



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

# BEZKONTAKTNÍ HODNOCENÍ TEXTURY POVRCHU

NON-CONTACT METHOD FOR SURFACE TEXTURE EVALUATION

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Svoboda

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

BRNO 2020



# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	<b>Martin Svoboda</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2019/20

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

## Bezkontaktní hodnocení textury povrchu

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

S rozvojem techniky a technologií dochází k postupnému snižování tloušťky mazacích filmu ve strojních soustavách. Jedním z důvodů je zlepšování kvality třecích povrchů, které je výsledkem používání nových dokončovacích postupů a metod obrábění. Měření a vyhodnocení vhodných parametrů textury povrchu a jejich správná interpretace umožňuje predikovat spolehlivost strojních součástí. Moderním trendem je prostorové měření a hodnocení profilu povrchu, které přináší důležité informace o vztazích mezi geometrickou charakteristikou povrchu a jeho funkčními vlastnostmi.

Typ práce: rešeršně syntetická

### Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je rešerše v oblasti bezkontaktního měření parametrů textury povrchu včetně doporučení pro výběr vhodných parametrů k daným funkčním plochám.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- popsat vybrané metody a parametry hodnocení textury povrchu s ohledem na výkresovou dokumentaci,
- popsat principy metod bezkontaktního měření textury povrchu,
- provést doporučení výběru parametrů k daným funkčním plochám.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

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

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske--studium--ukonceni/>

**Seznam doporučené literatury:**

VALÍČEK, J., M. DRŽÍK, T. HRYNIEWICZ, M. HARNIČÁROVÁ, K. ROKOSZ, M. KUŠNEROVÁ, K. BARČOVÁ a D. BRAŽINA. Non-contact method for surface roughness measurement after machining. Measurement Science Review. 2012, 12(5), 184-188. DOI: 10.2478/m10048-012-0028-3. ISSN 1335-8871.

GONG, Y., J. XU a R. C. BUCHANAN. Surface roughness: A review of its measurement at micro-/nano-scale. Physical Sciences Reviews. 2018, 3(1). DOI: 10.1515/psr-2017-0057. ISSN 2365-6581.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá bezkontaktním hodnocením textury povrchu. Cílem práce je rešeršní popis problematiky parametrů textury povrchu a bezkontaktních metod jejich měření. Pozornost je převážně věnována předpisům vhodných parametrů pro funkční plochy dle jejich aplikace. V závěru této práce jsou zpracována obecná doporučení pro výběr vhodných parametrů textury povrchu k funkčním plochám, která jsou následně aplikována na konkrétní příklady. Bylo zjištěno, že k důkladnému popisu funkčních ploch je zapotřebí značného množství parametrů a nákladných experimentálních výzkumů, a proto dosavadní hodnocení drsnosti povrchu pomocí parametru Ra případně Sa je příhodné.

## KLÍČOVÁ SLOVA

textura povrchu, funkční plochy, drsnost povrchu, profilové parametry, plošné parametry, bezkontaktní metoda

## ABSTRACT

This bachelor's thesis focuses on non-contact methods for surface texture evaluation. The aim of the thesis is to describe a set of surface texture parameters and non-contact methods of their measurement. It's main focus is the prescription of suitable parameters for functional surfaces according to their application. The conclusion of the thesis consists of general recommendations for selection of suitable surface texture parameters for functional surfaces, which are applied to specific surfaces occurring in practice. It has been found that a considerable number of parameters and costly experimental research is required for a thorough description of the functional surfaces, and therefore the current evaluation of the surface roughness by means of the Ra and Sa parameters is convenient.

## KEYWORDS

surface texture, functional surfaces, surface roughness, profile parameters, areal parameters, non-contact method



## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SVOBODA. Martin. *Bezkontaktní hodnocení textury povrchu*. Brno, 2020, 70 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.





## PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval doc. Ing. Petru Svobodovi, Ph.D. za pomoc, ochotu a cenné rady při psaní této práce. Rovněž bych chtěl poděkovat své rodině a přítelkyni za celkovou podporu při studiu.

## PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením doc. Ing. Petra Svobody, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE</b>	<b>13</b>
2.1	Analýza problému	13
2.2	Cíl práce	14
<b>3</b>	<b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>15</b>
3.1	Historie měření textury povrchu	15
3.2	Rozdělení a popis parametrů textury povrchu	17
3.2.1	Základní pojmy a popis parametrů profilové metody textury povrchu	17
3.2.2	Základní pojmy a popis parametrů plošné metody textury povrchu	28
3.3	Bezkontaktní měření textury povrchu	38
3.3.1	Konfokální mikroskopie	39
3.3.2	Interferometr s fázovým posunem	40
3.3.3	Spojité skenovací interferometr	41
3.3.4	Variace sond	42
3.3.5	Elektronový mikroskop	43
3.3.6	Mikroskop atomárních sil	45
<b>4</b>	<b>DISKUZE</b>	<b>47</b>
4.1	Obecná doporučení pro výběr vhodných parametrů textury povrchu	47
4.2	Vnitřní povrch hydrodynamického kluzného ložiska	51
4.3	Vnější povrch těsnicího pístního kroužku	53
4.4	Povrch optické plochy	55
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>57</b>
<b>6</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>57</b>
<b>7</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN</b>	<b>64</b>
7.1	Seznam použitých zkratk	64
7.2	Seznam použitých veličin	64
<b>8</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>68</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>70</b>

# 1 ÚVOD

Textura povrchu je velice významnou charakteristikou strojních součástí, která ovlivňuje jejich životnost, funkční vlastnosti a cenu. Tvoří ji náhodné či opakované odchylky od ideálního geometrického tvaru. Její hodnocení je nezbytnou součástí výrobního procesu. Touto problematikou se podrobně zabývají inženýři od 30. let 20. století a od té doby byly vyvinuty 2 způsoby měření, a to profilová a bezkontaktní metoda.

Profilová metoda je dostupnější a používanější, ze které vychází profilové parametry. Princip spočívá v přejíždění snímacím hrotem po nerovnostech povrchu, které kopíruje. Profilové parametry však neumožňují získání jasné představy a vzhledu měřeného povrchu.

Od 80. let 20. století bylo vyvinuto množství bezkontaktních metod, jež jsou povětšinou optické. Pomocí těchto způsobů měření lze získat plošné a objemové parametry, a také trojrozměrný obraz snímaného povrchu, čímž lze lépe postihnout jeho funkční vlastnosti. Kvůli dostupnosti této metody se však v praxi stále příliš nevyužívá.

I přesto, že lze získat veliké množství parametrů, čímž jsme schopni dosáhnout velmi kvalitního hodnocení povrchu, nacházíme na strojních výkresech téměř vždy profilové parametry drsnosti povrchu, čímž se zanedbávají určité funkční vlastnosti. Pro efektivní využití dostupných způsobů měření a nových parametrů je potřeba znalých konstruktérů, kteří dokáží vhodně vybrat parametry, jež jsou nejvhodnější k dané funkční ploše. Ke správnému porozumění je však zapotřebí vhodné literatury, která je v této oblasti v současné době nedostatečná.

## 2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

### 2.1 Analýza problému

Hodnocení textury povrchu je velmi důležité pro správný chod většiny strojních součástí. Textura povrchu může výrazně ovlivnit funkčnost a životnost funkční plochy, a tím i celé součásti. Tímto oborem se podrobně zajímají inženýři od počátku minulého století. Došlo tak ke vzniku velkého množství parametrů textury povrchu, přičemž s bezkontaktní metodou měření se tato škála značně rozšířila o plošné a objemové parametry. S rostoucím množstvím parametrů se zdokonaluje možnost efektivního popisu funkčních ploch. Správným výběrem lze ovlivnit funkční vlastnosti a prodloužit životnost daného povrchu celé součásti.

S širokou škálou parametrů vzniká mnohdy nepřehledná situace při jejich volbě. Ke správnému a efektivnímu výběru parametrů funkční plochy je potřeba bližší znalost známých parametrů, znalost možnosti jejich využití a jejich měření. Tento přehled obvykle běžný konstruktér, který tvoří strojní součásti, nemá. Proto se na strojních výkresech povětšinou setkáme s předpisem jednoho parametru drsnosti povrchu k dané funkční ploše. Tento předpis bývá běžně dostačující, avšak nemusí vždy vhodně popsat funkční vlastnosti plochy, což poté při chodu součásti vede ke ztrátě efektivity.

Bezkontaktní hodnocení textury povrchu nám dává množství plošných parametrů, které dokážou lépe vystihnout vlastnosti funkčních ploch. Vývoj této oblasti se posouvá stále vpřed. Tato metoda měření je tak stále dostupnější, rychlejší a méně nákladná. Při vhodném použití plošných a objemových parametrů lze také mnohdy zjistit, že pro správnou funkci plochy lze předepsat vyšší hodnotu drsnosti povrchu, a tím snížit výrobní náklady. Proto lze předpokládat, že plošné parametry budou na strojních výkresech stále častěji předepisovány. Ke správnému předpisu a využívání těchto parametrů je potřeba, aby konstruktéři, jenž je budou předepisovat, znali jejich význam, možnosti využití a jejich výhody a nevýhody oproti parametrům získaných profilovou metodou měření.

## 2.2 Cíl práce

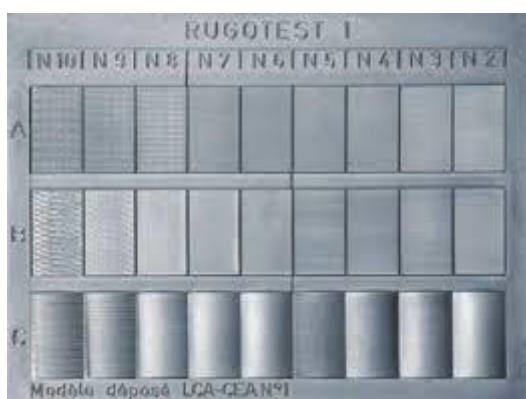
Cílem této bakalářské práce je bližší popis problematiky, která se zabývá posuzováním kvality funkčních ploch, a to nejen teoretického základu, ale i praktických znalostí, které jsou důležité při volbě vhodných parametrů k jednotlivým funkčním plochám. Existuje mnoho profilových, plošných a objemových parametrů textury povrchu a mnoho metod jejich měření. Volba vhodného parametru je tak mnohdy velmi náročná.

Význam této práce tak spočívá v přiblížení oblasti topografie povrchu pro správné pochopení této problematiky. Pro přehledný popis jsou cíle dále rozděleny na vytvoření přehledu parametrů textury povrchu včetně použití, popisu bezkontaktních metod měření a vytvoření obecných i konkrétních doporučení pro výběr vhodných parametrů textury povrchu k funkčním plochám tak, aby co nejlépe vystihovaly její funkční vlastnosti.

## 3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

### 3.1 Historie měření textury povrchu

Tribologií a zjišťováním vlastností povrchů se zabýval již Leonardo Da Vinci zejména třením a mazáním. Jeho zkoumání bylo roku 1699 podmětem pro Guillaume Amontonsa, který definoval zákony o tření, jenž později v roce 1781 potvrdil Charles Augustin de Coulomb [1]. Získané poznatky se však nedaly nějak kvantifikovat. O číselné vyjádření byl velký zájem za průmyslové revoluce, avšak tato doba s sebou nenesla k tomu potřebné technologie. Používaly se srovnávací metody zrakové nebo hmatové [1]. Hmatové metody spočívaly v hmatovém porovnání obrobeného povrchu se sadou kalibrovaných vzorků s různou drsností a získaných různými dokončovacími procesy. Přes jednoduchost a fakt, že nelze získat číselné hodnoty, se tato metoda využívá dodnes.



Obr. 3-1 Vzorkovnice drsnosti povrchu [2]

Od té doby byly snahy nahradit dosavadní metody kvantitativními, jenž by nevyžadovaly velké množství nákladných vzorků pro srovnání. Zlom nastal až ve 30. letech 20. století v Německu, kdy Gustav Schmaltz vyvinul první kvantitativní měřicí přístroj pro vyhodnocování povrchu *light-section microscope*, v překladu „mikroskop s průřezem světla“ [3]. Princip mikroskopu spočíval ve zvětšení nerovností, ze kterých poté bylo možné odečíst výstupky a prohlubně povrchu. V roce 1933 však E. J. Abbot vyvinul profilometr, jenž pracoval na stejném principu jako dnešní 2D měřicí přístroje [4]. Měl snímací hrot, který přejížděním po povrchu odečítal hodnoty. Zpočátku pouze integračním způsobem, později byl vybaven zapisovacím zařízením. Přestože Schmaltzova metoda své době dosahovala značných kvalit, nebyl zde možný značný posun vpřed, zatímco měření snímacím hrotem mělo velký potenciál [4].

Takto získaná data však bylo potřeba určitým způsobem segmentovat a analyzovat. Britská společnost Taylor a Hobson (dnes Taylor Hobson) vyvinula jednoduchý nástroj, jenž umožnil převést analogový signál na elektrický [3]. Začaly se tak lépe zachycovat různé parametry. Nejrozšířenějším z nich byl parametr dříve označovaný CLA, dnes  $Ra^1$ . Kvůli rozšířenosti parametrů drsnosti povrchu bylo zapotřebí vytvořit normy, jež sjednocovaly získané poznatky do přehledné formy. Tyto normy byly však také převážně založeny na práci a vlastnostech parametru  $Ra$  [3].

V 60. letech došlo k významnému pokroku se zpracováním získaných dat. Vznikl hardwarový filtr 2RC [1], jenž byl schopen segmentovat určité prvky a díky němu vznikly další parametry.

Velký zlom nastal digitalizací. Získané signály o povrchu byly převedeny na digitální, se kterými lze numericky pracovat [1]. To dalo prostor inženýrům lépe prozkoumávat všechny vlastnosti textury. Pokrok zaznamenal zejména vývoj filtrů, jenž odstínily některé části textury a bylo se možné zaměřovat pouze na určité vlastnosti textury povrchu.

Od konce 70. let 20. století byly analogové nástroje nahrazovány mechanickými zařízeními podporovanými digitálními počítači [3]. Vývoj tak převážně probíhal v evropských akademických a výzkumných zařízeních. Digitalizace dat přímo ze snímače umožňovala sběr a manipulaci dat na jednom počítači, a tak nebylo nutné sebraná data převádět na jiný počítač, což výzkumníkům usnadnilo práci a dalo více prostoru pro další vývoj. Ten spočíval převážně ve vylepšování numerických parametrů. V 80. letech bylo vyvinuto a popsáno v normách více než 100 deskriptorů a parametrů. V mnoha případech však byly špatně definovatelné a měly špatné praktické využití. Tento náhlý vývoj parametrů byl výstižně označován jako *parameter rash* [3].

V 80. letech začali zejména evropští vědci rozvíjet měření ve třech dimenzích [3]. Vývoj nebyl podporován výrobci profilových měřících přístrojů, kteří tvrdili, že tento způsob vyhodnocování textury povrchu je pouze akademickou zvědavostí, a že v průmyslu tento přístup nemá prostor. Vědci však vývoj podporovali a postupně tato oblast zkoumání pokročila až do dnešní podoby.

---

<sup>1</sup>  $Ra$  – Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu [5], bližší popis v kapitole 3.2.1



## 3.2 Rozdělení a popis parametrů textury povrchu

Texturou povrchu rozumíme náhodné či opakované odchylky od ideálního geometrického povrchu, jež jsou vytvořeny během výroby, manipulace nebo během používání [6]. Během výroby tyto nedokonalosti vznikají hned z několika důvodů. Jednak je to deformací při obrábění, dále kmitáním soustavy stroje, nástroje, obrobku, či kvůli nevhodně zvoleným parametrům při obrábění [7].

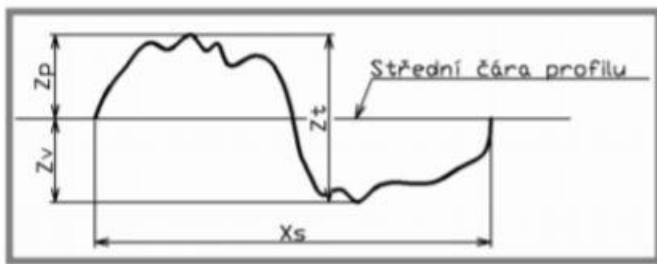
V různých normách je definováno velké množství parametrů, přičemž v běžné praxi se můžeme potkat s používáním pouze několika parametrů. Lze najít velké množství literatury, kde jsou také tyto parametry popsány. Téměř nikde se však nelze dočíst o přednostech a nedostacích různých parametrů a jejich praktickém využití.

### 3.2.1 Základní pojmy a popis parametrů profilové metody textury povrchu

Pro 2D hodnocení textury povrchu je nutno definovat profil, ze kterého se bude vyhodnocování uskutečňovat. Profil povrchu je průsečnice skutečného povrchu a dané roviny. V praxi se obvykle volí rovina kolmá k rovině rovnoběžné se skutečným povrchem ve vhodném směru. Po odstranění šumu patřičným filtrem se takto získaná křivka označuje jako základní profil. K určení parametrů ze základního profilu dále vyžaduje vhodný souřadnicový systém. Obvykle se používá pravoúhlý souřadnicový systém, kde osa X leží na skutečném povrchu a orientuje se ve směru snímání, osa Y rovněž leží na skutečném povrchu a je kolmá k ose X a osa Z směřuje z materiálu do okolního prostředí [5].

