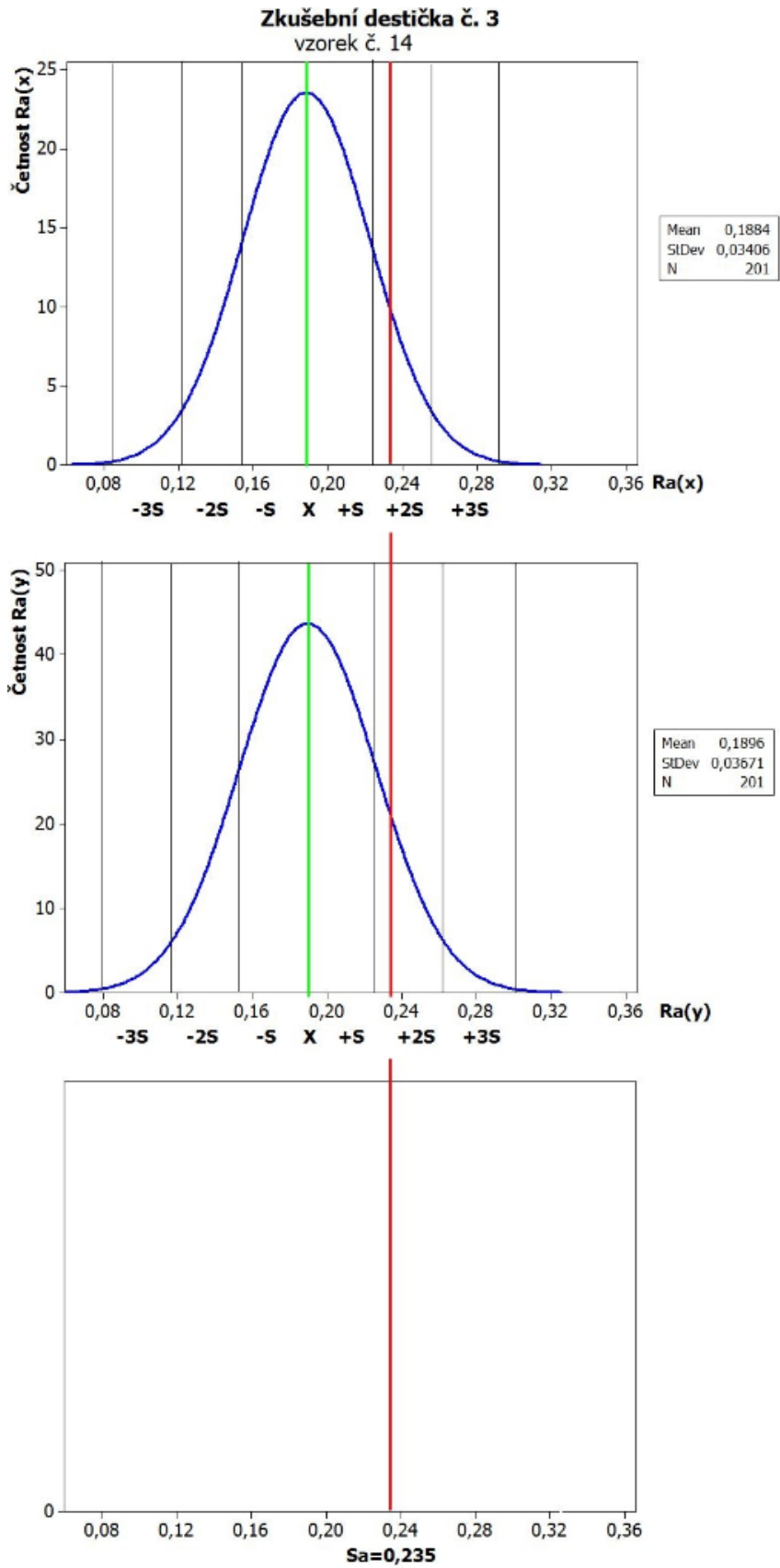
Obr. 49 Gaussovo porovnání – zkušební destička č. 1

9.3.2 Gaussovo porovnání 2D a 3D měření - zkušební destička č. 2



Obr. 50 Gaussovo porovnání – zkušební destička č. 2

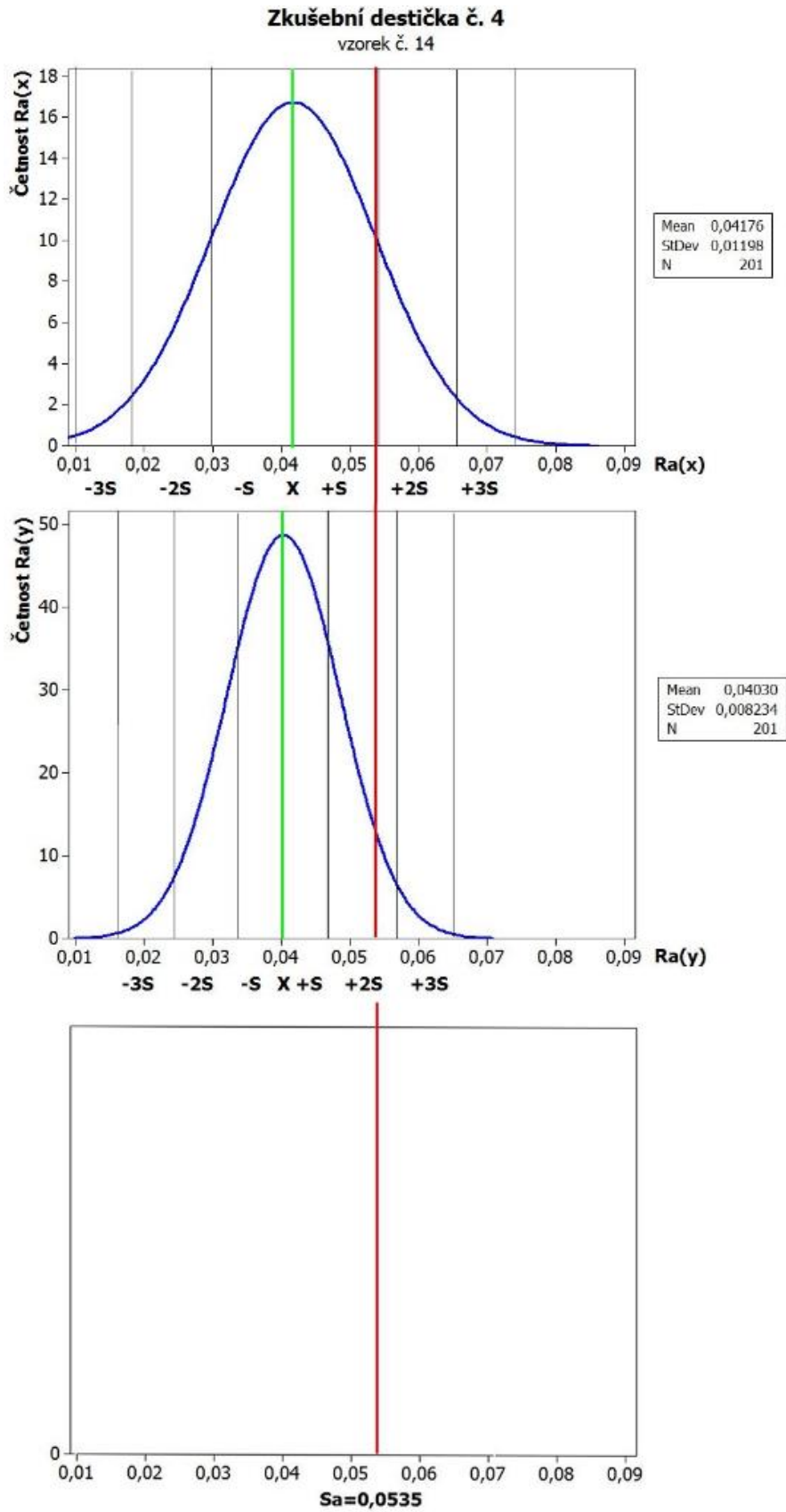
9.3.3 Gaussovo porovnání 2D a 3D měření - zkušební destička č. 3



Obr. 51 Gaussovo porovnání – zkušební destička č. 3

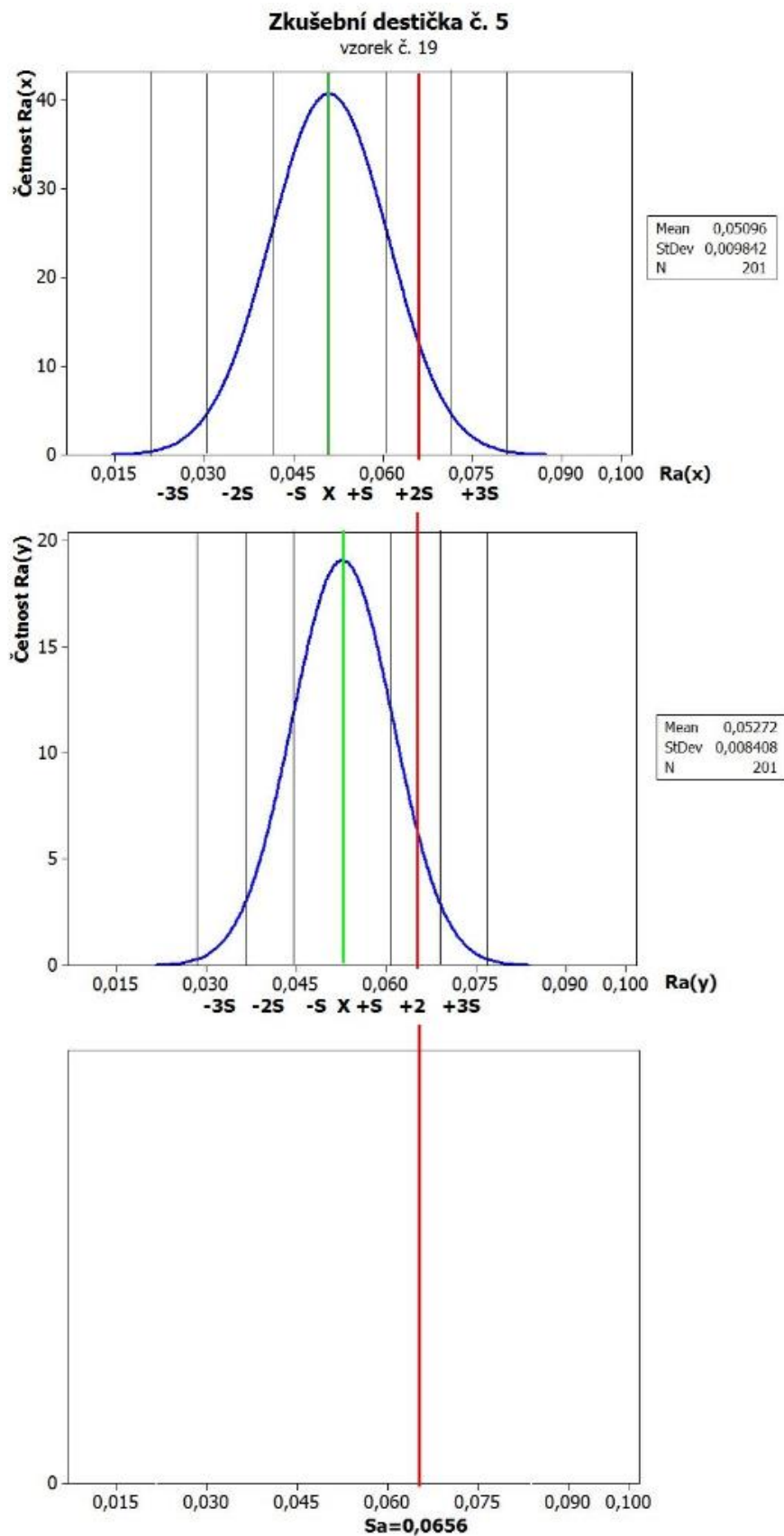


9.3.4 Gaussovo porovnání 2D a 3D měření - zkušební destička č. 4



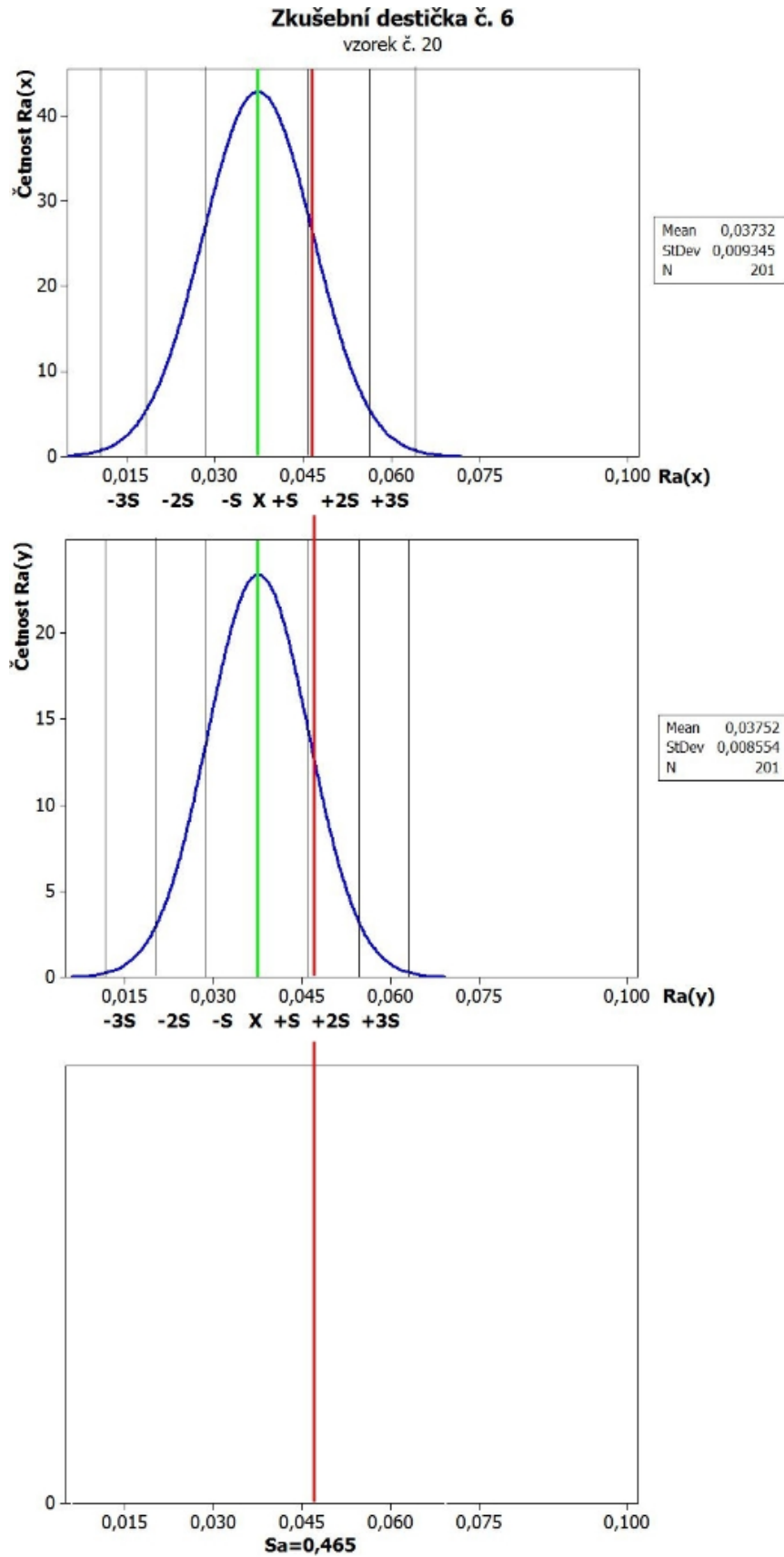