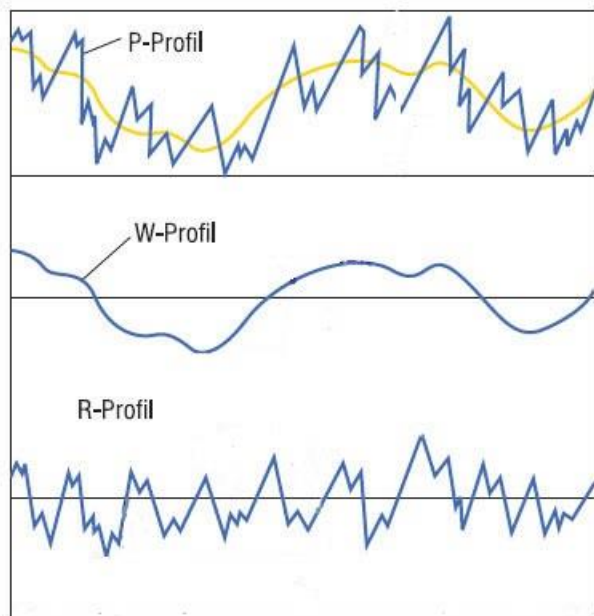
Parametry povrchu musí být vztaženy k určité dané hodnotě. Získané parametry se uvádějí vzhledem k tzv. střední čáře. Středních čar je několik typů. Nejnázornější a nejvyužívanější je střední čára profilu, která se získá aproximací středních hodnot metodou nejmenších čtverců [5]. K této čáře se pak dále vztahují parametry jako například výstupek či prohlubeň. Výstupek profilu je ta část, jež směřuje ven z materiálu nad střední čáru, prohlubeň naopak směřuje do materiálu pod střední čáru [5].

Pro správné pochopení některých parametrů je vhodné znát termín prvek profilu. Profil povrchu se skládá z prvků, jenž jsou tvořeny jedním výstupkem a k tomu přilehlou prohlubní. [5] K prvku se váží důležité hodnoty, které jsou měřeny na šířce profilu  $X_s$ , jako je výška výstupku profilu  $Z_p$  a hloubka prohlubně profilu  $Z_v$  [8]. Sečtením těchto dvou hodnot získáme výšku profilu  $Z_t$ . Tyto hodnoty jsou graficky znázorněny na obrázku 3-2.



Obr. 3-2 Prvek profilu [9]

V základním profilu jsou dohromady zahrnuty dlouhovlnné a krátkovlnné složky textury povrchu. Pro hodnocení povrchu je však vhodnější od sebe tyto složky odseparovat a hodnotit je jednotlivě. K těmto účelům se používají tzv. filtry profilu. Jsou používány tři základní filtry profilu  $\lambda_s$ ,  $\lambda_c$  a  $\lambda_f$  [5]. Všechny tyto filtry mají stejné přenosové charakteristiky, liší se však v hodnotách vlnové délky cut-off [8]. Pomocí správného užití těchto filtrů získáme profil vlnitosti, profil drsnosti a odchylku tvaru. Jednotlivým profilům pak náleží určité parametry. Pro profil drsnosti jsou to R-parametry, pro profil vlnitosti W-parametry a pro základní profil P-parametry. Grafické znázornění profilů povrchu lze vidět na obrázku 3-3. Jejich popis včetně použití bude obsahem dalších kapitol.

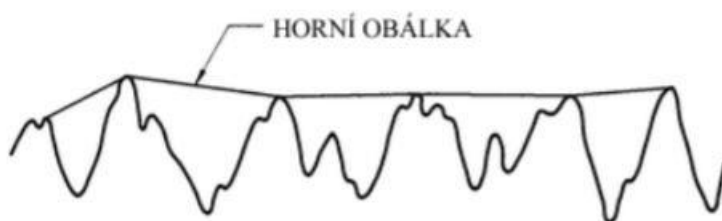


Obr. 3-3 Základní profil, profil vlnitosti a profil drsnosti [10]

Filtr profilu  $\lambda_s$  definuje rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln přítomnými na povrchu (šum),  $\lambda_c$  definuje rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti a  $\lambda_f$  mezi vlnitostí a delšími složkami vln přítomnými na povrchu. Pro všechny profily je nejdříve potřeba odstranit šum filtrem  $\lambda_s$ . Profil drsnosti získáme následným potlačením dlouhovlnných složek použitím filtru  $\lambda_c$ . Profil vlnitosti získáme potlačením dlouhovlnných složek filtrem  $\lambda_f$  a následným použitím filtru  $\lambda_c$  [5].

Tyto všechny operace je však potřeba provést na správné délce. Používají se tzv. základní délky  $l_r$ ,  $l_w$  a  $l_p$  [5]. V praxi se používá tzv. vyhodnocovací délka  $l_n$ , která může obsahovat i více základních délek [5].

Další metodou k získání parametrů textury povrchu je metoda motif. Velikou výhodou této metody je, že dokáže pracovat s nefiltrovaným profilem. Především drsnost získaná těmito parametry nemá příliš praktické využití, proto se s ní dnes téměř nelze v praxi setkat. Dříve se však využívala převážně v automobilovém průmyslu [11]. V této práci je uvedena zejména z důvodu praktického využití parametrů motif vlnitosti. Tyto parametry jsou vyhodnocovány na tzv. horní obálce, jenž kopíruje daný profil, však dotýká se pouze nejvyšších vrcholů [12]. Ty, které nejsou svou výškou výrazné se neuvažují.



Obr. 3-4 Znárodnění horní obálky [13]

Kromě parametrů popsaných v této práci existují i jiné parametry, jenž využívají odlišných principů a jsou popsány v jiných normách. Jejich získání však bývá více nákladné a nepopisují daný povrch tak výstižně, proto nejsou v této práci uvažovány.

Ačkoliv jsou parametry dle normy ČSN EN ISO 4287 [5] prozatím nejpoužívanější, v moderní literatuře se s nimi setkáme jen, co se týče popisu pomocí definic, nikoliv pro jejich praktické využití. Přehled profilových parametrů textury povrchu je shrnut v tabulkách 3-1 až 3-4. V následujících podkapitolách budou vybrané parametry popsány blíže, včetně praktického využití.

Tab. 3-1 Profilové výškové parametry (výstupky a prohlubně) [5]

Název	Značka	Stručný popis
Největší výška výstupku profilu	Pp, Rp, Wp	Hodnota nejvyššího vrcholu profilu v rozsahu základní délky.
Největší hloubka prohlubně profilu	Pv, Rv, Wv	Hodnota největší prohlubně profilu v rozsahu základní délky.
Největší výška profilu	Pz, Rz, Wz	Součet hodnot nejvyššího vrcholu profilu a největší prohlubně profilu v rozsahu základní délky.
Průměrná výška prvků profilu	Pc, Rc, Wc	Průměrná hodnota výšek prvků profilu v rozsahu základní délky.
Celková výška profilu	Pt, Rt, Wt	Součet hodnoty nejvyššího vrcholu profilu a hodnoty největší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky.

Tab. 3-2 Profilové výškové parametry (průměrné hodnoty pořadnic) [5]

Název	Značka	Stručný popis
Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu	Pa, Ra, Wa	Aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic profilu na základní délce
Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu	Pq, Rq, Wq	Kvadratický průměr profilových odchylek v rozsahu základní délky
Šikmost posuzovaného profilu	Psk, Rsk, Wsk	Symetrie výšky profilu pomocí podílu průměrné hodnoty třetích mocnin pořadnic a třetí mocniny průměrné kvadratické úchylky posuzovaného profilu v rozsahu základní délky
Špičatost posuzovaného profilu	Pku, Rku, Wku	Špičatost daného profilu odpovídající podílu průměrné hodnoty čtvrtých mocnin pořadnic a čtvrté mocniny průměrné kvadratické úchylky posuzovaného profilu v rozsahu základní délky

Tab. 3-3 Profilové délkové parametry [5]

Název	Značka	Stručný popis
Průměrná šířka prvků profilu	PSm, RSm, WSm	Aritmetický průměr šířek prvků profilu v rozsahu základní délky

Tab. 3-4 Profilové tvarové parametry [5]

Název	Značka	Stručný popis
Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu	PΔq, RΔq, WΔq	Kvadratický průměr sklonů pořadnic profilu v rozsahu základní délky
Materiálový poměr profilu (nosný podíl)	Pmr(c), Rmr(c), Wmr(c)	Poměr délky materiálu profilu na dané úrovni
Rozdíl výšky úseku profilu	Pδc, Rδc, Wδc	Rozdíl mezi výškovými úrovněmi dvou úseků odpovídajících příslušnému materiálovému poměru
Vzájemný materiálový poměr	Pmr, Rmr, Wmr	Materiálový poměr určený na úrovni části profilu

## R-parametry

Parametry drsnosti povrchu jsou nejvyužívanějšími a nejdiskutovanějšími parametry textury povrchu. Téměř vždy se v praxi můžeme setkat s tím, že se daný povrch hodnotí jen pojmy souvisejícími s drsností povrchu. Při tomto hodnocení se zcela ztrácí vliv dlouhovlnných složek textury povrchu. Ukazuje se však, že tato metoda vyhodnocování kvality povrchu je v běžné praxi dostatečná.

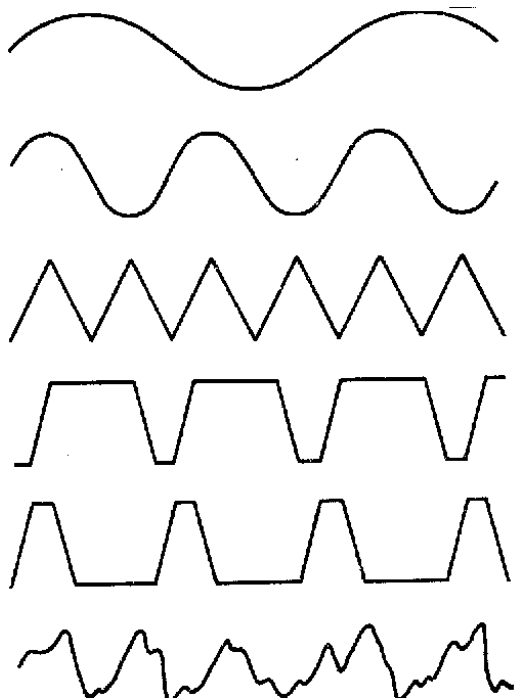
Nejčastěji předepisovaným parametrem na strojních výkresech je parametr střední aritmetické úchylny profilu Ra. Udává střední hodnotu vzdáleností souřadnic jednotlivých bodů profilu [5] zkoumaného povrchu od střední čáry profilu, což také udává rovnice 1 [14]. Graficky je tento parametr znázorněn na obrázku 3-5.

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



Obr. 3-5 Grafické znázornění parametru Ra (ve 3D Sa) [14]

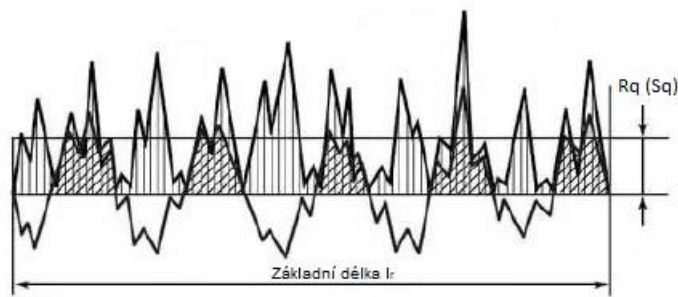
Tento parametr je v současné nejvyužívanější, a to zejména z důvodu jednoduchosti měření, nízkých nákladů a statistické přesnosti [4]. Důležitým faktorem je také to, že z hodnot parametru Ra vycházejí další pojmy související s životností a funkčními vlastnostmi povrchu. Tento parametr velice dobře vystihuje vlivy kvality povrchu spojené s kontaktním namáháním, únosností uložení, těsností spojení, odolností proti korozi, elektrickou a tepelnou vodivostí, schopností odrážet světelné a jiné paprsky, schopností odrážet teplo, součinitelem tření a dalšími funkčními vlastnostmi [15]. I přesto, že má tento parametr mnoho výhod, je pouze statistickou hodnotou, která neudává nic jiného, než je jeho definice [4]. To je důvod, proč nemusí vždy přesně vystihovat vzhled povrchu. Povrchy, které jsou vyrobeny jiným způsobem obrábění a mají tak různý vzhled a různé funkční vlastnosti, mohou mít stejnou hodnotu parametru Ra. Proto nemusí být vždy nejvhodnějším parametrem a vzhled povrchu by se měl vyjádřit také pomocí jiných parametrů. Na obrázku 3-6 můžete vidět různý vzhled povrchů se stejnou hodnotou Ra.



Obr. 3-6 Profily různých povrchů se stejnou hodnotou Ra [16]

Další významný výškový parametr drsnosti povrchu je průměrná kvadratická úchylna posuzovaného profilu  $Rq$ . Jak lze vidět v rovnici 2 a na obrázku 3-7, využívá druhých mocnin výškových souřadnic. Tímto způsobem tak dosahuje zpravidla vyšších hodnot než parametr  $Ra$ , protože je mnohem citlivější na extrémní hodnoty výstupků a prohlubní. Ze statistického hlediska je však významnější než předchozí zmíněný parametr. Citlivosti se využívá především při posuzování optických ploch, u kterých jsou příliš velká množství výstupků a prohlubní větších rozměrů nežádoucí [17].

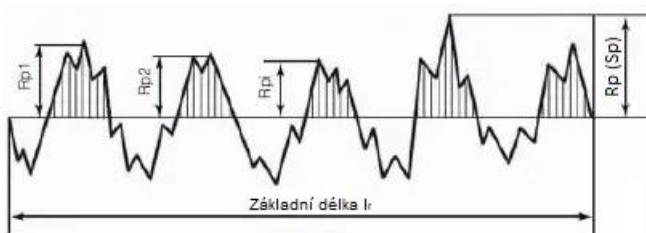
$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^{lr} Z^2(x) dx} \quad (2)$$



Obr. 3-7 Grafické znázornění parametru  $Rq$  (ve 3D  $Sq$ ) [14]

Parametr největší výšky výstupku profilu  $Rp$  představuje nejvyšší hodnotu výstupku v rozsahu základní délky, jak vyjadřuje rovnice 3, či jak můžeme vidět na obrázku 3-8. Tato charakteristika je důležitá při vyhodnocování tření součásti během jejího záběhu [17]. Stejně jako u všech parametrů vyjadřujících extrémní hodnoty profilu je zde problém s nestálostí výsledků při opakovaném měření.

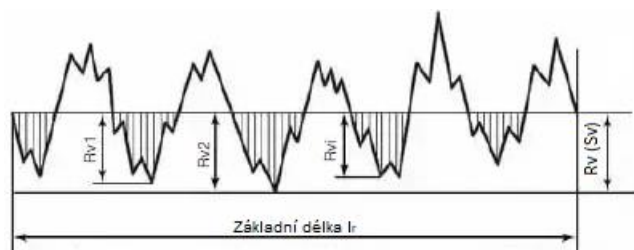
$$Rp = \max (Z(x)) \quad (3)$$



Obr. 3-8 Grafické znázornění parametru  $Rp$  (ve 3D  $Sp$ ) [14]

Jak již název napovídá parametr největší hloubka prohlubně profilu  $R_v$  vyjadřuje nejnižší prohlubeň profilu v rozsahu základní délky, což také určuje rovnice 4. Jeho grafické znázornění je možno vidět na obrázku 3-9. Tento parametr je velmi důležitý pro popis náchylnosti funkční plochy ke vzniku trhlin či korozi [17]. Pomocí tohoto parametru lze však také lépe odhadnout množství maziva zachyceného v údolích<sup>2</sup> povrchu [17]. Vzhledem k tomu, že se jedná o parametr ukazující extrémní hodnotu profilu povrchu, je při vyhodnocování tohoto parametru problém s nestálostí hodnot při opakovaném měření.

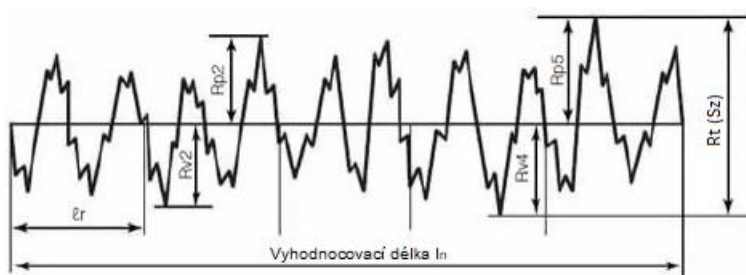
$$R_v = |\min(Z(x))| \quad (4)$$



Obr. 3-9 Grafické znázornění parametru  $R_v$  (ve 3D  $S_v$ ) [14]

Jak lze vidět na obrázku 3-10 a lze vyčíst ze vzorce 5, parametr celková výška profilu  $R_t$  vyjadřuje součet nejvyššího výstupku a nejnižší prohlubně v rozsahu vyhodnocované délky. Značné hodnoty mezi vzdáleností výstupků a prohlubní mohou být závažné u namáhaných součástí, kde se v těchto místech mohou tvořit trhliny. Význam tohoto parametru je tak velmi důležitý. Nevýhodou však je, že tento parametr se skládá ze dvou největších hodnot vyhodnocované délky, které pro různá místa povrchu mohou být značně rozdílné. Hodnota tohoto parametru je tak velmi nestálá.

$$R_t = R_p + R_v \quad (5)$$



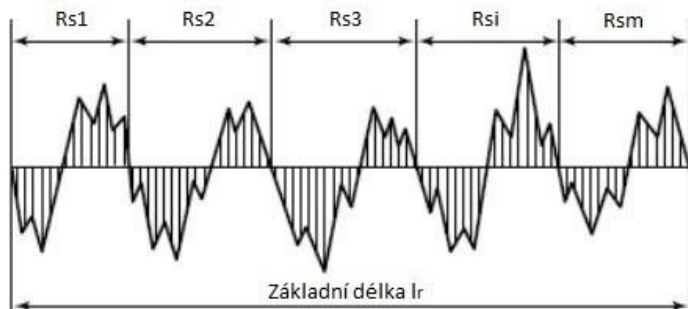
Obr. 3-10 Grafické znázornění parametru  $R_t$  (ve 3D  $S_z$ ) [14]

<sup>2</sup> Údolí – nejnižší bod povrchu v jeho okolí, bližší popis v kapitole 3.2.2



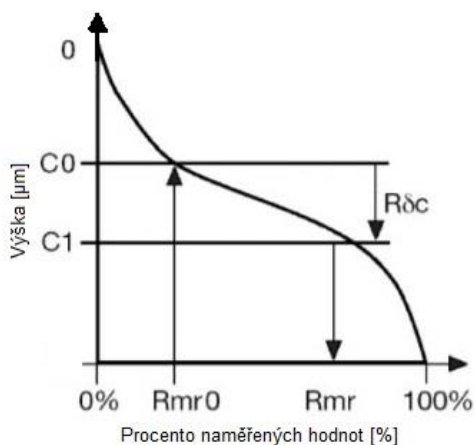
Nejen výškové parametry, ale i délkový parametr  $R_{Sm}$  má značný význam při určování kvality textury povrchu. Představuje aritmetický průměr šířek prvků profilu v rozsahu základní délky, což také udává vzorec 6. Graficky je význam tohoto parametru znázorněn na obrázku 3-11. Tento parametr je také jen statistickou hodnotou, podobně jako parametr  $R_a$  [4]. Proto se i zde může stát to, že pro stejné hodnoty  $R_{Sm}$  mohou mít měřené povrchy zcela rozdílný vzhled a tím i funkční vlastnosti. Nejen, že může mít větší vliv na hodnocení únavové pevnosti než parametr  $R_a$ , ale má významný vliv na posouzení kontaktního namáhání, těsnosti spojení, odolnosti proti korozi nebo elektrické a tepelné vodivosti [15].

$$R_{Sm} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m R_{Si} \quad (6)$$



Obr. 3-11 Grafické znázornění parametru  $R_{Sm}$  [14]

Dalším významným parametrem drsnosti povrchu je vzájemný materiálový poměr  $R_{mr}$ , jenž je vyjádřen z křivky materiálového poměru, kterou lze vidět na obrázku 3-12. Vyjadřuje materiálový poměr určený na úrovni části profilu  $R_{\delta c}$ , který je vztažený k úrovni  $C_0$ . Jinak řečeno, je to množství plochy naměřené na úrovni jádra<sup>3</sup> profilu. Tímto parametrem můžeme účinně posoudit vliv drsnosti povrchu na kontaktní namáhání, únosnost uložení, těsnost spojení nebo také elektrickou a vodivost [15].