Obr. 52 Gaussovo porovnání – zkušební destička č. 4

9.3.5 Gaussovo porovnání 2D a 3D měření - zkušební destička č. 5



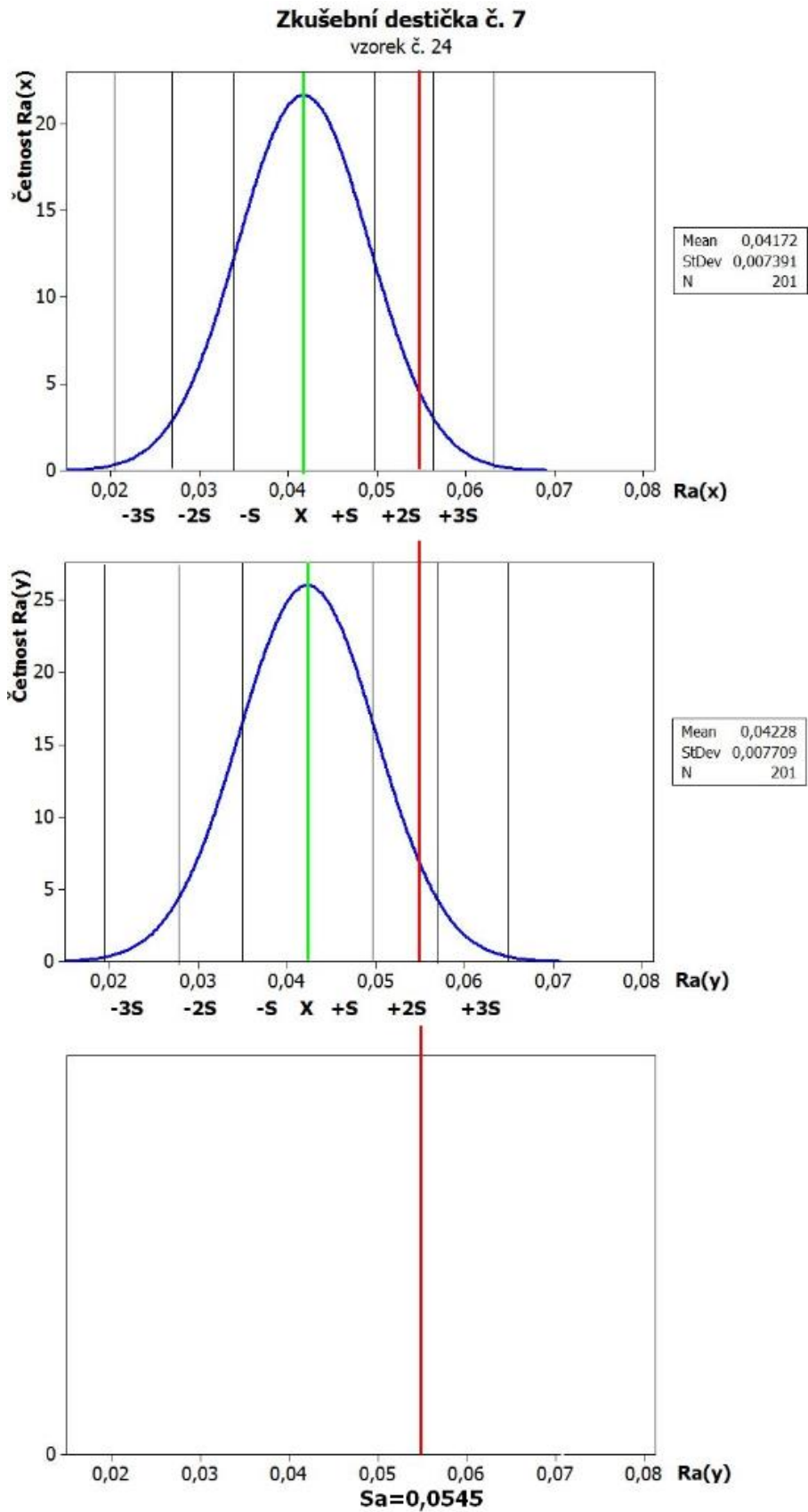
Obr. 53 Gaussovo porovnání – zkušební destička č. 5

9.3.6 Gaussovo porovnání 2D a 3D měření - zkušební destička č. 6



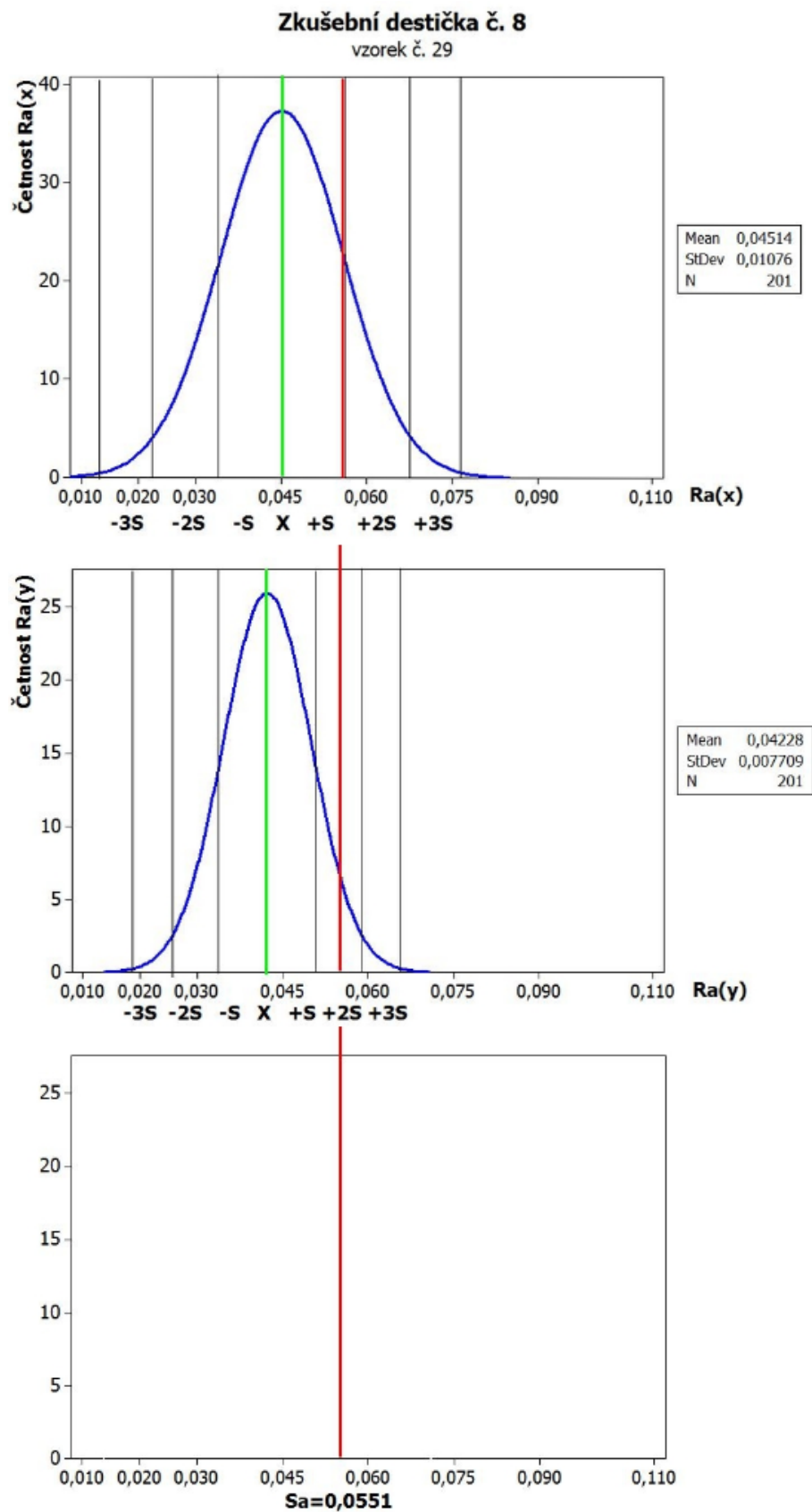
Obr. 54 Gaussovo porovnání – zkušební destička č. 6

9.3.7 Gaussovo porovnání 2D a 3D měření - zkušební destička č. 7



Obr. 55 Gaussovo porovnání – zkušební destička č. 7

## 9.3.8 Gaussovo porovnání 2D a 3D měření - zkušební destička č. 8



Obr. 56 Gaussovo porovnání – zkušební destička č. 8

## 9.4 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

### 9.4.1 Vyhodnocení zkušební destičky č. 1

Z obr. 48, kde je znázorněno Gaussovo porovnání 2D a 3D hodnot zkušební destičky č. 1, na kterou byl nanesen povlak  $TiB_2$  (titanium diboride) metodou PAPVD (proces plazmově aktivovaného PVD) vidíme minimální rozdíl mezi 2D parametrem  $R_a$  (průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu) a parametrem  $S_a$  (aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu) pro 3D měření. Nejnižší hodnotu má parametr  $S_{a,1} = 0,0295\mu m$ , průměrná aritmetická úchylka ve směru x je  $R_{a(x),1} = 0,02952\mu m$  a nejvyšší hodnoty dosahuje průměrná aritmetická úchylka ve směru y  $R_{a(y),1} = 0,03044\mu m$ .