Obr. 3-12 Grafické znázornění parametru  $R_{mr}$  na křivce materiálového poměru [14]

<sup>3</sup> jádro – část povrchu bez vysokých vrcholů a nízkých údolí

## W-parametry

Jak již bylo zmíněno, parametry vlnitosti jsou vztahovány vzhledem k profilu vlnitosti. Ten má potlačené krátkovlnné složky základního profilu, jež představují samotnou drsnost, ale i dlouhovlnné složky, které jsou význačné pro odchylku tvaru. Vlnitost vzniká při obrábění a vzhledem k větším rozměrům vlnitosti je většinou náhodná a lze ji obtížně předpokládat. Příčinami vlnitosti jsou například nerovnoměrné posuvy obráběcího nástroje, nerovnoměrné opotřebení brusného kotouče, vibrace během obrábění apod. [18].

I přesto, že parametry vlnitosti nejsou prozkoumány tak dobře jako parametry drsnosti povrchu a nejsou v praxi tak používané, mohou mít významný vliv na funkční vlastnosti povrchu. Například při posuzování rotačních součástí je vlnitost podstatná při potlačení vibrací při chodu [18]. Dále je také vlnitost důležitá u třecích ploch, protože při velké vlnitosti povrchu se mohou tyto plochy zadřít.

Při posuzování vlnitosti povrchu se nejdříve musí zjistit, zdali je vlnitost pro funkci významná. K tomuto posouzení se používá povrchový poměr [18]:

$$rw(x) = \frac{R(x)}{W(x)} \quad (7)$$

kde:  $rw(x)$  – povrchový poměr [–]

$R(x)$  – parametr drsnosti povrchu [ $\mu\text{m}$ ]

$W(x)$  – parametr vlnitosti povrchu [ $\mu\text{m}$ ]

Je-li  $rw(x) > 1$ , je významnější drsnost povrchu, a je-li  $rw(x) < 1$ , pak je významnější vlnitost povrchu. Vzhledem k menšímu množství výchylek tohoto profilu než u profilu drsnosti, je část parametrů, které jsou měřeny u drsnosti povrchu, bezvýznamná. Vychází z malého množství informací, čímž dochází ke statistické nepřesnosti. Je také prakticky bezvýznamné měření hned několika charakteristik vlnitosti vztažené k jedné funkční ploše [18], protože další měřené parametry by přinesly pouze zanedbatelné množství nových informací. Proto je nutné si zvolit charakteristiky, které nejlépe vystihují vlastnosti spojené s vlnitostí povrchu a jsou zároveň statisticky spolehlivé, a na ty se zaměřovat.

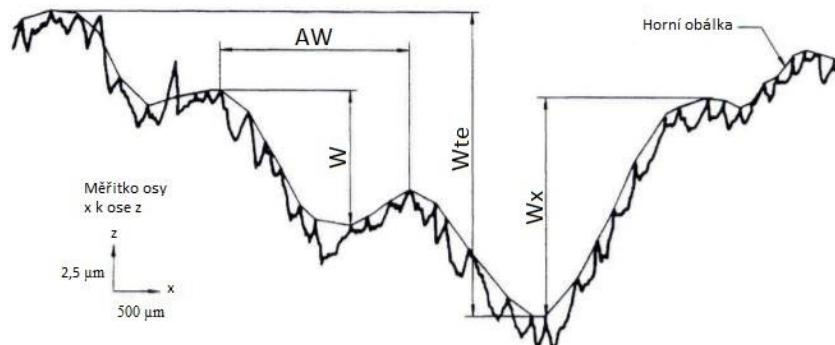
Pro posouzení vlnitosti tak postačuje použití parametru jako je  $W_a$ , který je snadno měřitelný a dává statisticky spolehlivé informace. Kromě tohoto parametru se také v praxi využívají parametry získané metodou motif. Jsou definovány celkem 4 parametry motif vlnitosti, které jsou uvedeny v tabulce 3-5.

Tab. 3-5 Parametry vlnitosti motif [13]

Název parametru	Značka
Průměrná rozteč prvků motif vlnitosti	AW
Průměrná hloubka prvků motif vlnitosti	W
Největší hloubka vlnitosti	Wx
Celková hloubka vlnitosti	Wte

Největší praktický význam pro použití má parametr největší hloubka vlnitosti  $W_x$ , který je graficky znázorněn na obrázku 3-13. Výstižně popisuje funkčnost některých ploch ve vzájemném kontaktu jako při suchém tření, valení, dynamickém těsnění s těsnicí vložkou [15] apod.

Užitečné mohou být i parametry průměrná rozteč prvků motif vlnitosti AW a průměrná hloubka prvků motif vlnitosti W, které jsou opět znázorněny na obrázku 13. Lépe vystihují vlastnosti povrchů užitečné pro statické těsnění [15].



Obr. 3-13 Grafické znázornění parametrů motif vlnitosti [19]

### P-parametry

P-parametry jsou brány ze základního profilu, tedy z profilu, u něhož byl odstraněn šum za pomoci filtru  $\lambda_s$ . Tento profil obsahuje velké množství informací. Informace poskytuje z celého rozsahu základního profilu, který nebyl nijak upraven, což může přinést bližší přehled o povrchu jako celku. Velké množství informací však není žádným způsobem separováno. Proto je obtížné z tohoto profilu zjišťovat jednoznačné parametry o jednotlivých vlastnostech povrchu, ze kterých je poté celkový základní profil poskládán.

V praxi se příliš s tímto druhem parametrů nesetkáváme. Přesto parametr průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu  $P_a$  je možné využít k výpočtu velikosti prohlubně. To může mít vliv při určování množství potřebného maziva [17].

### 3.2.2 Základní pojmy a popis parametrů plošné metody textury povrchu

Plošná metoda hodnocení textury povrchu se od 80. let značně posunula ve vývoji vpřed. Dává nové možnosti v měření a vyhodnocování funkčních vlastností textury povrchu, které u profilové metody nebyly možné. Je v mnoha ohledech podobná jako profilová metoda. Hodnocení povrchu však probíhá ve třech osách. Vznikne tak celkový obraz snímaného povrchu, který lze vidět na obrázku 3-14. Jsou zde také definovány prvky plochy, filtry pro úpravu a lepší pochopení různých částí povrchu, či parametry popsané v normách.

Rovněž jako u profilové metody bylo nutné definovat základní profil, u plošné metody to je základní povrch. Základní povrch se získá ze snímané plochy a následným použitím S-filtru, jenž je plošným ekvivalentem profilového filtru  $\lambda_s$ , který odstraňuje šum.

Před určováním samotných parametrů je nutno nejdříve zavést souřadný systém. Ten je takřka stejný jako u profilové metody. Osy X a Y leží na skutečném povrchu a jsou na sebe kolmé. Osa Z vystupuje z materiálu ven. Jediný rozdíl je ten, že zde odpadá potřeba definice osy X ve směru snímání. Jednotlivé body jsou pak funkčně vyjádřeny způsobem  $z = f(x,y)$  [20].

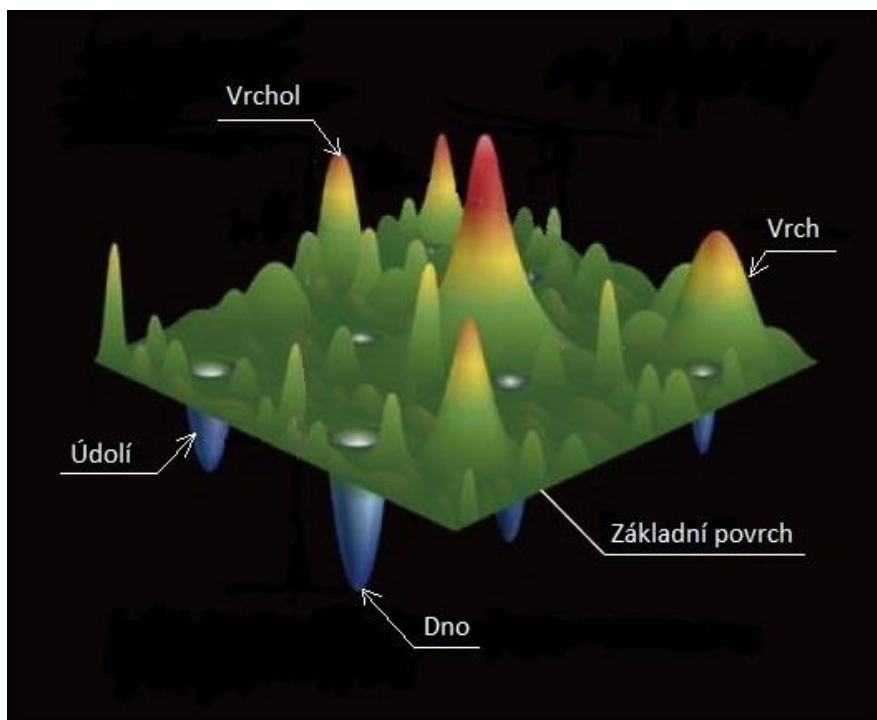
Před odečítáním parametrů ze snímané plochy je potřeba upravit základní povrch tak, aby z něj bylo možné definovat jednotlivé parametry, které budou vhodně vystihovat různé vlastnosti textury povrchu. To se provádí za pomoci F-operace a L-filtru [20]. F-operace má za úkol odstranit jmenovitý tvar od základního povrchu. Tímto způsobem vznikne S-F povrch. Poté je možno určit S-L povrch, který je ekvivalentní k profilu drsnosti. To se provádí za pomoci L-filtru, který odstraňuje velké stranové složky povrchu.

Topografické prvky, které můžeme na povrchu sledovat, se dělí na bodové, čárové a plošné. Mezi bodové topografické prvky patří vrcholy a dna, mezi čárové údolnice, hřbetnice a vrstevnice a mezi plošné patří vrchy a údolí. Některé z těchto prvků jsou znázorněné na obrázku 3-14.

Vrchol je bod, který je nejvyšší v jeho okolí. Ve vrcholu končí všechny čáry nejvyššího spádu na dané oblasti, jenž se nazývá vrch. Vrchy, které jsou navzájem přilehlé, jsou odděleny čarou údolnicí [20].

Dno je bod, který je nejnižší v jeho okolí (je opakem vrcholu). V dně rovněž končí všechny čáry nejvyššího spádu na dané oblasti, která se nazývá údolí. Údolí, jež jsou přilehlá, jsou oddělena čarou údolnicí [20].

Vrstevnice je čára, která spojuje body o stejné výšce [20].



Obr. 3-14 Prostorový obrázek povrchu [14]

Plošné parametry textury povrchu se dělí podle dvou skupin, a to na parametry pole a parametry prvku. Většina parametrů patří do skupiny parametrů pole. Ty se pak dále dělí na S-parametry a na V-parametry [12]. V této práci budou popsány blíže parametry pole, které lze jasněji kvantifikovat.

### S-parametry

Již podle názvu je zřejmé, že se jedná o plošné parametry textury povrchu. Podle normy ČSN EN ISO 25178-2 [20] je definováno 12 S-parametrů pole, které lze rozdělit do 4 skupin: výškové, prostorové, hybridní a smíšené.

Výškové parametry udávají vlastnosti povrchu související s odchylkou amplitudy. Tyto parametry jsou podobné profilovým parametrům, jenž také závisí na výchylce amplitudy (snímacího hrotu). I přesto, že jsou profilové parametry posuzovány pouze z relativně malé vybrané části povrchu, jsou velmi významné. Tudíž plošné výškové parametry jsou nejen statisticky daleko významnější. Grafické znázornění výškových plošných parametrů je obtížné a mnohdy nepřehledné. Vzhledem k podobnému významu profilových výškových parametrů je možné znázornění na obrázcích povrchu získaných profilovou metodou.

Nejvyužívanějšími a staticky nejstabilnějšími parametry jsou aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu  $Sa$  a základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu  $Sq$ , který lze početně vyjádřit podle vzorce 8. Graficky je znázorněn na obrázku 3-7. Parametr  $Sq$  představuje plošnou alternativu k profilovému parametru průměrné kvadratické úchyly posuzovaného profilu  $Rq$ . Jeho vlastnosti jsou tak velmi podobné. Je statisticky stabilnější nežli parametr  $Sa$ , protože využívá druhých mocnin výškových souřadnic, díky čemuž je mnohem náchylnější na extrémní hodnoty vrchů a údolí. Tohoto se využívá zejména u optických ploch, kde jsou velké hodnoty vrchů a údolí nežádoucí.

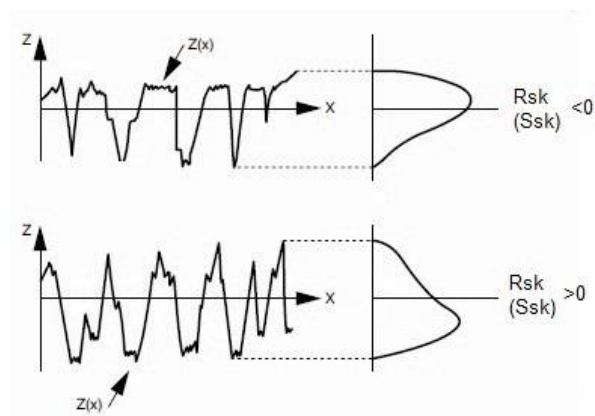
$$Sq = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x, y) dx dy} \quad (8)$$

Parametr  $Sa$  představuje plošnou alternativu k profilovému parametru drsnosti  $Ra$ . Jeho vlastnosti jsou tak velmi podobné. Podstatu tohoto parametru lze početně vyjádřit podle vzorce 9. Stejně jako tomu bylo u profilového ekvivalentu, tento parametr nemusí vždy přesně vystihovat vzhled povrchu, a tím i jeho funkční vlastnosti. Lze jej však účinně použít k hodnocení obráběných povrchů [21], především pro vyjádření její životnosti a vlivů souvisejících s kontaktním namáháním, únosností uložení, těsností spojení, odolností proti korozi, elektrickou a tepelnou vodivostí, schopností odrazet světelné paprsky, teplo a součinitelem tření [15].

$$Sa = \iint_A |z(x, y)| dx dy \quad (9)$$

Parametr  $Ssk$  [20] představuje plošnou alternativu k profilovému parametru drsnosti  $Rsk$ . Početně lze tento parametr vyjádřit podle rovnice 10. Pomocí tohoto parametru lze posoudit symetrii vrcholů měřeného povrchu. Může nabývat kladných i záporných hodnot, přičemž kladná hodnota představuje převládající množství vrchů a záporná hodnota převládající množství údolí. Když je tato hodnota rovna přibližně nule, pak je na snímaném povrchu přibližně stejné množství vrchů a údolí. Graficky jsou tyto jevy znázorněny na obrázku 3-15. Nejvíce účinný je tento parametr pro posuzování honovaných povrchů [21].

$$Ssk = \frac{1}{Sq^3} \left[ \frac{1}{A} \iint_A z^3(x, y) dx dy \right] \quad (10)$$



Obr. 3-15 Grafické znázornění parametru  $Rsk$  (ve 3D  $Ssk$ ) [14]

Parametry maximální výška píku  $S_p$  a maximální hloubka prohlubně  $S_v$ , jsou plošnými ekvivalenty profilových parametrů  $R_p$  a  $R_v$ . Jejich vlastnosti jsou tak takřka stejné jako u profilových ekvivalentů. Parametr  $S_p$  představující nejvyšší hodnotu vrcholu v posuzované oblasti může vhodně vyjadřovat tření součásti během jejího záběhu. Oproti tomu parametr  $S_v$  reprezentuje hodnotu nejhlubšího dna hodnoceného povrchu, což je velmi důležité při určování nejnebezpečnějšího místa povrchu pro vznik trhliny, a tím i životnosti součásti.