- Rozdíl mezi parametrem  $R_a(x)$  a  $S_a$  vzorku č. 1:

$$R_{a(x),1} - S_{a,1} = 0,02952 - 0,02950 = 0,00002\mu m \quad (32)$$

- Rozdíl mezi parametrem  $R_a(y)$  a  $S_a$  vzorku č. 1:

$$R_{a(y),1} - S_{a,1} = 0,03044 - 0,02950 = 0,00094\mu m \quad (33)$$

### 9.4.2 Vyhodnocení zkušební destičky č. 2

Obr. 50 znázorňuje Gaussovo porovnání 2D a 3D hodnot zkušební destičky č. 2. Vzorek je povlakovaný CrN (chrom nitrid) naneseným metodou PVD (Physical Vapour Deposition). Tato metoda způsobuje vyšší hodnoty  $R_a$  a  $S_a$  než metoda PAPVD (proces plazmově aktivovaného PVD). Průměrné aritmetické úchyly vzorku č. 2 ve směru x, y dosahují hodnot  $R_{a(x),2} = R_{a(y),2} = 0,175\mu m$  a aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu je  $S_{a,2} = 0,235\mu m$ .

- Rozdíl mezi parametrem  $R_a(x)$  a  $S_a$  vzorku č. 2:

$$S_{a,2} - R_{a(x),2} = 0,235 - 0,175 = 0,060\mu m \quad (34)$$

- Rozdíl mezi parametrem  $R_a(y)$  a  $S_a$  vzorku č. 2:

$$S_{a,2} - R_{a(y),2} = 0,235 - 0,175 = 0,060\mu m \quad (35)$$

### 9.4.3 Vyhodnocení zkušební destičky č. 3

Na obr. 51 můžeme vidět Gaussovo porovnání 2D a 3D výsledků měření pro vzorek č. 3, na kterém je stejně jako u vzorku č. 2 použitý povlak CrN (chrom nitrid) metodou PVD (Physical Vapour Deposition). Parametr  $R_a$  v ose x má hodnotu  $R_{a(x),3} = 0,188\mu\text{m}$  a v ose y je roven  $R_{a(y),3} = 0,190\mu\text{m}$ .  $S_a$  dosahuje hodnoty  $S_{a,3} = 0,235\mu\text{m}$ .

- Rozdíl mezi parametrem  $R_a(x)$  a  $S_a$  vzorku č.3:

$$S_{a,3} - R_{a(x),3} = 0,218 - 0,175 = 0,043\mu\text{m} \quad (36)$$

- Rozdíl mezi parametrem  $R_a(y)$  a  $S_a$  vzorku č.3:

$$S_{a,3} - R_{a(y),3} = 0,218 - 0,175 = 0,043\mu\text{m} \quad (37)$$

### 9.4.4 Vyhodnocení zkušební destičky č. 4

Z obr. 52 vidíme pomocí Gaussova porovnání rozdíl mezi parametry  $R_a$  a  $S_a$  pro zkušební destičku č. 4. Vzorek je povlakovaný TiN (nitrid titanu) metodou PVD a dosahuje mnohem nižších hodnot  $R_a$  a  $S_a$  než vzorek č. 2, 3 s povlakem z CrN (chrom nitrid). Průměrná aritmetická úchylka ve směru x je  $R_{a(x),4} = 0,0418\mu\text{m}$ , ve směru y je rovna  $R_{a(y),4} = 0,0403\mu\text{m}$  a aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu je  $S_{a,4} = 0,0535\mu\text{m}$ .

- Rozdíl mezi parametrem  $R_a(x)$  a  $S_a$  vzorku č.4:

$$S_{a,4} - R_{a(x),4} = 0,0535 - 0,0418 = 0,0117\mu\text{m} \quad (38)$$

- Rozdíl mezi parametrem  $R_a(y)$  a  $S_a$  vzorku č.4:

$$S_{a,4} - R_{a(y),4} = 0,0535 - 0,0403 = 0,0132\mu\text{m} \quad (39)$$

### 9.4.5 Vyhodnocení zkušební destičky č. 5

Podobné výsledky jako u destiček s povlakem TiN jsme zjistili u vzorku č. 5 (obr. 53), kde je použitý povlak TiAlN nanesený metodou. Parametr  $R_a$  ve směru x je  $R_{a(x),5} = 0,0509\mu\text{m}$  a ve směru y je  $R_{a(y),5} = 0,0527\mu\text{m}$ . Parametr  $S_a$  má hodnotu  $S_{a,5} = 0,0656\mu\text{m}$ .

- Rozdíl mezi parametrem  $R_a(x)$  a  $S_a$  vzorku č.5:

$$S_{a,5} - R_{a(x),5} = 0,0656 - 0,0509 = 0,0147\mu\text{m} \quad (40)$$

- Rozdíl mezi parametrem  $R_a(y)$  a  $S_a$  vzorku č.5:

$$S_{a,5} - R_{a(y),5} = 0,0656 - 0,0527 = 0,0129\mu\text{m} \quad (41)$$

#### 9.4.6 Vyhodnocení zkušební destičky č. 6

Na obr. 54 je Gaussovo porovnání 2D a 3D parametrů pro měření jakosti povrchu zkušební vzorku č. 6, který má stejně jako vzorek č. 4 nanesený povlak TiN (nitrid titanu) metodou PVD. Zkušební destička č. 6 dosahuje ještě nižších rozdílů hodnot  $R_a$  a  $S_a$  než destička č. 4:  $R_{a(x),6} = 0,0373\mu\text{m}$ ,  $R_{a(y),6} = 0,0375\mu\text{m}$ ,  $S_{a,6} = 0,0465\mu\text{m}$ .

- Rozdíl mezi parametrem  $R_a(x)$  a  $S_a$  vzorku č.6:

$$S_{a,6} - R_{a(x),6} = 0,0465 - 0,0373 = 0,0092\mu\text{m} \quad (42)$$

- Rozdíl mezi parametrem  $R_a(y)$  a  $S_a$  vzorku č.6:

$$S_{a,6} - R_{a(y),6} = 0,0465 - 0,0375 = 0,0090\mu\text{m} \quad (43)$$

#### 9.4.7 Vyhodnocení zkušební destičky č. 7

Na obr. 55 je znázorněno Gaussovo porovnání 2D a 3D výsledků měření vzorku č. 7 pokovaným TiCN (karbonitrid titanu) metodou PAPVD (proces plazmově aktivovaného PVD). U zkušební destičky č. 7 byly naměřeny tyto hodnoty:  $R_{a(x),7} = 0,0417\mu\text{m}$ ,  $R_{a(y),7} = 0,0423\mu\text{m}$ ,  $S_{a,7} = 0,0545\mu\text{m}$ .

- Rozdíl mezi parametrem  $R_a(x)$  a  $S_a$  vzorku č.7:

$$S_{a,7} - R_{a(x),7} = 0,0545 - 0,0417 = 0,0128\mu\text{m} \quad (44)$$

- Rozdíl mezi parametrem  $R_a(y)$  a  $S_a$  vzorku č.7:

$$S_{a,7} - R_{a(y),7} = 0,0545 - 0,0423 = 0,0122\mu\text{m} \quad (45)$$

#### 9.4.8 Vyhodnocení zkušební destičky č. 8

Obr. 56. s Gaussovým porovnáním zkušební destičky č. 8 s povlakem stejně jako zkušební destička č. 5 TiAlN naneseným metodou PVD (Physical Vapour Deposition). Vzorek č. 8 má nepatrně nižší hodnoty než vzorek č. 5.:  $R_{a(x),8} = 0,0442\mu\text{m}$ ,  $R_{a(y),8} = 0,0451\mu\text{m}$ ,  $S_{a,8} = 0,0551\mu\text{m}$

- Rozdíl mezi parametrem  $R_a(x)$  a  $S_a$  vzorku č.8:

$$S_{a,8} - R_{a(x),8} = 0,0551 - 0,0442 = 0,0109\mu\text{m} \quad (44)$$

- Rozdíl mezi parametrem  $R_a(y)$  a  $S_a$  vzorku č.8:

$$S_{a,8} - R_{a(y),8} = 0,0551 - 0,0451 = 0,0100\mu\text{m} \quad (45)$$



## ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo v teoretické části objasnit problematiku spojenou s měřením drsnosti povrchu, charakterizovat základní pojmy, definice spojené s drsností povrchu a přiblížit korelaci spojenou s praktickou částí bakalářské práce.

Úvod praktické části byl zaměřen na vlastnosti měřených vzorků. Zkušební destičky byly zhotoveny z ušlechtilé oceli 1.2343 s povlakovou vrstvou  $TiB_2$ , CrN, TiN, TiAlN, TiCN. Povlaky byly nanášeny metodou PVD nebo PACVD.

Dále bylo provedeno měření jakosti povrchu 2D a 3D skenovací metodou u 8 testovacích vzorků pomocí bezkontaktního zařízení Talysurf CLI 500 od firmy Taylor Hobson. Zpracování výsledků bylo provedeno v programu TalyMap, kde nás nejvíce zajímaly hodnoty průměrné aritmetické úchyly posuzovaného profilu ve směru  $x$   $R_{a(x)}$ , ve směru  $y$   $R_{a(y)}$  a aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu  $S_a$ . Výsledky byly zapsány do programu Minitab 14, kde se pomocí histogramu vykreslily Gaussovy křivky. Nakonec se křivky proložily hodnotou  $R_{a(x)}$ ,  $R_{a(y)}$ ,  $S_a$  a vyhodnotily se výsledky měření.

Výsledky uvedené v tomto měření ukázaly, že nejvyšší hodnoty má zkušební destička č. 3 s povlakem CrN nanášeným metodou PVD:  $R_{a(x),3} = 0,188\mu m$ ,  $R_{a(y),3} = 0,19\mu m$ ,  $S_{a,3} = 0,235\mu m$ . Naopak nejnižších hodnot dosahuje vzorek č. 1, povlakovaný PAPVD metodou povlakem  $TiB_2$ :  $R_{a(x),1} = 0,0295\mu m$ ,  $R_{a(y),1} = 0,0304\mu m$ ,  $S_{a,1} = 0,0295\mu m$ . Všechny zpracované výsledky jsou přiloženy na CD disku.

Z celkového hlediska lze říci, že parametr  $S_a$  dosáhl vyšších hodnot než parametr  $R_a$ . Vyšší hodnoty  $S_a$  lze přisoudit většímu počtu měřených dat na povrchu, což značí, že se na povrchu vzorků vyskytují další nerovnosti, které 2D měření nezaznamená.

V praxi se 3D parametr  $S_a$  používá jen výjimečně. Má vyšší požadavky na měření (drahý stroj, delší měřicí čas,...) než 2D parametr  $R_a$ .

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] HANČLOVÁ, Jana a Lubor TVRDÝ. VŠB-TU OSTRAVY. *Úvod do analýzy časových řad*. 2003, 34 s. Dostupné z:  
[http://gis.vsb.cz/pan-old/Skoleni\\_Texty/TextySkoleni/AnalyzaCasRad.pdf](http://gis.vsb.cz/pan-old/Skoleni_Texty/TextySkoleni/AnalyzaCasRad.pdf)
- [2] BUMBÁLEK, L.; BUMBÁLEK, B. *Pokrokové trendy v hodnocení textury povrchu*, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně.
- [3] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. 1999
- [4] PEŠIČKA, L.: *Geometrická specifikace výrobků strojírenské výroby (GPS) – Textura povrchu – Požadavky na drsnost, vlnitost a základní profil povrchu*, Praha, ČNI 2006
- [5] ČECH, Jaroslav. *Strojírenská metrologie*. 4. přeprac. vyd., 2. v nakl. CERM. Brno, 2005, 176 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-3070-2
- [6] ČSN EN ISO 4288. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. 1999
- [7] ČSN EN ISO 25178-2. *Geometrické specifikace produktu (GPS) – Textura povrchu: Plocha – Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [8] JIANG, XIANG and WHITEHOUSE, D.J. *Technological shifts in surface metrology*. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61 (2). pp. 815-836. 2012. ISSN 0007-8506
- [9] MATHIA, T.G., P. PAWLUS a M. WIECZOROWSKI. *Recent trends in surface metrology*. *Wear* [online]. 2011, vol. 271, 3-4, s. 494-508 [cit. 2016-04-20]. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2010.06.001>. Dostupné z:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164810002243>
- [10] *Surface Characterisation and Roughness Measurement with Low-Coherence Interferometry*. [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: [http://www.novacam.com/pdf/app-note\\_Novacam\\_roughness\\_rev\\_1-2.pdf](http://www.novacam.com/pdf/app-note_Novacam_roughness_rev_1-2.pdf)