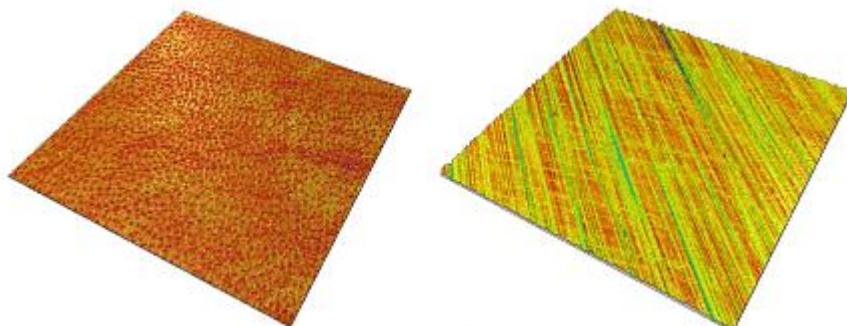
Maximální výška omezené stupnice povrchu  $S_z$  se určí jako součet hodnot  $S_p$  a  $S_v$ . V podstatě se jedná o součet nejvyššího vrcholu a nejhlubšího dna měřené plochy. Všechny tyto tři parametry mohou být zavádějící, jelikož při opakovaném měření lze pozorovat zcela jiné naměřené hodnoty. Proto se pro spolehlivá data musí provádět značné množství měření různých míst povrchu. Parametr  $S_z$  je vhodný pro posouzení životnosti součásti, těsnících povrchů nebo povrchů pro nanášení povlaků [21]. Všechny tyto parametry jsou graficky znázorněny na obrázcích 3-8, 3-9 a 3-10.

Tab. 3-5 Plošné S-parametry výškové [20]

Název	Značka
Základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu	$S_q$
Šikmost omezené stupnice povrchu	$S_{sk}$
Špičatost omezené stupnice povrchu	$S_{ku}$
Maximální výška píku omezené stupnice povrchu	$S_p$
Maximální hloubka prohlubně omezené stupnice povrchu	$S_v$
Maximální výška omezené stupnice povrchu	$S_z$
Aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu	$S_a$

Ve skupině prostorových parametrů se lze setkat se dvěma parametry. Tím prvním je délka autokorelace  $S_{al}$ . Tento parametr vyjadřuje horizontální vzdálenost nejrychlejšího poklesu na předem specifikovanou hodnotu. Je užitečný pro volbu místa měření, aby měřené hodnoty přinášely co největší množství užitečných informací o snímaném povrchu [22].

Dalším prostorovým parametrem je poměr aspektu textury Str. Ten je vhodný pro posouzení izotropie<sup>4</sup> povrchu, jež je lépe znázorněna na obrázku 3-16. Je to bezrozměrná veličina rovna od 0 do 1. Povrch je izotropní, pokud se hodnota Str blíží 1. S hodnotami blízkými 0 je povrch anizotropní [22]. V tomto případě směr textury povrchu udává parametr Std, který bude blíže popsán po představení hybridních parametrů.



Obr. 3-16 Izotropní (vlevo) a anizotropní (vpravo) povrch [23]

Tab. 3-6 Plošné S-parametry prostorové [20]

Název	Značka
Délka autokorelace	Sal
Poměr aspektu textury	Str

Hybridní parametry vycházejí z amplitudových i prostorových vlastností. Používají se pro rozlišení povrchů s podobnou drsností. Nevýhodou těchto parametrů je však to, že je lze z naměřených dat obtížněji zpracovat.

Základ průměrného čtverce gradientu omezené stupnici povrchu Sdq se používá pro povrchy s podobnou hodnotou drsnosti Sa. Jedná se o bezrozměrnou veličinu, jejíž hodnoty se mohou pohybovat v intervalu od 0 po 1. Je definována kvadratická odchylka sklonu měřeného povrchu. Vyjadřuje tedy sklon povrchu od ideální roviny. Hodnota parametru Sdq rovna 0 značí ideální rovinu. Tento parametr je vhodný k posouzení těsnících a pohledových povrchů [21].

<sup>4</sup> Izotropie povrchu – různorodost vlastností v různých směrech povrchu

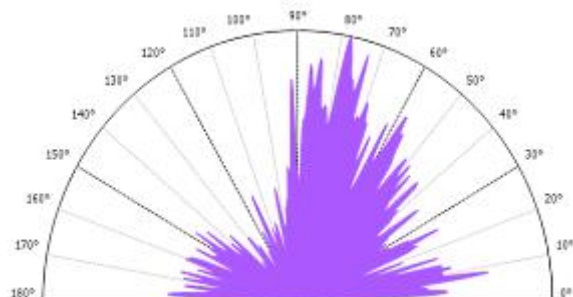


Další hybridní parametr poměr rozvinuté mezifázové plochy omezené stupnicí povrchu Sdr je stejně jako Sdq vhodný pro posouzení povrchů s podobnou drsností Sa. Tento parametr si lze představit jako poměr části povrchu, který je od ideální plochy přebytečný ku povrchu ideální plochy. Z toho vyplývá, že jde o bezrozměrnou veličinu. Hodnoty této veličiny se obvykle pohybují od 0 do 0,1. Tímto parametrem je možné posoudit vhodnost povrchu k povlakování nebo také adhezi povrchu [21].

Tab. 3-7 Plošné S-parametry hybridní a smíšený S-parametr [20]

Název	Značka
Základ průměrného čtverce gradientu omezené stupnicí povrchu	Sdq
Poměr rozvinuté mezifázové plochy omezené stupnicí povrchu	Sdr
Směr textury omezené stupnice povrchu	Std

Jak napovídá název, směr textury omezené stupnice povrchu Std slouží k přiřazení dominantního směru textury povrchu. Jeho hodnota tak vyjadřuje úhel převládající textury povrchu k ose y [11]. Získává se pomocí tzv. Fourierova spektra převedeného do polárních souřadnic, jehož znázornění lze vidět na obrázku 3-17. Tento směr může mít významnou roli u těsnících ploch, u kterých hrozí, že při nesprávné orientaci textury povrchu dochází k porušení těsnící funkce povrchu [21]. Jak bylo výše zmíněno, tento parametr je vhodné použít k povrchům, které vykazují hodnoty parametru Str blížících se 0. Jedná se například o frézované povrchy apod.

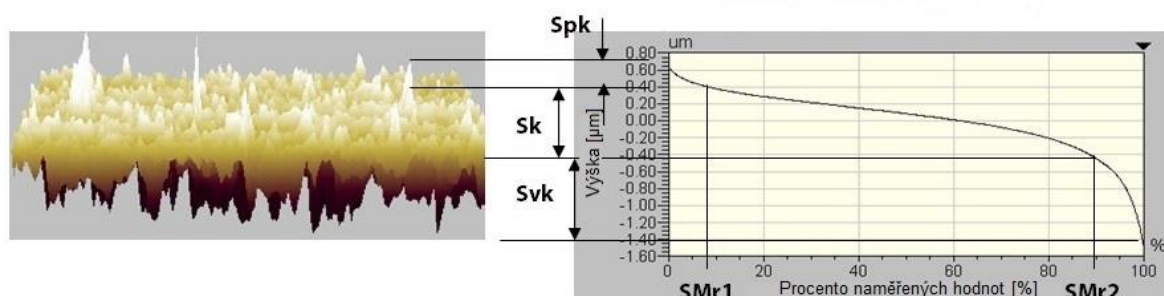


Obr. 3-17 Fourierovo spektrum v polárních souřadnicích [23]

## V-parametry

Vzhledem k náročnosti na měření a zpracování doposud nejsou V-parametry tak využívány jako S-parametry. I přesto dokážou poskytnout odlišné a užitečné informace. Jsou 4 druhy, které se získávají z křivky materiálového poměru. Jsou to parametry plochy, objemu materiálu, neplatného objemu a jeden další parametr.

Parametry plochy mohou být velmi významné. Používají se buď jednotlivé parametry nebo jejich poměry, které jsou mnohdy lepším ukazatelem dané funkční vlastnosti. Nejvýznamnějšími parametry tohoto typu jsou  $S_k$ ,  $S_{pk}$  a  $S_{vk}$ , které výškově rozdělují povrch na jádro, údolí a vrchy, jež jsou určeny podle množství materiálu nasnímaných v různých výškách.



Obr. 3-18 Křivka materiálového poměru s naznačením některých plošných parametrů [21]

Jak již název vypovídá, výška jádra  $S_k$  představuje výškový rozměr jádra povrchu při odstranění vrchů vyčnívajících nad jádro a údolí pod jádrem. Graficky je tento parametr znázorněn na obrázku 3-18. Jeho využití spočívá v lepším nahrazení parametru  $S_z$  v případě, kdyby nepřiměřené hodnoty  $S_z$  zkreslily výsledky měření [24].

Z obrázku 3-18 lze také vidět, že redukovaná výška píku  $S_{pk}$  je výška vrcholů vyčnívajících nad jádro. Pomocí tohoto parametru lze odvodit plochu materiálu při kontaktu v době záběhu [24] a výšku materiálu, která bude odstraněna v době záběhu.

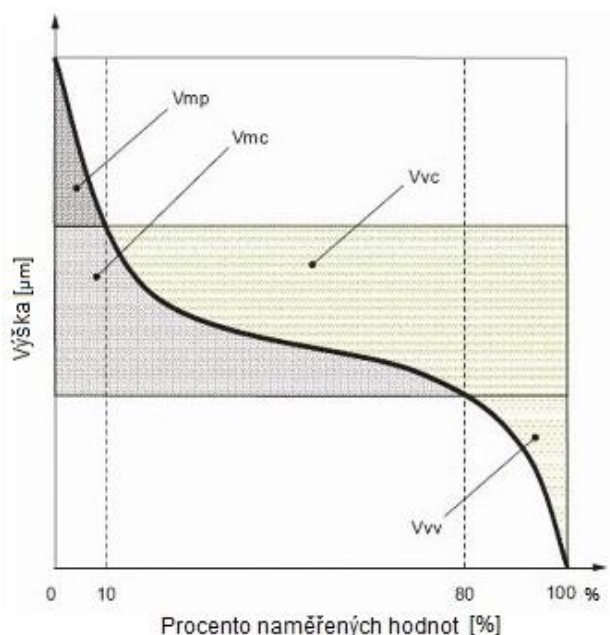
Další parametr plochy redukovaná plocha údolí  $S_{vk}$  je hloubka údolí vyčnívajících pod jádrem. Význam tohoto parametru je lépe patrný z obrázku 3-18. Pomocí tohoto parametru jsme schopni určit vlastnosti související s retencí maziva [24], ale také náchylnost k zachytávání úlomků materiálu v údolích.

Parametry  $S_k$ ,  $S_{pk}$  a  $S_{vk}$  se navzájem ovlivňují. Nejsme však schopni jedním parametrem vyjádřit hodnoty všech tří. To lze za pomoci alespoň dvou parametrů. To je důvod, proč se používají poměry těchto parametrů. Praktický význam je podobný přínosu výškového S-parametru  $S_{sk}$ . Jedná se o určení, zdali na měřeném povrchu převládají vrchy nebo údolí. To může být vhodné pro posouzení těsnících povrchů nebo vnitřních povrchů ložisek.

Tab. 3-8 Plošné a další V-parametry plochy [20]

<b>Název</b>	<b>Značka</b>
Výška jádra	Sk
Redukovaná výška píku	Spk
Redukovaná hloubka údolí	Svk
Poměr materiálu	Smr1
Poměr materiálu	Smr2
Základ průměrné úchytky čtverců plošiny	Spq
Základ průměrné úchytky čtverců údolí	Svq
Poměr materiálu	Smq
Extrémní výška píku	Sxp

Následující 4 parametry nejsou plošné, ale objemové, tudíž vyjadřují objemové charakteristiky povrchu. Jak lze vidět na obrázku 3-19, tyto parametry také vycházejí z křivky materiálového poměru. Oproti parametrům plochy, které se na této křivce znázorňovaly jako hodnoty odečtené na osách, parametry objemu lze odečíst jako plochy, které ohraničuje určitá část křivky a osy vyjadřující výšku materiálu.



Obr. 3-19 Křivka materiálového poměru s objemovými charakteristikami [17]

Jak lze vidět z křivky materiálového poměru, parametr neplatný objem údolí omezené stupnice povrchu  $V_{vv}$  vyjadřuje přibližnou hodnotu objemu materiálu údolí. Tento parametr tak může být vhodným ukazatelem pro určení množství potřebného maziva. Vyjadřuje objem maziva, které bude zachyceno v údolích [22]. Toto mazivo tak v době záběhu nebude příliš užitečné, ale po výrazném opotřebením může být přínosné. Příliš vysoké hodnoty tohoto parametru však také negativně mohou ovlivnit náchylnost plochy pro vznik trhlin, a tím její životnost.

Z křivky materiálového poměru je možné také pozorovat, že parametr neplatný objem jádra omezené stupnice povrchu  $V_{vc}$  vyjadřuje prázdný objem jádra. Je také důležitý při určování množství maziva, tentokrát však usazeného v jádře povrchu. Poskytuje informace o množství maziva, které bude užité po odstranění vrcholů při chodu, což je žádoucí pro správné mazání součásti [22].

Tab. 3-9 Plošné V-parametry neplatného objemu [20]

Název	Značka
Neplatný objem údolí omezené stupnice povrchu	$V_{vv}$
Neplatný objem jádra omezené stupnice povrchu	$V_{vc}$

Na obrázku 3-19 můžeme vidět znázorněný parametr pík objemu materiálu omezené stupnicí povrchu  $V_{mp}$ . Jedná se o objem materiálu vrchů vyčnívajících nad jádrem povrchu. Tudiž jde o objem odstraněného materiálu při záběhu.

Poslední parametr znázorněný na obrázku 3-19 je jádro objemu materiálu omezené stupnicí povrchu  $V_{mc}$ . Lze odvodit, že se jedná o objem materiálu jádra. Toto množství povrchu zde bude přenášet zatížení po záběhu [21].

Tab. 3-10 Plošné V-parametry objemu materiálu [20]

<b>Název</b>	<b>Značka</b>
Pík objemu materiálu omezené stupnicí povrchu	$V_{mp}$
Jádro objemu materiálu omezené stupnicí povrchu	$V_{mc}$

### 3.3 Bezkontaktní měření textury povrchu

Bezkontaktním měřením textury povrchu se vědci zabývají již od 80. let 20. století. Tento způsob tak lze považovat za relativně nový. Od svého vzniku se tato metoda výrazně posunula vpřed a stále se vyvíjí. V praxi se setkáváme převážně s profilovou metodou měření, ovšem bezkontaktní metodu je možné vidat stále více.

Je více metod, jakými lze bezkontaktně změřit texturu povrchu, avšak téměř vždy jsou to metody optické. Princip této metody je do jisté míry podobný profilovému měření textury povrchu, kde je textura zaznamenávána snímacím hrotem a převedena do digitální podoby ke zpracování. Snímací hrot je zde nahrazen paprskem světla. Tento způsob vyhodnocování textury povrchu s sebou samozřejmě nese značné množství výhod i nevýhod oproti profilové metodě.

Největší výhodou je samotné měření ve třech osách namísto dvou, čímž lze vytvořit celkový obraz snímaného povrchu. Tímto lze získat mnohem více informací, a také lepší představu o samotném povrchu a jeho funkčních vlastnostech. Další značnou výhodou je to, že při snímání povrchu nemůže dojít k poškození posuzovaného povrchu snímacím hrotem a zkreslení naměřených hodnot (zvláště u měkkých materiálů) [25]. Mezi další výhody patří možnost rychlého měření povrchu i ve výrobním prostředí. Samotné měření v tom případě nezasahuje v takové míře do výrobního procesu, a tím dochází k snížení časové náročnosti výroby [26].

Mezi nevýhody této metody patří například složitější nastavení přístrojů pro zaznamenání povrchu. S větším množstvím dat dochází k prodloužení doby analyzování dat. Je to způsobené jak samotným množstvím dat, tak náročností na jejich zpracování, což si vyžaduje i daleko složitější výpočetní algoritmy [26]. Největší nevýhodou bezkontaktního hodnocení textury povrchu je tak jeho cena, která je vysoká kvůli drahým přístrojům na měření i zpracování naměřených dat.

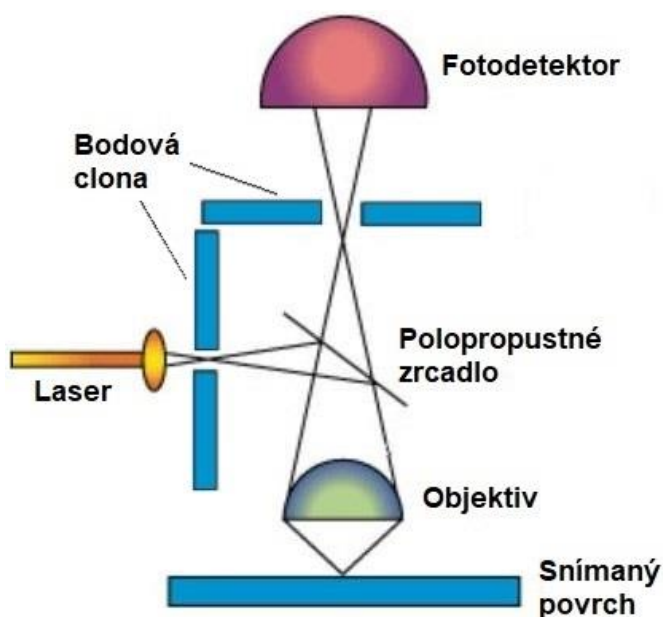
V některých případech však může dojít ke zkreslení výsledků na okrajových místech měření a v místech náhlých tvarových změn, což může při provozu vést ke značným problémům se samotnou funkcí plochy. Některé způsoby také nejsou vhodné k měření povrchů s příliš nízkou nebo vysokou odrazivostí, jako jsou průhledné či černé povrchy.