- [11] MLÍKA, Jiří. *Měřidla a měření. Lícování a uložení. Prostorové orýsování. Ruční dokončovací obrábění.*: Učební texty pro kurzy ve strojírenských profesích. [online]. 2008, s. 38 [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: <http://mail.sstzr.cz/web/download/cat1/ucebni-texty-ucebni-obory-strojirenske-profese.pdf>
- [12] ČSN EN ISO 25178-6 *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha - Část 6: Klasifikace metod měření textury povrchu*
- [13] B. Bumbálek, V. Odvody, B. Ošťádal, *Drsnost povrchu*. SNTL – nakladatelství technické literatury, Praha 1989.
- [14] HANK-KOLB GROUP: *Vzorkovnice drsnosti povrchu broušení ploch*. [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: [http://www.hahnkolb.cz/cz/katalog.php?id\\_sortiment\\_skupiny=883&hledany\\_text=&hledany\\_kod=&zobrazeni=&podskupina=&VYROBCE=HAHNKOLB%20GmbH](http://www.hahnkolb.cz/cz/katalog.php?id_sortiment_skupiny=883&hledany_text=&hledany_kod=&zobrazeni=&podskupina=&VYROBCE=HAHNKOLB%20GmbH)
- [15] Taylor - Hobson (aktuální nabídka produktů) [online]. [cit.2016-04-20]. Dostupný z WWW: <http://www.taylor-hobson.com>
- [16] TICHÁ, Šárka. *Strojírenská metrologie část 1: měření drsnosti povrchu dotykovými profilometry*. Ostrava, 2004, s. 8
- [17] JURENA, Pavel. *Snímání a hodnocení jakosti broušeného povrchu kontaktním a bezkontaktním způsobem: laserový snímač*. Zlín, 2011. Dostupné z: [https://portal.utb.cz/wps/PA\\_StagPortletsJSR168/KvalifPraceDownloadServlet?typ=1&adipidno=19095](https://portal.utb.cz/wps/PA_StagPortletsJSR168/KvalifPraceDownloadServlet?typ=1&adipidno=19095). Diplomová práce. UTB ve Zlíně. Vedoucí práce doc. Dr. Ing. Vladimír Pata.
- [18] Dotykové, nebo bezdotykové měření struktury povrchu: Dotykový způsob měření. *MM: průmyslové spektrum*. 2005(6). Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/dotykovne-nebo-bezdotykovne-merenistruktury-povrchu.html>
- [19] AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ, s.r.o. *Technická příručka*. Elannders, Švédsko, 2010
- [20] HANČLOVÁ, Jana a Lubor TVRDÝ. VŠB-TU OSTRAVY. *Úvod do analýzy časových řad*. 2003, 34 s. Dostupné z: [http://gis.vsb.cz/pan-old/Skoleni\\_Texty/TextySkoleni/AnalyzaCasRad.pdf](http://gis.vsb.cz/pan-old/Skoleni_Texty/TextySkoleni/AnalyzaCasRad.pdf)

- [21] ARTLOVÁ, Markéta a Josef ARTL. *Grafické metody analýzy ekonomických časových řad*. Statistika. Praha: Český statistický úřad, 1995, č. 32, s. 483-493.  
Dostupné z: [http://nb.vse.cz/~arlt/publik/AA\\_GMAECCR\\_95.pdf](http://nb.vse.cz/~arlt/publik/AA_GMAECCR_95.pdf)
- [22] MELOUN, Milan. *Kompendium statistického zpracování dat: metody a řešené úlohy včetně CD*. Praha: Academia, 2002, 764 s. ISBN 80-200-1008-4
- [23] VODIČKA, Miloš. *Současnost a trendy povlakování technologií PVD*. MM Průmyslové spektrum. Duben 2003, č. 4, s. 52-53, ISSN 1212-2572
- [24] Talysurf CLI: *3D Surface Profiling Systems*. [online]. [cit. 2016-04-20]. Dostupné z: [http://www.f-di.hu/cli\\_systems.pdf](http://www.f-di.hu/cli_systems.pdf)
- [25] ZVÁROVÁ, Jana. *Základy statistiky pro biomedicínské obory*. 2. vydání. Praha : Karolinum, 2011. 219s. Biomedicínská statistika; sv. I. ISBN 978-80-246.-6.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$2D$	[-]	Dvourozměrný prostor.
$3D$	[-]	Třírozměrný prostor.
$A$	$[mm^2]$	Určená plocha.
$d_i$	[-]	Diference pořadí znaků x a y.
$d_t$	[s]	Délka jednotlivých časových intervalů.
$I_{yx}$	[-]	Index korelace.
$I_{yx}^2$	[-]	Index determinace.
$\bar{k}$	[-]	Průměrný koeficient růstu.
$k_t$	[-]	Koeficient růstu.
$k_{(4),t}$	[-]	Meziroční koeficient růstu.
$\bar{r}$	[-]	Střední hodnota koeficientu korelace.
$r$	[-]	Počet intervalů, do kterých je celý interval rozložen.
$r_s$	[-]	Spearmanův koeficient korelace.
$r_{yx}$	[-]	Výběrový koeficient korelace.
$r_{yx}^2$	[-]	Koeficient determinace.
$R_a$	$[\mu m]$	Průměrná aritmetická úchylka profilu.
$R_{a(x)}$	$[\mu m]$	Průměrná aritmetická úchylka ve směru x.
$R_{a(y)}$	$[\mu m]$	Průměrná aritmetická úchylka ve směru y.
$R_c$	$[\mu m]$	Průměrná výška prvku profilu.
$R_{ku}$	$[\mu m]$	Špičatost profilu.
$R_{mr}$	[%]	Materiálový poměr profilu drsnosti.
$R_p$	$[\mu m]$	Největší výška výstupku profilu.
$R_q$	$[\mu m]$	Průměrná kvadratická úchylka profilu.
$R_{sk}$	$[\mu m]$	Šikmost profilu.