V následujících kapitolách budou představeny metody bezkontaktního měření textury povrchu, pro které zde budou popsány obecné informace, výhody a nevýhody, ale především principy fungování. Často také bude zmiňován pojem rozlišení. Rozlišení je jedním z nejdůležitějších parametrů mikroskopu či jiného optického zařízení, které nám dává zvětšený záznam snímaného obrazu. Je to vzdálenost, ve které jsme ještě schopni od sebe odlišit dva body [27]. Například rozlišení 10  $\mu\text{m}$  znamená, že na zvětšeném obrazu jsme schopni od sebe odlišit dva body, které jsou od sebe 10  $\mu\text{m}$  daleko.

### 3.3.1 Konfokální mikroskopie

Konfokální mikroskopy jsou zdokonalené optické mikroskopy, a tak dosahují daleko lepšího rozlišení. Dosahují vertikálního rozlišení až 3 nm a horizontálního rozlišení přibližně 1  $\mu\text{m}$  [12]. Udává tak velmi přesné informace o snímaném bodu. Nevýhodou tohoto způsobu měření je, že nejsme schopni dostatečně přesně měřit strmé plochy. Jsou dva druhy konfokálních mikroskopů, rastrovací a s rotujícím diskem. Oba však pracují na téměř stejném principu. Tato metoda je pak dále blíže popsána v mezinárodní normě ČSN EN ISO 25178-607 [28].

Ze zdroje světla vychází světelný paprsek, který směřuje k polopropustnému zrcadlu přes konfokální bodovou clonu. Konfokální bodová clona je clona, která má malou díрку, přes kterou prochází paprsek. Ten se od zrcadla odráží a směřuje ke snímanému povrchu, kde je pomocí objektivu zaostřen na bod o velikosti rozlišovací meze [12]. Odtud se paprsek odráží zpět a přes objektiv, polopropustné zrcadlo a konfokální clonu dopadá na fotodetektor. Průchodem paprsku přes clonu je zajištěno, že k fotodetektoru se dostane paprsek s velmi přesnými informacemi o snímaném bodu, jenž obsahují jen minimum šumu. Princip funkce je znázorněn na laserovém rastrovacím konfokálním mikroskopu na obrázku 3-20.



Obr. 3-20 Princip funkce konfokálního laserového rastrovacího mikroskopu [29]

## Laserový rastrovací konfokální mikroskop

Už z názvu laserového rastrovacího konfokálního mikroskopu (*Confocal laser scanning microscope – CLSM*) vyplývá, že je zde jako zdroj světla použit laserový paprsek. Ten je využit hlavně z důvodu možnosti velmi přesného zaostření pouze na snímání bod [30], o kterém tak lze získat přesné informace o horizontálním rozlišení až 100 nm [31]. Tímto způsobem lze velice pomalu získat plošný obraz snímané plochy. Je zde nutnost postupného snímání bod po bodu a dochází tak k pořízení pouze několika málo snímků za sekundu [12]. Proto se tento způsob snímání v běžné praxi příliš nepoužívá. Jeho využití je jen ve výjimečných případech, kdy přesnost běžně používaných způsobů měření není dostatečná.

## Konfokální mikroskop s rotujícím diskem

U tohoto typu konfokálního mikroskopu je využito bílého světla, jehož zaostření v tomto případě není tak časově náročné a lze tak pořídit přibližně 100 snímků za sekundu [12]. Při této rychlosti je již možné pořizovat plošné obrazy snímaného povrchu. Paprsek bílého světla zde prochází přes clonu v podobě Nipkowova kotouče, jenž má v sobě řadu otvorů uspořádaných do tzv. Archimedovy spirály<sup>5</sup> [32]. Pomocí velmi rychlé rotace při snímání lze získat plošný obraz snímaného povrchu.

### 3.3.2 Interferometr s fázovým posunem

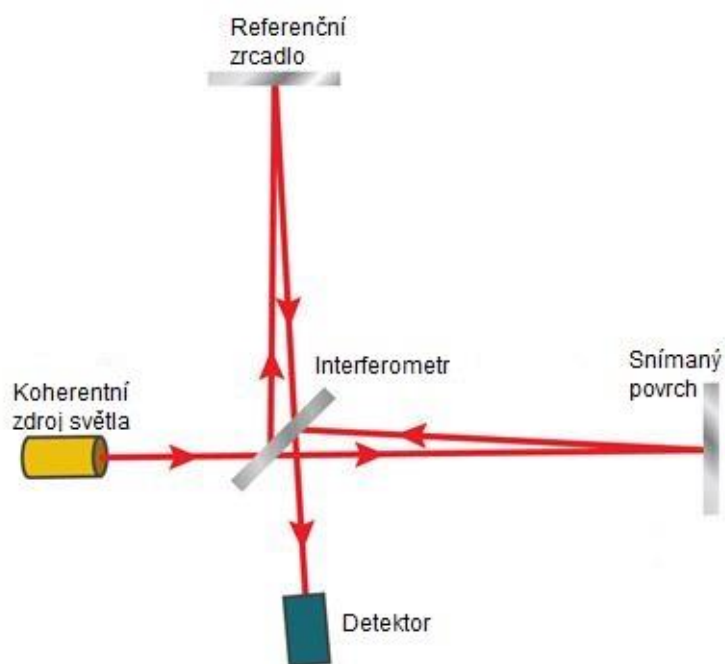
Dalším způsobem bezkontaktního měření je využití interferometru s fázovým posunem, který je schopen vytvořit velmi přesný obraz snímaného povrchu. Za pomoci fázového interferometru jsme schopni změřit povrch s průměrnou drsností o hodnotě 10krát menší, než je vlnová délka světla, která obvykle nabývá hodnot v řádech stovek nanometrů [34]. Používá se tak pro měření velmi hladkých povrchů. Podle tvaru a uspořádání jednotlivých částí lze fázové interferometry rozdělit do tří konfigurací. Jsou to konfigurace zvané Michelson, Mirau a Linnik, přičemž každá konfigurace disponuje odlišným rozlišením a tím i odlišnou pořizovací cenou [12]. Této metodě měření se věnuje také mezinárodní norma ČSN EN ISO 25178-603 [35].

Koherentní zdroj světla vyše paprsek do interferometru, kde se rozdělí na 2 paprsky. Jeden se odráží k referenčnímu zrcadlu, ten druhý pokračuje směrem k měřenému povrchu. Od referenčního zrcadla a měřeného povrchu se paprsky odráží zpět do interferometru, odkud jsou odraženy k detektoru [34]. Každý paprsek však urazil různou vzdálenost, přičemž tak vznikne fázový rozdíl, jenž detektor zaznamenává. Podle velikosti fázového rozdílu pak lze přiřadit výškovou souřadnici snímanému bodu. Princip funkce je znázorněn také na obrázku 3-21.

---

<sup>5</sup> Archimedova spirála – rovinná křivka, jejíž poloměr lineárně roste s rostoucí velikostí úhlu [33]





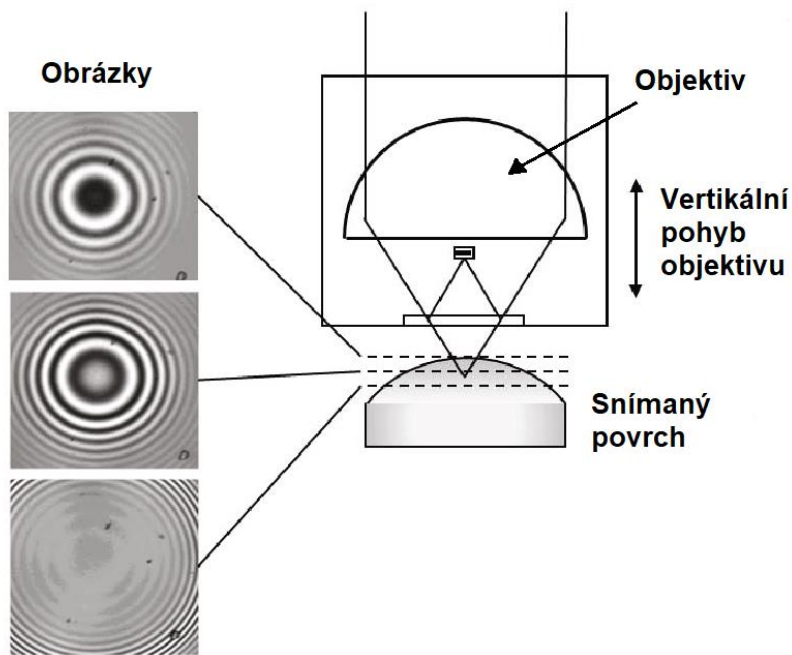
Obr.3-21 Princip funkce interferometru s fázovým posunem [34]

### 3.3.3 Spojitý skenovací interferometr

Další metodou bezkontaktního měření textury povrchu je metoda měření pomocí spojitého skenovacího interferometru (*Coherence Scanning Interferometry - CSI*). Tato metoda využívá ostrosti obrazu interferenčních proužků k přiřazení výškových souřadnic [11]. Při tom je použito bílé světlo. Stejně jako fázový interferometr se nejčastěji vyskytuje ve třech konfiguracích, Michelson, Mirau a Linnik. V tomto pořadí vzestupně stoupá kvalita získaného obrazu, avšak s tím také výrazně stoupá pořizovací cena i provozní náklady [12]. O této metodě lze také najít informace v mezinárodní normě ČSN EN ISO 25178-604 [36].

CSI patří mezi přesné způsoby bezkontaktního měření. Dosahuje vertikálního rozlišení až 3 nm a horizontálního až 1  $\mu\text{m}$  [11]. Tato metoda měření však není vhodná pro snímání strmých nebo tvarově složitých povrchů, což bude patrné z principu funkce. Další nevýhodou je také omezení pro měření příliš tlustého nebo průhledného materiálu [37].

Na snímaném povrchu jsou pomocí interference bílého světla vytvořeny interferenční proužky [12]. Jen část těchto proužků v určité vzdálenosti od objektivu je zaostřená. Poté se vertikálním směrem pohybuje s objektivem tak, že se mění zaostření interferenčních proužků obrazu podle toho, v jaké vzdálenosti se interferenční proužky nacházejí. Podle zaostření různých interferenčních proužků a vzdálenosti objektivu od snímaného povrchu lze přiřadit každému bodu jeho souřadnici ve směru osy z. Tímto způsobem vznikne celkový obraz snímaného povrchu. Princip funkce je znázorněn na obrázku 3-22.



Obr. 3-22 Princip spojitého skenovacího mikroskopu [38]

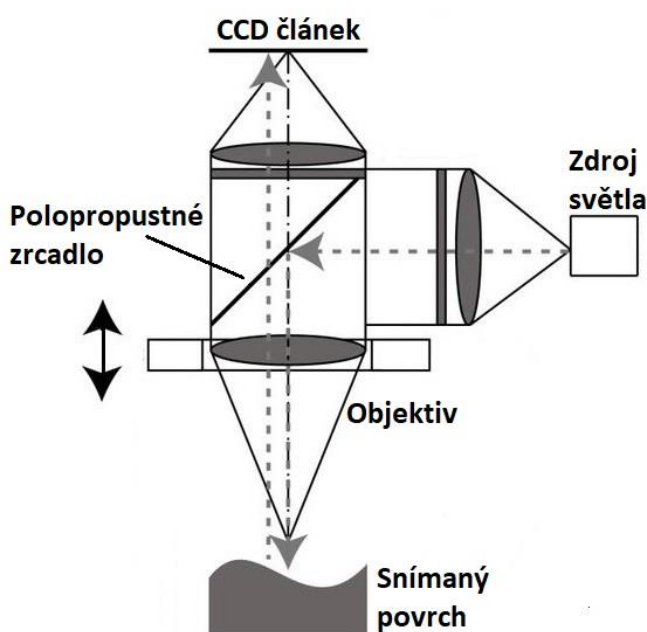
Při tvorbě celkového obrazu z jednotlivých měřených ploch mohou vzniknout nepřesnosti. Vzhledem k tomu, že jsou tyto nepřesnosti zanedbatelné, to celkovou přesnost interferometru příliš neovlivní [39].

### 3.3.4 Variace sond

Metoda Variace sond (z anglického *Focus variation*) patří k velmi přesným a zároveň rychlým metodám bezkontaktního měření. Z anglického názvu vyplývá, že k přiřazení výškových souřadnic probíhá podle míry zaostření snímaného bodu. Touto metodou měření se dále zabývá mezinárodní norma ČSN EN ISO 25178-606 [40].

Tato metoda dosahuje vertikálního rozlišení 10 nm a horizontálního rozlišení 400 nm. Tohoto rozlišení však dosahuje na ploše o velikosti 100 nm × 100 nm [41]. Velikou výhodou je také možnost použití různých druhů světla, čímž lze přizpůsobit měření pro různé materiály s různou odrazivostí a různě barevné materiály. Velikou výhodou je také možnost měření i velmi strmých ploch (o sklonu až 87°). Nevýhodou této metody je obtížné měření ploch s velmi malou lokální drsností nebo měření některých průhledných vzorků [42].

Mezi hlavní části mikroskopu používaného pro metodu Focus Variation jsou zdroj světla, objektiv, polopropustné zrcadlo, CCD<sup>6</sup> článek a série několika čoček. Ze zdroje světla přes čočku vychází paprsek světla směrem k polopropustnému zrcadlu. Odtud se odráží směrem k objektivu. Skrz tento objektiv pokračuje paprsek ke snímané ploše, kde však musí dojít k jejímu zaostření. Toho se dosahuje pomocí vertikálního pohybu objektivu. Od snímaného povrchu se paprsek odráží zpět. Skrze objektiv a polopropustné zrcadlo směřuje paprsek k sérii čoček a poté je zaznamenán CCD článkem. Podle míry zaostření a vzdálenosti objektivu od snímané plochy se pomocí speciálních vyhodnocovacích algoritmů přiřazuje ke snímanému bodu jeho výšková souřadnice, čímž postupně vzniká celkový 3D obraz snímaného povrchu. Popsaný princip funkce je znázorněn na obrázku 3-23.



Obr. 3-23 Princip variace sond [44]

### 3.3.5 Elektronový mikroskop

Tento druh mikroskopu je jedním ze způsobů měření s nejlepšími rozlišovacími schopnostmi, jakých můžeme doposud dosáhnout. Je to způsobeno tím, že k vytvoření zvětšeného obrazu nejsou využívány fotony jako nositelé světla, nýbrž jsou využívány elektrony. Tomu jsou také přizpůsobeny čočky mikroskopu. Oproti běžným optickým čočkám zde jsou elektromagnetické cívky [45].

---

<sup>6</sup> CCD článek – elektronická součástka zaznamenávající obrazovou informaci [43]

Zvětšení mikroskopu a tím i rozlišovací schopnosti jsou závislé na vlnové délce elektronů, kterou lze ovlivnit pomocí urychlovacího napětí. Při zvýšení urychlovacího napětí se zmenšuje vlnová délka elektronů, čímž se zlepšují rozlišovací schopnosti. Jakým způsobem se tyto parametry navzájem ovlivňují nám ukazuje vztah 11 [46]:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2 \cdot m \cdot e \cdot U}} \quad (11)$$

kde:  $\lambda$  – vlnová délka elektronu [nm]

$h$  – Planckova konstanta ( $6,626 \cdot 10^{-34}$  J·s)

$m$  – hmotnost elektronu ( $9,109 \cdot 10^{-31}$  kg)

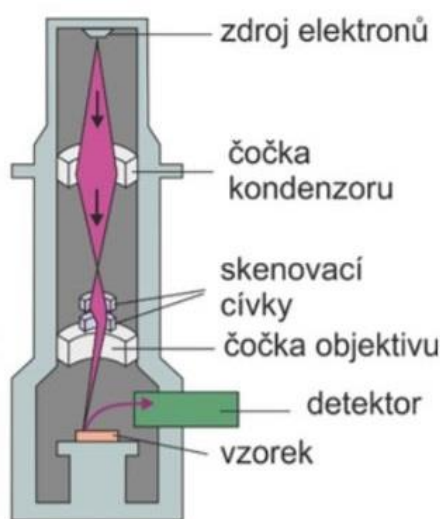
$e$  – náboj elektronu ( $1,602 \cdot 10^{-19}$  C)

$U$  – urychlovací napětí [V]

Elektronové mikroskopy se dělí na dva druhy. Tím prvním je transmisní elektronový mikroskop (TEM), který pro hodnocení textury povrchu není vhodný. Druhým typem elektronového mikroskopu je tzv. rastrovací, skenovací nebo také řádkovací elektronový mikroskop (SEM), který je možné využít k vyhodnocování textury povrchu.

Příprava vzorků pro SEM není tak složitá jako pro TEM. Přesto je nutné zajištění vakua. Navíc nelze provádět měření nevodivých materiálů, na které by se musela napařit či naprášit velmi tenká vrstva kovu [45], přičemž by tak mohlo dojít k mírnému zkreslení naměřených hodnot.

Princip SEM je vcelku prostý. Obraz vzniká pomocí svazku elektronů, které jsou emitovány wolframovou katodou při jejím zahřátí na přibližně 2700 °C. Tento svazek je pak pomocí elektromagnetických cívek urychlován a následně zaostřován na snímaném povrchu. Svazek pak následně interaguje s povrchem. Pro detekci interakce se poté využívá tzv. sekundárních elektronů, které jsou vyráženy z povrchu dopadajícími primárními elektrony [45].



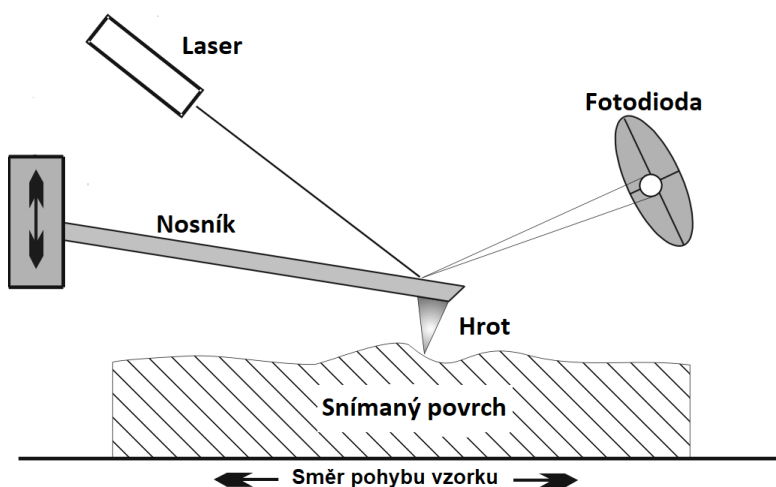
Obr. 3-24 Schéma elektronového rastrovacího mikroskopu [28]

Měření tímto způsobem bývá složité, což vede k finanční i časové náročnosti měření. Proto se s tímto způsobem v praxi neseťkáme tak často jako s jinými bezkontaktními způsoby měření textury povrchu.

### 3.3.6 Mikroskop atomárních sil

Mikroskop atomárních sil (*Atomic Force Microscopy - AFM*) je jednou z nejpřesnějších metod měření textury povrchu. Dosahuje rozlišení, které je téměř srovnatelné s měřením pomocí elektronového mikroskopu. Vertikální rozlišení, kterého je schopen mikroskop dosáhnout se pohybuje až okolo 2  $\mu\text{m}$ . Velikou nevýhodou tohoto měření je jeho časová náročnost. Pomocí této metody lze zaznamenat obraz pouze velmi malé plochy ( $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ ) za relativně dlouhou dobu. Je nutné také zajistit dokonalou izolaci od všech vibrací. Nesmí zde docházet k sebemenším vibracím mikroskopu, stolu, na kterém je upevněn, ani samotného snímaného objektu [47].

Samotný mikroskop se skládá z velmi ohebného nosníku, který má na sobě hrot o velmi malých rozměrech<sup>7</sup>, laseru jako zdroje světla a fotodetektoru. Zjednodušené schéma mikroskopu lze vidět na obrázku 3-25. Existují dva hlavní způsoby měření, a to bezkontaktní a kontaktní režim.



Obr. 3-25 Princip funkce mikroskopu atomárních sil [48]

<sup>7</sup> Výška hrotu nosníku se obvykle pohybuje okolo 10  $\mu\text{m}$ , poloměr zaoblení špičky hrotu se je pak přibližně 5 nm => náročná výroba

## Bezkontaktní režim měření

Měření při bezkontaktním režimu probíhá tak, že se hrotem nosníku přejíždí ve vzdálenosti několika nanometrů od snímaného povrchu, kde osciluje. V této malé vzdálenosti působí elektrostatické a Van der Waalsovy síly, které přitahují velmi ohebný nosník k povrchu. Tyto síly způsobují změnu amplitudy kmitání nosníku, přičemž velikost sil je závislá na vzdálenosti povrchu od hrotu nosníku. Změna amplitudy tak nastává při přejíždění po nerovnostech povrchu. Poté je zaznamenávána pomocí laserového paprsku, který se odráží od prohnutého nosníku a dopadá na fotodiodu. Podle prohnutí nosníku paprsek dopadne na určitou část fotodiody. Podle amplitudy kmitání zaznamenané fotodiodou lze poté přiřadit výškové souřadnice ke snímanému povrchu [47].

## Kontaktní režim měření

Princip kontaktního režimu měření spočívá v přejíždění hrotem nosníku přímo po nerovnostech povrchu. Síly při přejíždění způsobují prohnutí nosníku. Laserovým paprskem a fotodiodou je pak zaznamenáno prohnutí nosníku obdobně jako u bezkontaktního režimu měření. I přesto, že zde dochází ke kontaktu hrotu nosníku a povrchu, můžeme tento způsob zařadit do bezkontaktního měření textury povrchu. Vzhledem k tomu, že síly od povrchu jsou velmi malé, zde nedochází k poškození snímané plochy od hrotu nosníku. Kvůli velmi malým rozměrům hrotu nosníku však může dojít k jeho poškození. To je jeden z důvodů, proč bezkontaktní režim není příliš využíván [12].

## 4 DISKUZE

Ze současného stavu poznání se lze dozvědět informace o textuře povrchu, parametrech textury povrchu včetně použití a o možnostech bezkontaktního měření textury povrchu. Tyto informace mohou vést ke správnému výběru parametrů textury povrchu funkčních ploch vzhledem k jejich použití a funkčním vlastnostem, které musí splňovat. Je však potřeba ukázat, jak při výběru správných parametrů postupovat.

Proto zde bude postup obecně popsán a proveden na třech konkrétních příkladech funkčních ploch, které zde budou popsány vzhledem k jejich aplikaci. K těmto plochám pak budou doporučeny vhodné parametry pro předepsání na strojních výkresech, tak aby tyto plochy efektivně plnily svou danou funkci.

### 4.1 Obecná doporučení pro výběr vhodných parametrů textury povrchu

Pro výběr vhodných parametrů textury povrchu k daným plochám je nejdříve nutné si specifikovat měřenou plochu, především její funkční vlastnosti. Význam však může mít i způsob výroby nebo materiál povrchu.

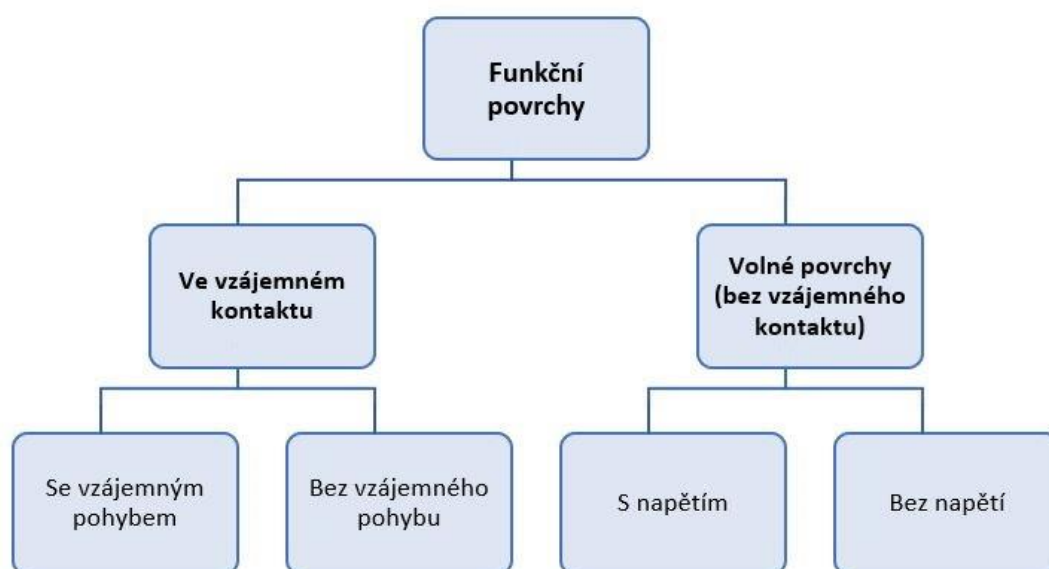
Funkčních vlastností, které lze na povrchu posuzovat, je velké množství. Některé souvisí s životností funkční plochy a některé se samotnou funkcí. Tyto vlastnosti jsou zásadní a významně ovlivňují kvalitu takřka všech strojních součástí.

Dále je nutné si zvolit způsob, jakým má být povrch měřen. To v sobě zahrnuje nejen samotný způsob měření, ale i požadovanou přesnost měření. Tyto parametry jsou pak závislé na přípustné ceně samotného měření a zpracování naměřených dat. Ve většině případů je však velkým omezením dostupnost měřících přístrojů. Proto také nebude způsob měření v ukázkách výběru parametrů zahrnut.

Asi posledním důležitým faktorem je určení, zdali bude povrch posuzován profilovými či plošnými parametry. To je závislé především na přesnosti, dostupnosti měřících přístrojů a přípustné ceně měření. Pro diskuzi této práce jsou doporučeny parametry z obou skupin parametrů, přičemž odůvodnění je provedeno pouze u plošných a objemových parametrů, kterými lze komplexněji posoudit funkční vlastnosti povrchu. Ovšem tato doporučení shodně platí i pro jejich profilové ekvivalenty.

Funkčních ploch je veliké množství, proto v této práci nelze provést detailně odůvodněný výběr vhodných parametrů pro všechny druhy funkčních ploch, se kterými se lze setkat. Proto zde je uvedeno rozdělení a uvedení parametrů k jednotlivým druhům funkčních ploch, ze kterých budou pak následně vybrány tři konkrétní příklady. Ty budou následně detailněji popsány včetně zdůvodnění výběru vhodných parametrů textury povrchu k předepsání.

Funkční plochy lze rozdělit podle mnoha různých hledisek. Na obrázku 4-1 lze vidět rozdělení funkčních ploch dle vzájemného kontaktu [15].



Obr. 4-1 Rozdělení funkčních povrchů

Jak lze vidět z obrázku 4-1, funkční plochy můžeme dle vzájemného kontaktu rozdělit do dvou skupin. Nejčastěji se u strojních součástí posuzuje textura funkčních povrchů ve vzájemném kontaktu, a to jak se vzájemným pohybem, tak bez vzájemného pohybu. V tabulkách 4-1 a 4-2 jsou tyto skupiny dále rozděleny podle jednotlivých funkcí plochy [15], ke kterým jsou uvedeny příklady strojních součástí a doporučené parametry k předepsání. Parametry uvedené v závorkách jsou vhodné jen u určitých aplikacích, a mohou tak poskytovat důležité informace o funkčním povrchu jen v některých konkrétních případech.



Tab. 4-1 Obecná doporučení parametrů textury povrchu k funkčním plochám ve vzájemném kontaktu se vzájemným pohybem

<b>Funkce plochy</b>	<b>Příklad</b>	<b>Doporučené profilové parametry</b>	<b>Doporučené plošné parametry</b>
Klouzání s mazáním	Ložisko na hřídeli, píst zážehového motoru	Ra, Rv, Rt, (Rz), Wa, (W)	Sa, Sz, (Sal), (Sk), (Svk), Vvc, (Vvv), Sv, kontrola S-F povrchu
Suché tření	Kotoučové brzdy, kluzná ložiska se suchým třením	Ra, Rv, Rt, (Rz), Wa, (W)	Sa, Sv, Sz, (Sk), (Svk), (Sal), kontrola S-F povrchu
Valení	Zuby ozubených kol, válcovací stolice	Ra, Rt, (Rz), Rv, Wa, (W)	Sa, (Sal), Vvc, Sv, Sz, (Sk), (Svk), (Str), (Std), kontrola S-F povrchu
Tekutinové tření	Vnitřní povrch potrubí, vnitřní povrch kluzného ložiska	Ra	Sa, (Sal)
Dynamické těsnění s těsnící vložkou	Těsnící kroužky (O kroužek, gufero...)	R <sub>dc</sub> , (R <sub>mr</sub> ), (Rt), (Rz), Wa, (W)	Spk, Sk, (Sz), (Sal) kontrola S-F povrchu
Dynamické těsnění bez těsnící vložky	Těsnění výtlačného prostoru zubového čerpadla ozubenými koly, těsnění pomocí ložisek	Rt, (Rz), Rp, Wa, (W)	Sal, Str, Std, Sdq, Sp, Spk, Sk, Sv, kontrola S-F povrchu

Tab. 4-2 Obecná doporučení parametrů textury povrchu k funkčním plochám ve vzájemném kontaktu bez vzájemného pohybu

Funkce plochy	Příklad	Doporučené profilové parametry	Doporučené plošné parametry
Statické těsnění s těsnicí vložkou	Těsnící pryžové vložky hydraulických a pneumatických zařízení	$R_p, R_{\Delta q}, W_a, (W)$	$S_p, S_{al}, S_{tr}, S_{td}, S_{dq}$ , kontrola S-F povrchu
Statické těsnění bez těsnicí vložky	Těsnění bez pryžové vložky hydraulických a pneumatických zařízení	$R_p, R_{\Delta q}, R_p, W_a, (W)$	$S_p, S_{al}, S_{tr}, S_{td}, S_{dq}$ , kontrola S-F povrchu
Spojení bez vzájemného pohybu s předpětím	Ozubené, řemenové nebo řetězové kolo nalisované na hřídeli	$R_a, R_{\Delta q}$	$S_a, S_k, V_{mc}$
Adheze	Namáhané lepené spoje	$R_a, R_t, (R_z)$	$S_a, S_{dr}, S_z$

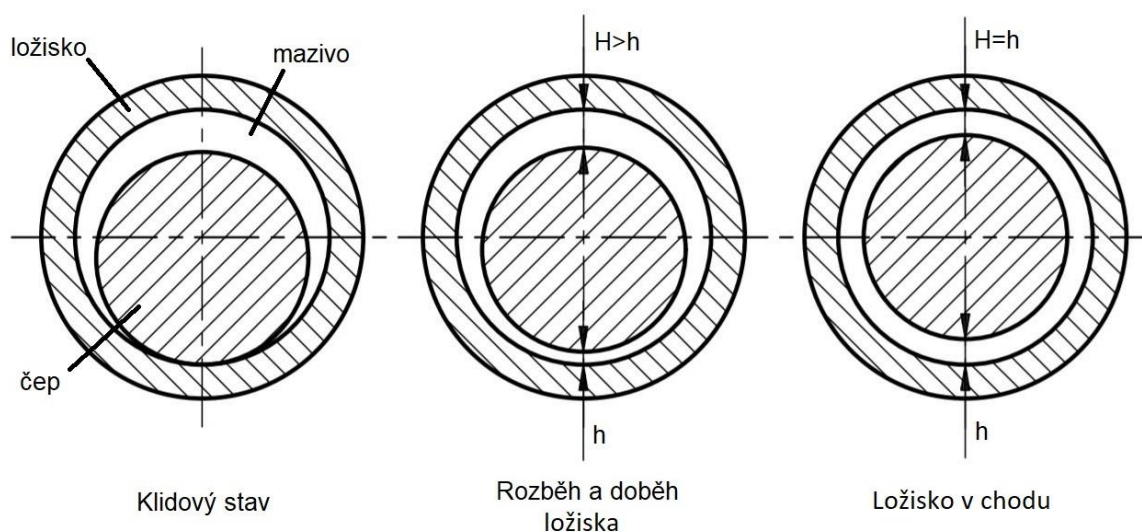
U volných ploch bez vzájemného kontaktu se u strojních součástí s předepsáním parametrů textury povrchu příliš nesetkáme. V určitých případech při určitých aplikacích však může být textura povrchu důležitá, například pro únavovou pevnost, korozní odolnost, pro posouzení vhodnosti povrchu pro nátěr či k elektrolytickému povlakování anebo posouzení vzhledu povrchu [15]. Tyto povrchy se dále mohou dělit na povrchy s napětím a bez napětí.

Nejvíce funkčních vlastností musí splňovat funkční plochy ve vzájemném kontaktu se vzájemným pohybem, se kterými se také u strojních součástí setkáváme nejčastěji. Proto zde budou provedena doporučení k předpisu parametrů textury povrchu na dvou takových plochách, a to na vnitřní ploše hydrodynamického kluzného ložiska a dále na vnější ploše těsnicího pístního kroužku. Třetí plochou pro výběr vhodných parametrů bude povrch optické plochy jako příklad kontroly textury povrchu plochy, která není ve vzájemném kontaktu.

## 4.2 Vnitřní povrch hydrodynamického kluzného ložiska

Kluzné ložisko je jednou z nejdůležitějších součástí ve strojírenství. Využívá se zejména pro zajištění větší životnosti hřídelí, které přenášejí kroucí moment. Tyto součásti jsou vyráběny ve velkých sériích, proto i mírné zlepšení vlastností ložiska může přinést značné finanční odlehčení výroby.

Jak již název napovídá, u hydrodynamických kluzných ložisek se využívá rotačního pohybu čepu k vytvoření souvislého filmu maziva mezi čepem a ložiskem. Tato vrstva vzniká za pomoci přílnavých sil mezi povrchem čepu a mazivem. Na obrázku 4-2 můžete vidět polohu ložiska a čepu při různých otáčkách.



Obr. 4-2 Poloha čepu a hydrodynamického kluzného ložiska v různých fázích chodu

Kluzné ložisko mnohdy musí splňovat vysoké nároky na životnost, přičemž často pracuje za velmi náročných podmínek, které v sobě zahrnují vysoké teploty, značné zatížení a chod ve vysokých otáčkách. V tabulce 4-3 lze vidět vybrané funkční vlastnosti [49] hydrodynamického kluzného ložiska, kde jsou ke každé vlastnosti předešlánsy parametry, jenž je vhodně ovlivňují.

Tab. 4-3 Funkční vlastnosti hydrodynamického kluzného ložiska s vybranými parametry textury povrchu

<b>Funkční vlastnost</b>	<b>Profilový parametr</b>	<b>Plošný parametr</b>
Odolnost proti korozi	Ra, Rp, Rt, (Rz)	Sa, Sp, Sz, Svk, Sk
Pohlcování tvrdých částic	Rmr	Vvv, Svk
Odolnost při rozběhu a doběhu ložiska	Ra, Rp	Sa, Sp
Nízký součinitel tření	Ra	Sa
Schopnost udržovat mazivo v třecí zóně	R <sub>dc</sub>	Vvc
Vysoká životnost	Ra, Rsk, Rv	Sa, Ssk, Sv, Svk
Dobrá třecí kompatibilita s čepem ložiska	Ra	Sa

Pro tento druh součásti je důležité zajistit její dlouhou životnost, pro kterou jsou nebezpečné zejména nerovnosti související s drsností povrchu, ze kterých vznikají trhliny, jež jsou dále koncentrátoři napětí pro vznik únavového poškození ložiska. Proto je vhodné sledovat staticky stabilní parametr drsnosti povrchu Sa, pro který jsou běžné hodnoty řádově v desetínách až setinách mikrometru [50]. Extrémní hodnoty textury, jež jsou nejvíce nebezpečné pro vznik trhlin se mohou dále posuzovat parametry Sv a Sz, pro které lze očekávat vyšších hodnot oproti parametru Sa. Je možné i využití plošných V-parametrů jako jsou Svk a Sk.