$R_{Sm}$	[ $\mu\text{m}$ ]	Průměrná šířka prvků profilu.
$R_t$	[ $\mu\text{m}$ ]	Celková výška profilu.
$R_v$	[ $\mu\text{m}$ ]	Největší hloubka prohlubně profilu.
$R_z$	[ $\mu\text{m}$ ]	Největší výška profilu.
$s_y$	[-]	Směrová odchylka
$s_y^2$	[-]	Rozptyl.
$S_a$	[ $\mu\text{m}$ ]	Aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu.
$t$	[s]	Čas.
$v_t$	[-]	Váha ukazatele.
$VR\bar{\delta}$	[-]	Průměrný relativní přírůstek.
$\bar{X}$	[-]	Střední hodnota.
$X_s$	[ $\mu\text{m}$ ]	Šířka prvku profilu.
$\bar{y}$	[-]	Prostý aritmetický průměr.
$\bar{y}_{ch}$	[-]	Vážený chronologický průměr.
$\bar{y}_i$	[-]	Rozptyl výběrových průměrů.
$y_t$	[-]	Ukazatel.
$Z(x)$	[-]	Hodnota pořadnic.
$Z_p$	[ $\mu\text{m}$ ]	Výška výstupku profilu.
$Z_t$	[ $\mu\text{m}$ ]	Výška prvku profilu.
$Z_v$	[ $\mu\text{m}$ ]	Hloubka prohlubně profilu.
$n_{yx}$	[-]	Korelační poměr.
$\eta_{yx}^2$	[-]	Poměr determinace.
$\delta_t$	[-]	Relativní přírůstek.
$\Delta y_t$	[-]	Absolutní přírůstek.
$\bar{\Delta}$	[-]	Průměrný absolutní přírůstek.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Přenosová charakteristika [3]</i> .....	12
<i>Obr. 2 Profil povrchu [3]</i> .....	12
<i>Obr. 3 Profil povrchu [3]</i> .....	13
<i>Obr. 4 Střední čára [3]</i> .....	13
<i>Obr. 5 Prvek profilu [3]</i> .....	14
<i>Obr. 6 Největší výška výstupního profilu [3]</i> .....	15
<i>Obr. 7 Průměrná výška prvků profilu [5]</i> .....	15
<i>Obr. 8 Celková výška profilu <math>R_t</math> [5]</i> .....	16
<i>Obr. 9 Aritmetická úchylka <math>R_a</math> [5]</i> .....	16
<i>Obr. 10 Průměrná šířka <math>R_{Sm}</math> [5]</i> .....	17
<i>Obr. 11 Místní sklon [3]</i> .....	17
<i>Obr. 12 Křivka materiálového podílu. [3]</i> .....	18
<i>Obr. 13 Periodický prvek [13]</i> .....	21
<i>Obr. 14 Aperiodický prvek [13]</i> .....	21
<i>Obr. 15 Vzorkovnice drsnosti povrchu broušení ploch. [14]</i> .....	22
<i>Obr. 16 Metoda světelného řezu [15]</i> .....	22
<i>Obr. 17 Dotykový profilometr. [16]</i> .....	23
<i>Obr. 18 Měřicí hrot [17]</i> .....	24
<i>Obr. 19 Bezkontaktní způsob snímání povrchu</i> .....	25
<i>Obr. 20 CLA snímač [19]</i> .....	25
<i>Obr. 21 Schéma laserového snímače. [19]</i> .....	26
<i>Obr. 22 Typy statistických závislostí [13]</i> .....	28
<i>Obr. 23 Skutečný povrch zkušební destičky 1</i> .....	34
<i>Obr. 24 Skutečný povrch zkušební destičky 2</i> .....	34
<i>Obr. 25 Skutečný povrch zkušební destičky 3</i> .....	35
<i>Obr. 26 Skutečný povrch zkušební destičky 4</i> .....	35
<i>Obr. 27 Skutečný povrch zkušební destičky 5</i> .....	35
<i>Obr. 28 Skutečný povrch zkušební destičky 6</i> .....	36
<i>Obr. 29 Skutečný povrch zkušební destičky 7</i> .....	36
<i>Obr. 30 Skutečný povrch zkušební destičky 8</i> .....	36
<i>Obr.31 Talysurf CLI 500. [24]</i> .....	39
<i>Obr. 32 Upevnění měřeného vzorku</i> .....	40

<i>Obr. 33 Detail ustavení zkoumaného materiálu .....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 34 Automatická kalibrace zařízení Talysurf CLI 500 .....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 35 Nastavení směru měření přístroje Talysurf CLI 500.....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 36 Nastavení odrazivosti přístroje Talysurf CLI 500.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 37 Parametry nastavení Talysurf CLI 500. ....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 38 Částečné zobrazení povrchu snímaného materiálu.....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 39 Nasnímaný povrch zkušební destičky 1 - Tvar, drsnost, vlnitost.....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 40 Nasnímaný povrch zkušební destičky 1 - Drsnost, vlnitost .....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 41 Nasnímaný povrch zkušební destičky 1 – Drsnost.....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 42 - Fotosimulace drsnosti zkušební destičky 1 .....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 43 Nasnímaný povrch zkušební destičky 1 - 3D pohled .....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 44 Zobrazení 201 řezů drsnosti ve směru W-E (východ-západ).....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 45 Zobrazení 201 řezů drsnosti ve směru N-S (sever-jih) .....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 46 Abbott Firestonova křivka pro řez ve směru W-E (východ-západ) .....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 47 Abbott Firestonova křivka ve směru N-S (sever-jih).....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 48 Obecná Gaussova křivka .....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 49 Gaussovo porovnání – zkušební destička č. 1 .....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 50 Gaussovo porovnání – zkušební destička č. 2 .....</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 51 Gaussovo porovnání – zkušební destička č. 3 .....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 52 Gaussovo porovnání – zkušební destička č. 4 .....</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 53 Gaussovo porovnání – zkušební destička č. 5 .....</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 54 Gaussovo porovnání – zkušební destička č. 6 .....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 55 Gaussovo porovnání – zkušební destička č. 7 .....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 56 Gaussovo porovnání – zkušební destička č. 8 .....</i>	<i>60</i>



**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1 Přehled destiček.....</i>	<i>34</i>
<i>Tab. 2 Naměřená data z programu TalyMap ve směru W-E .....</i>	<i>47</i>
<i>Tab. 3 Naměřená data z programu TalyMap ve směru N-S .....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 4 Naměřená 3D data.....</i>	<i>48</i>