Drsnost povrchu je u hydrodynamického ložiska významná i pro další funkční vlastnosti, jako jsou například odolnost při rozběhu a doběhu ložiska, nízký součinitel tření nebo třecí kompatibilita s čepem ložiska. Všechny tyto vlastnosti tak lze účinně postihnout parametrem drsnosti povrchu Sa. Odolnost při rozběhu a doběhu je možno také účinně vyjádřit parametrem Sp, který využívá třetích mocnin výškových souřadnic, čímž se dá očekávat jeho vyšších hodnot.

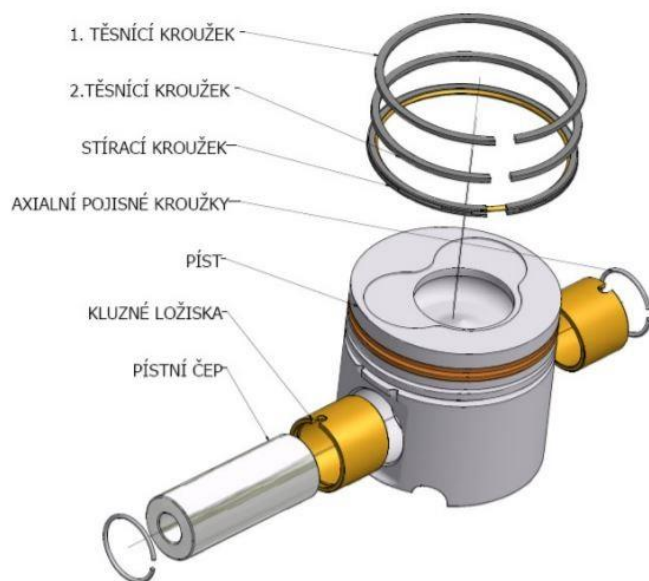
Koroze vzniká v mikronerovnostech povrchu zejména pak v údolích, proto lze tuto funkční vlastnost účinně ovlivnit parametrem drsnosti povrchu Sa. Je také možné sledovat množství těchto údolí pomocí parametru Ssk, jehož záporné hodnoty znamenají převládající množství údolí. Nejvíce hluboká údolí dále popisují parametry Sv s Svk.

Při chodu hydrodynamického ložiska je potřeba zajistit, aby mazivo bylo udržitelné v třecí zóně, což lze vyřešit parametrem  $V_{vc}$ , který vyjadřuje objem údolí v jádře povrchu, a tím i množství maziva v jádře, které bude využito v třecí zóně. Kontrola této funkční vlastnosti je nutná pouze pro velmi malé tloušťky filmů maziva mezi čepem a ložiskem.

Při mnohých aplikacích může dojít k zanesení pevných částic do maziva. Pro správný chod hydrodynamického ložiska jsou však tyto částice nežádoucí. Lze je však mnohdy zachytit v hlubokých údolích ložiska, kde nemohou zasahovat do samotného chodu součásti. To se dá zajistit pomocí parametru  $V_{vv}$ , který sleduje objem těchto údolí, anebo parametrem  $S_{vk}$ , jenž má podobný význam. Vysoké hodnoty těchto parametrů znamenají více prostoru pro zachytávání těchto částic, avšak mohou negativně ovlivnit životnost součásti.

### 4.3 Vnější povrch těsnicího pístního kroužku

Těsnicí kroužky jsou velice významnou součástí spalovacích motorů a tím i mnohých strojních zařízení. Jejich hlavní funkcí je zabránění průniku plynů ze spalovací komory do prostoru pod pístem válce [51], což by negativně ovlivnilo chod motoru a tím i celého zařízení. Na obrázku 4-3 lze vidět umístění pístních kroužků na pístu.



Obr. 4-3 Umístění pístních kroužků [52]

Jak již název napovídá, jejich hlavní funkcí je utěsnění spalovacího motoru. Těsnicí pístní kroužky však nebývají v přímém kontaktu se stěnou válce motoru, nýbrž je mezi nimi slabá vrstva mazacího filmu, která je zde zapotřebí pro plynulý chod motoru bez zadření. Tloušťka tohoto filmu se obvykle pohybuje okolo 5 až 20  $\mu\text{m}$ , ale můžeme se setkat i s tloušťkou filmu 1  $\mu\text{m}$  [53]. V tabulce 4-4 jsou uvedeny vybrané funkční vlastnosti pístních kroužků, ke kterým jsou uvedena doporučení pro předpis vhodných parametrů textury povrchu.

Tab. 4-4 Funkční vlastnosti těsnicího pístního kroužku s vybranými parametry textury povrchu

<b>Funkční vlastnost</b>	<b>Profilový parametr</b>	<b>Plošný parametr</b>
Schopnost udržovat mazivo v třecí zóně	R $\delta$ c	Vvc, Vvv
Životnost	Ra, Rt, (Rz)	Sa, Sz
Rovnoměrné nanášení maziva	W, Wt, Wx, Wa, Wp, Wv	S-F povrch: Sp, Sv, Sz, Sp, Sk, Svk

Pro správné nanášení maziva je vhodné, aby se nacházelo v jádře povrchu pístu, a ne v hlubokých údolích, kde by nebylo využito. Pro to jsou vhodné dva parametry. Vvc, který vyjadřuje objem maziva v jádře povrchu, a Vvv, jenž udává množství maziva v hlubokých údolích, kde je nežádoucí.

Ve válci motoru dochází k opakovaným značným výchylkám tlaku, což může vést k únavovému poškození případných trhlin či větších nerovností textury kroužku. Proto je zde vhodné kontrolovat také samotnou drsnost povrchu pomocí statisticky stabilního parametru Sa, jehož hodnoty by měly být velmi nízké, v řádu desetin mikrometru. Případně lze využít i parametru Sz, jehož hodnoty se mohou značně lišit, ale dokáže odhalit nejnebezpečnější místa pro vznik trhlin či únavového poškození. Kvůli statistické nestabilitě tohoto parametru je nutné provést řadu měření.

Pro správný chod motoru je také zapotřebí, aby vrstva maziva mezi pístním kroužkem a stěnou válce motoru byla rovnoměrná. K tomu slouží kontrola dlouhovlnných složek textury povrchu kroužku. U profilových parametrů je vhodná kontrola W-parametrů neboli parametrů vlnitosti. Plošné parametry budou vztahovány k S-F povrchu, jenž nemá odstraněny dlouhovlnné stranové složky povrchu.

Pro zjištění rovnoměrnosti tak lze využít opět statisticky stabilního parametru  $S_a$ , pro který je podstatné, aby se jeho hodnoty pohybovaly také v desetinách mikrometrů. Nebezpečné však mohou být extrémní hodnoty textury povrchu. Ke zjištění těchto hodnot lze využít parametrů  $S_p$ ,  $S_v$  nebo také  $S_z$ , které však nemusí vždy vypovídat o skutečném rozložení textury povrchu. Vzhledem k charakteru těchto parametrů mohou jejich přípustné hodnoty být výrazně vyšší než u parametru  $S_a$ . Proto je možné využít také plošných V-parametrů jako  $S_p$ ,  $S_k$  a  $S_{vk}$ , které mají podobný význam, avšak jsou statisticky mnohem spolehlivější.

## 4.4 Povrch optické plochy

Optické plochy jsou jedním z případů, kdy je vhodné hodnotit texturu povrchu pro plochu, která není ve vzájemném kontaktu.

Pro správnou funkci optických čoček jsou zásadní zejména dva faktory, a to rozměry čoček a jejich povrch, který musí být téměř dokonale hladký a bez vad. Proto je kontrola povrchů velmi důležitou součástí výrobního procesu. Optické čočky jsou vyráběny ze speciálních skel, povrch je broušen, následně tepelně upravován a poté jsou ještě velmi pečlivě leštěny [54]. Tabulka 4-5 ukazuje vybrané vlastnosti optických povrchů, ke kterým jsou doporučeny vhodné parametry textury povrchu, jenž je ovlivňuje.

Tab. 4-5 Funkční vlastnosti optických povrchů s vybranými parametry textury povrchu

<b>Funkční vlastnost</b>	<b>Profilový parametr</b>	<b>Plošný parametr</b>
Zajištění zrcadlového odrazu	$R_a, R_q$	$S_a, S_q$
Redukce extrémních hodnot	$R_q, R_v$	$S_q, S_v, S_k, S_{vk}$
Kontrola sklonu povrchu	$W\Delta q$	S-F povrch: $S_dq$

Drsnost povrchu je pro odraz světla zásadní faktor, který výrazně ovlivňuje odraz světelných paprsků. Platí, že drsnost povrchu by měla být menší než vlnová délka světla, jejíž viditelné spektrum má velikost vlnových délek v rozmezí od 380 nm do 740 nm. V levé části obrázku 4-4 lze vidět odraz světelných paprsků od roviny s drsností povrchu menší než vlnová délka světla (zrcadlový odraz) a v pravé části odraz světelných paprsků od roviny s drsností povrchu větší než vlnová délka světla (difúzní odraz) [55].



Obr. 4-4 Zrcadlový odraz (vlevo) a difúzní odraz (vpravo) [55]

Drsnost povrchu lze hodnotit pomocí parametru  $S_a$ , přičemž hodnoty tohoto parametru by měly být podstatně nižší než 380 nm pro zajištění dostatečně malých rozměrů extrémních hodnot. Hodnoty drsnosti povrchu běžně používaných optických skel se pohybují od 15 nm do 30 nm [56]. Tyto hodnoty lze považovat za dostačující.

Více nebezpečné pro správnou funkci ploch čoček jsou extrémní hodnoty vrcholů a údolí, u kterých lze předpokládat, že povrch má větší sklon o ideální roviny. To je důvod, proč je vhodnější kontrola pomocí parametru  $S_q$ , který je více citlivý na extrémní hodnoty vrcholů a údolí. Vzhledem k citlivosti tohoto parametru na extrémní hodnoty drsnosti povrchu lze za přípustnou považovat vyšší nežli přípustnou hodnotu parametru  $S_a$ .

Odraz paprsků světla správným směrem je pro optická zařízení zásadní. Proto velmi důležitým faktorem, který by měl být kontrolován u čoček, je sklon povrchu od ideální roviny. To lze zjistit pomocí parametru  $S_dq$  na S-F povrchu, který nemá potlačené dlouhovlnné složky textury. Pro správnou funkci plochy se musí hodnoty tohoto parametru blížit 0, která vyjadřuje ideální rovinu.

Povrchy čoček jsou velmi pečlivě leštěny, proto lze předpokládat, že vrcholy jsou v zásadě odstraněny. Nejvíce nebezpečná tak mohou být hluboká údolí. Extrémní hodnoty údolí lze zjistit pomocí parametru  $S_v$ . Hodnoty tohoto parametru se však mohou při opakovaném měření výrazně lišit, proto je pro spolehlivý výsledek potřeba velmi nízkých hodnot tohoto parametru nebo provedení řady měření. Možné nejvyšší hodnoty při měření tohoto parametru však musí být výrazně nižší než 380 nm.

Pro posouzení extrémních hodnot je možné také využít plošných V-parametrů jako  $S_k$  a  $S_{vk}$ , pomocí kterých lze zjistit, jaká část povrchu tvoří jádro a údolí. Jsou také statisticky spolehlivější než například parametr  $S_v$ .



## 5 ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývá problematikou hodnocení textury povrchu, jež ovlivňuje životnost, funkčnost a cenu strojních součástí. Pojednává převážně o bezkontaktních metodách měření, kterými lze získat profilové, ale hlavně plošné a objemové parametry. Pomocí těchto parametrů je možné provést detailní popis funkčních ploch strojních součástí. Důležitý je však výběr vhodných parametrů, přičemž se lze setkat pouze s předepisováním profilových parametrů drsnosti povrchu. To je způsobeno jednak nekvalifikovanými konstruktéry, ale také nedostatečnou literaturou, jež se tímto příliš nezabývá.

Cílem práce byl popis parametrů textury povrchu vzhledem k výkresové dokumentaci, dále popis bezkontaktních metod jejich měření a sestavení doporučení pro výběr vhodných parametrů k daným funkčním plochám. Práce nejdříve popisuje historii měření textury povrchu, poté se zabývá popisem parametrů textury povrchu a jejich užití, a nakonec se věnuje popisu bezkontaktních metod jejich měření. V diskuzi práce jsou uvedena obecná doporučení pro výběr vhodných parametrů k funkčním plochám včetně ukázky postupu na třech konkrétních funkčních plochách.

Z diskuze práce je zřejmé, že k důkladnému popisu funkčních ploch je zapotřebí vyhodnocení značného množství parametrů. To je časově, strojově, ale i finančně náročné, proto je vhodnější zaměřit se na určité funkční vlastnosti a parametry. Obecně lze konstatovat, že nejdůležitějším faktorem, jenž ovlivňuje zejména životnost součástí, je drsnost povrchu. Ta lze neúčinněji vyjádřit pomocí statisticky stabilního parametru  $R_a$ , popřípadě jeho plošnou alternativou parametrem  $S_a$ . Předepisování tohoto parametru na strojních výkresech je tak povětšinou vhodně zvolené. Různé funkční vlastnosti však lépe vystihují i jiné parametry. Pro ověření, zdali jsou tyto vlastnosti a parametry zásadní, je nutné experimentálních výzkumů, což by mohlo být náplní dalšího zkoumání.

Na strojních výkresech se lze povětšinou setkat s předepisováním profilových parametrů textury povrchu. Předepisován je zejména parametr  $R_a$ . Plošné parametry prozatím využívány příliš nejsou. Je to způsobeno horší dostupností bezkontaktních metod měření textury povrchu a časovou náročností pro vyhodnocení velkého množství naměřených hodnot, jež jsou s bezkontaktním měřením spojené. Historický vývoj však ukazuje, že bylo zapotřebí značného úsilí po dlouhou dobu, aby se hodnocení textury povrchu profilovou metodou stalo nezbytnou součástí výrobního procesu. Vzhledem k vývoji přístrojů pro bezkontaktní měření textury povrchu a zejména k progresivnímu vývoji techniky pro zpracování dat se dá usoudit, že měření a předepisování i plošných parametrů textury povrchu se v budoucnu stane nezbytnou součástí výroby. Proto se na strojních výkresech budou stále více předepisovat plošné parametry  $S_a$ . Rozmanitější volba parametrů je závislá na experimentálních výzkumech pro konkrétní odvětví. To je časově a především finančně náročné. Lze tak předpokládat, že odlišné parametry vyjadřující jiné vlastnosti než drsnost povrch v blízké budoucnosti využívány téměř nebudou.

## 6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] NUGENT, Patrick, 50 Years of Quality: A Superficial History of Surface Finish. In: Quality Magazine Subscription Services [online]. Quality Magazine Subscription Services, 2011. [cit. 23. 11. 2019]. Dostupné z: <https://www.qualitymag.com/articles/87804-50-years-of-quality-a-superficial-history-of-surface-finish>
- [2] Drsnoměry a vzorkovnice drsnosti. In: *UNIMETRA spol. s r.o.* [online]. Ostrava: Unimetra, 2020 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <http://www.unimetra.cz/cz/katalog/tloustkomery-drsnomery-tvrdomery/drsnomery-a-vzorkovnice-drsnosti/80-drsnomery-a-vzorkovnice-drsnosti.html>
- [3] *Advanced Techniques for Assessment Surface Topography: Development of a Basis for 3D Surface Texture Standards "SURFSTAND"* [online]. London: Kogan Page Limited and contributors, 2003 [cit. 2019-11-23]. ISBN 978-1-903996-11-9. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/book/9781903996119/advanced-techniques-for-assessment-surface-topography>
- [4] BUMBÁLEK, Bohumil, ODVODY, Vladimír a OŠŤÁDAL, Bohuslav. *Drsnost povrchu*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989.
- [5] ČSN EN ISO 4287. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu. Praha: Český normalizační institut, 1999. 22 s. Třídící znak 55359.
- [6] ČSN EN ISO 8785. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Nedokonalosti povrchu - Termíny, definice a parametry*. Praha: Český normalizační institut, 2000. 24 s. Třídící znak 59525.
- [7] Harčarik Matěj. *Hodnocení textury povrchu kontaktní a bezkontaktní metodou*. Brno, 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky.
- [8] Bowyer Matouš. *Analýza možností kontroly povrchu válce vstřikovacího lisu kontaktní a bezkontaktní metodou*. Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky.
- [9] PEŠIČKA, L.: Geometrická specifikace výrobků strojírenské výroby (GPS) – Textura povrchu – Požadavky na drsnost, vlnitost a základní profil povrchu, Praha, ČNI 2006
- [10] Profil povrchu. In: *Parametry drsnosti* [online]. Teplice: HOMMEL CS [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: <https://www.jenoptik.cz/cz/technicke-informace/drsnost-povrchu-dle-din-en-iso/>

- [11] Metelková Jitka. *Pokročilé metody vyhodnocování topografie povrchu*. Brno, 2014. Bakalářská práce. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie.
- [12] Šindelka Marek. *Pokročilé metody vyhodnocování topografie povrchu součásti*. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie.
- [13] ČSN EN ISO 12085. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Parametry metody motif*. Praha: Český normalizační institut, březen 1999.
- [14] Surface Roughness Parameters [online]. KEYENCE CORPORATION OF AMERICA, [cit. 13. 4. 2020]. Dostupné z: <https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/line/parameters.jsp>
- [15] SLANEC, Karel. *Konstruování: Geometrická přesnost výrobků*. 2. díl. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004, ISBN 80-01-02864-X.
- [16] BUSHAN, V. B. Various surface profiles having the same Ra value [online]. Surface Roughness Analysis and Measurement Techniques [online]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Surface-Roughness-Analysis-and-Measurement-2.1-the-Bhushan/8d9703efe378c4cf733c40ca4a743360cd61b49f#paper-header>
- [17] NOVÁK, Zdeněk. Zvýšení kvality hodnocení textury povrchu. In: MM Průmyslové spektrum [online]. MM, 2011. [cit. 1. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/zvyseni-kvality-hodnoceni-textury-povrchu.html>
- [18] DZIONK, S. a ŚCIBIORSKI, B. *Hardened Steel Surface Waviness Created by Rolling Burnishing Process* [online]. Solid State Phenomena, 2015. [cit. 13. 3. 2020]. Dostupné z: <https://www.scientific.net/SSP.220-221.790>
- [19] KARRER, J.M. s Paramètres d'ondulation [fotografie]. *LA MESURE DES ETATS DE SURFACE*, 1998 [online]. Dostupné z: <http://jm.karrer.free.fr/documents/ES1.pdf>
- [20] ČSN EN ISO 25178-2. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha - Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, leden 2013.
- [21] 3D Surface Roughness and Wear Measurement, Analysis and Inspection [online]. Michigan Metrology, L.L.C., [cit. 15. 3. 2020]. Dostupné z: <https://michmet.com/index.html>

- [22] Špačková Magda. *Hodnocení drsnosti povrchu kontaktní a bezkontaktní metodou*. Brno, 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky.
- [23] Areal Field Parameters. In: *Areal Field Parameters* [online]. Besançon: Digital Surf, 2019 [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: <https://guide.digitalsurf.com/en/guide-areal-field-parameters.html>
- [24] FILIPOVA, N. a RUDZITIS, J. Surface Texture Parameters Application for Nanocoatings [online]. ISSN 1407-8015. Riga Technical University, Institute of Mechanical Engineering, 2013. [cit. 27. 5. 2020]. Dostupné z: <https://ortus.rtu.lv/science/en/publications/18652>
- [25] VALÍČEK, J., M. DRŽÍK, T. HRYNIEWICZ, M. HARNIČÁROVÁ, K. ROKOSZ, M. KUŠNEROVÁ, K. BARČOVÁ a D. BRAŽINA. *Non-contact method for surface roughness measurement after machining*. *Measurement Science Review*. 2012, 12(5). DOI: 10.2478/v10048-012-0028-3. ISSN 1335-8871. Dostupné také z: <https://www.degruyter.com/doi/10.2478/v10048-012-0028-3>
- [26] DURAKBASA, M. N., OSANNA, P. H. a DEMIRCIOGLU P. *The factors affecting surface roughness measurements of the machined flat and spherical surface structures – The geometry and the precision of the surface* [online]. Vienna University of Technology, Institute for Production Engineering and Laser Technology, Department of Interchangeable Manufacturing and Industrial Metrology, Adnan Menderes University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, 2011. [cit. 17. 4. 2020]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224111002831>
- [27] WikiSkripta [online]. WikiSkripta, [cit. 9. 4. 2020]. Dostupné z: [https://www.wikiskripta.eu/w/Mez\\_rozli%C5%A1en%C3%AD\\_mikroskopu](https://www.wikiskripta.eu/w/Mez_rozli%C5%A1en%C3%AD_mikroskopu)
- [28] ČSN EN ISO 25178-607. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha - Část 607: Jmenovité charakteristiky bezdotykových přístrojů (konfokální mikroskopie)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, říjen 2019.
- [29] SONG, Y. Principle of laser confocal scanning microscope [fotografie]. *Study of the Femtosecond Laser Processed Surfaces, Imprinting, and Casting for Changing the Wettability of Surfaces*, 2018 [Online]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/330618917\\_Study\\_of\\_the\\_Femtosecond\\_Laser\\_Processed\\_Surfaces\\_Imprinting\\_and\\_Casting\\_for\\_Changing\\_the\\_Wettability\\_of\\_Surfaces](https://www.researchgate.net/publication/330618917_Study_of_the_Femtosecond_Laser_Processed_Surfaces_Imprinting_and_Casting_for_Changing_the_Wettability_of_Surfaces)
- [30] KUSÁK, Ivo. Konfokální mikroskop [online]. [cit. 17. 4. 2020]. Dostupné z: [http://fyzika.fce.vutbr.cz/file/kusak/konfokalni\\_mikroskopie.pdf](http://fyzika.fce.vutbr.cz/file/kusak/konfokalni_mikroskopie.pdf)

- [31] GONG, Yuxuan, Jian XU a Relva C. BUCHANAN. Surface roughness: A review of its measurement at micro-/nano-scale. *Physical Sciences Reviews*. 2018, 3(1). DOI: 10.1515/psr-2017-0057. ISSN 2365-6581. Dostupné také z: <http://www.degruyter.com/view/j/psr.2018.3.issue-1/psr-2017-0057/psr-2017-0057.xml>
- [32] SEDLÁŘOVÁ, M., PRINCIPY KONFOKÁLNÍ MIKROSKOPIE. In: Konfokální mikroskopie [online]. Univerzita Palackého v Olomouci, 2011. [cit. 17. 4. 2020]. Dostupné z: <http://www.botanika.upol.cz/atlasy/confmicro/principles.php>
- [33] Archimédova spirála. In: *Wikipedie: otevřená encyklopedie* [online]. Wikimedia Foundation, 203. Stránka naposledy edit. 1. 9. 2019 v 03:51. [cit. 17. 4. 2020]. Česká verze. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Archim%C3%A9dova\\_spir%C3%A1la](https://cs.wikipedia.org/wiki/Archim%C3%A9dova_spir%C3%A1la)
- [34] Jak funguje interferometrický systém? [online]. Renishaw s.r.o. [cit. 2. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/jak-funguje-interferometricky-system--38612>
- [35] ČSN EN ISO 25178-603. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha - Část 603: Jmenovité charakteristiky bezdotykových přístrojů (interferometrická mikroskopie s fázovým posuvem)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, červen 2015.
- [36] ČSN EN ISO 25178-604. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha - Část 604: Jmenovité charakteristiky bezdotykových přístrojů (spojité skenovací interferometry)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, květen 2015.
- [37] MATHIA, T. G., PAWLUS, P. a WIECZOROWSKI, M.; *Recent trends in surface metrology* [online]. Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes, Rzeszow University of Technology, Poznan University of Technology, 2010. [cit. 17. 4. 2020]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164810002243>
- [38] GROOT, P. Images of interference fringes on a curved surface with low coherence illumination [fotografie]. *Coherence Scanning Interferometry* [online]. Dostupné z: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-12012-1\\_9](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-12012-1_9)
- [39] PETZING, J., COUPLAND, J. a LEACH, R.; *The Measurement of Rough Surface Topography using Coherence Scanning Interferometry* [online]. National Physical Laboratory, 2018. [cit. 27. 5. 2020]. Dostupné z: <http://eprintspublications.npl.co.uk/4833/1/mgpg116.pdf>
- [40] ČSN EN ISO 25178-606. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha - Část 606: Jmenovité charakteristiky bezdotykových přístrojů (variace sond)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, říjen 2019

- [41] Focus Variation, Optické 3D měření [online]. Hannes Geidl-Strallhofer. [cit. 3. 6. 2020]. Dostupné z: [https://www.opi.zcu.cz/download/FocusVariation\\_Alicona\\_cz.pdf](https://www.opi.zcu.cz/download/FocusVariation_Alicona_cz.pdf)
- [42] Focus-Variation, The technical principles [online]. Bruker Alicona [cit. 3. 6. 2020]. Dostupné z: <https://www.alicon.com/en/our-technology/focus-variation/>
- [43] Charged-coupled device. In: *Wikipedie: otevřená encyklopedie* [online]. Wikimedia Foundation, 203. Stránka naposledy edit. 9. 8. 2019 v 23:08. [cit. 4. 6. 2020]. Česká verze. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Charge-coupled\\_device](https://cs.wikipedia.org/wiki/Charge-coupled_device)
- [44] GARCIA, V., VÁSQUEZ, E., SILLER., H. R., RUIZ-HUERTA, L. a CABALLERO-RUIZ, A. Focus variation setup measurement for workpiece and cutting tool [fotografie]. *Calibration of ball nose micro end milling operations for sculptured surfaces machining* [online]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/315772760\\_Calibration\\_of\\_ball\\_nose\\_micro\\_end\\_milling\\_operations\\_for\\_sculptured\\_surfaces\\_machining](https://www.researchgate.net/publication/315772760_Calibration_of_ball_nose_micro_end_milling_operations_for_sculptured_surfaces_machining)
- [45] HÁJKOVÁ Z., BAUEROVÁ P., FEJFAR A. a ŠLOUF M. Elektronový mikroskop – klíč k odhalení tajemství mikro- a nanosvěta. In: *Chemické listy* [online]. únor 2018, 112, pp. 128-134. [cit. 2. 5. 2020] ISSN 0009-2770. Dostupné z: <http://www.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/view/2995/2987>
- [46] NEWBURY D. E. *Electron Beam-Specimen Interactions in the Analytical Electron Microscope* [online]. Center for Analytical Chemistry, National Bureau of Standards, 1986. [cit. 2. 5. 2020]. Dostupné z: [https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-1-4899-2037-9\\_1](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-1-4899-2037-9_1)
- [47] KUSÁK, Ivo. AFM mikroskop [online]. [cit. 17. 4. 2020]. Dostupné z: [http://fyzika.fce.vutbr.cz/file/kusak/AFM\\_mikroskopie.pdf](http://fyzika.fce.vutbr.cz/file/kusak/AFM_mikroskopie.pdf)
- [48] MONTANARI, S. Schematic description of the operation principle of the AFM. The feedback loop (a compensation network or a computer program) monitors the cantilever deflection and keeps it constant by adjusting the vertical position of the cantilever [fotografie]. *Fabrication and characterization of planar Gunn diodes for Monolithic Microwave Integrated Circuits* [online]. Dostupné z: [http://gorgia.no-ip.com/phd/html/thesis/phd\\_html/node5.html](http://gorgia.no-ip.com/phd/html/thesis/phd_html/node5.html)
- [49] Petr David. *Hydrodynamická ložiska vznětového traktorového motoru*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství.
- [50] Maršálek Ondřej. *Advanced methods for the solution of journal bearing dynamics* Brno, 2015. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky.

- [51] Cupák Václav. *Pístní kroužky soudobých zážehových motorů*. Brno, 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství.
- [52] Štol Michal. *Píst čtyřdobého vznětového motoru o výkonu 77kW*. Brno, 2008. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství.
- [53] MISHRA, Prakash Chandra. *Thermal Modeling of Thin Lubricant Film Within Piston Compression Ring and Rough Cylinder Liner Conjunction*. *Frontiers in Mechanical Engineering*. 2020, 5. DOI: 10.3389/fmech.2019.00068. ISSN 2297-3079. Dostupné také z: <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fmech.2019.00068/full>
- [54] Chtěli byste vidět, jak vypadá výroba objektivu? [online]. *Fotografování.cz*. [cit. 23. 5. 2020]. Dostupné z: <https://www.fotografovani.cz/rubriky/ Svet-skrz-objektiv/chteli-byste-videt-jak-vypada-vyroba-objektivu--153239cz>
- [55] Světlo a osvětlování ve fotografii [online]. Roman Sejkot. [cit. 25. 5. 2020]. Dostupné z: [https://cw.fel.cvut.cz/b182/\\_media/courses/a7b33dif/sejkot\\_svetlo\\_ve\\_fotografii.pdf](https://cw.fel.cvut.cz/b182/_media/courses/a7b33dif/sejkot_svetlo_ve_fotografii.pdf)
- [56] PAL, Raj Kumar, Harry GARG, RamaGopal V. SAREPAKA a Vinod KARAR. *Experimental Investigation of Material Removal and Surface Roughness during Optical Glass Polishing*. *Materials and Manufacturing Processes*. 2015, 31(12), 1613-1620. DOI: 10.1080/10426914.2015.1103867. ISSN 1042-6914. Dostupné také z: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10426914.2015.1103867>

## 7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

### 7.1 Seznam použitých zkratek

2D	Dvojměrný
3D	Trojměrný
CLSM	Confocal laser scanning microscope
CSI	Coherence Scanning Interferometry
CCD	Charge-Coupled Device
TEM	Transmisní elektronový mikroskop
SEM	Skenovací elektronový mikroskop

### 7.2 Seznam použitých veličin

<b>Značka</b>	<b>Jednotka</b>	<b>Název</b>
CLA	$\mu\text{m}$	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu drsnosti (starší označení)
Xs	$\mu\text{m}$	Šířka profilu
Zp	$\mu\text{m}$	Výška výstupku profilu
Zv	$\mu\text{m}$	Hloubka prohlubně profilu
Zt	$\mu\text{m}$	Výška profilu
lr, lw, lp	mm	Základní délka profilu
ln	mm	Vyhodnocovací délka
Pp, Rp, Wp	$\mu\text{m}$	Největší výška výstupku profilu
Pv, Rv, Wv	$\mu\text{m}$	Největší hloubka prohlubně profilu
Pz, Rz, Wz	$\mu\text{m}$	Největší výška profilu



Pc, Rc, Wc	μm	Průměrná výška prvků profilu
Pt, Rt, Wt	μm	Celková výška profilu
Pa, Ra, Wa	μm	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
Pq, Rq, Wq	μm	Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu
Psk, Rsk, Wsk	-	Šikmost posuzovaného profilu
Pku, Rku, Wku	-	Špičatost posuzovaného profilu
PSm, RSm, WSm	μm	Průměrná šířka prvků profilu
PΔq, RΔq, WΔq	-	Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu
Pmr(c), Rmr(c), Wmr(c)	%	Materiálový poměr profilu (nosný podíl)
Pδc, Rδc, Wδc	μm	Rozdíl výšky úseku profilu
Pmr, Rmr, Wmr	%	Vzájemný materiálový poměr
z, Z	μm	Výškový parametr profilu (plochy)
Rsi	μm	Šířka i-tého prvku
rw(x)	-	Povrchový poměr
R(x)	μm	Parametr drsnosti povrchu
W(x)	μm	Parametr vlnitosti povrchu
AW	μm	Průměrná rozteč prvků motif vlnitosti
W	μm	Průměrná hloubka prvků motif vlnitosti
Wx	μm	Největší hloubka vlnitosti
Wte	μm	Celková hloubka vlnitosti
Sq	μm	Základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu

Ssk	-	Šikmost omezené stupnice povrchu
Sku	-	Špičatost omezené stupnice povrchu
Sp	μm	Maximální výška píku omezené stupnice povrchu
Sv	μm	Maximální hloubka prohlubně omezené stupnice povrchu
Sz	μm	Maximální výška omezené stupnice povrchu
Sa	μm	Aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu
Sal	μm	Délka autokorelace
Str	-	Poměr aspektu textury
Sdq	μm/mm	Základ průměrného čtverce gradientu omezené stupnici povrchu
Sdr	-	Poměr rozvinuté mezifázové plochy omezené stupnici povrchu
Std	stupně	Směr textury omezené stupnice povrchu
Sk	μm	Výška jádra
Spk	μm	Redukovaná výška píku
Svk	μm	Redukovaná hloubka údolí
Smr1	%	Poměr materiálu
Smr2	%	Poměr materiálu
Spq	-	Základ průměrné úchylky čtverců plošiny
Svq	-	Základ průměrné úchylky čtverců údolí
Smq	%	Poměr materiálu
Sxp	μm	Extrémní výška píku
Vvv	μm <sup>2</sup>	Neplatný objem údolí omezené stupnice povrchu

$V_{vc}$	$\mu\text{m}^2$	Neplatný objem jádra omezené stupnice povrchu
$V_{mp}$	$\mu\text{m}^2$	Pík objemu materiálu omezené stupnicí povrchu
$V_{mc}$	$\mu\text{m}^2$	Jádro objemu materiálu omezené stupnicí povrchu
$\lambda$	Nm	Vlnová délka elektronu
$h$	J·s	Planckova konstanta
$m$	kg	Hmotnost elektronu
$e$	C	Náboj elektronu
$U$	V	Urychlovací napětí

## 8 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 3-1	Vzorkovnice drsnosti povrchu.....	15
Obr. 3-2	Prvek profilu.....	18
Obr. 3-3	Základní profil, profil vlnitosti a profil drsnosti .....	18
Obr. 3-4	Znázornění horní obálky .....	19
Obr. 3-5	Grafické znázornění parametru Ra (ve 3D Sa) .....	22
Obr. 3-6	Profily různých povrchů se stejnou hodnotou Ra.....	22
Obr. 3-7	Grafické znázornění parametru Rq (ve 3D Sq).....	23
Obr. 3-8	Grafické znázornění parametru Rp (ve 3D Sp) .....	23
Obr. 3-9	Grafické znázornění parametru Rv (ve 3d Sv) .....	24
Obr. 3-10	Grafické znázornění parametru Rt (ve 3D Sz).....	24
Obr. 3-11	Grafické znázornění parametru Rsm.....	25
Obr. 3-12	Grafické znázornění parametru Rmr na křivce materiálového poměru .....	25
Obr. 3-13	Grafické znázornění parametrů motif vlnitosti .....	27
Obr. 3-14	Prostorový obrázek povrchu .....	29
Obr. 3-15	Grafické znázornění parametru Rsk (ve 3D Ssk).....	30
Obr. 3-16	Izotropní (vlevo) a anizotropní (vpravo) povrch.....	32
Obr. 3-17	Fourierovo spektrum v polárních souřadnicích .....	33
Obr. 3-18	Křivka materiálového poměru s naznačením některých plošných parametrů .....	34
Obr. 3-19	Křivka materiálového poměru s objemovými charakteristikami.....	36
Obr. 3-20	Princip funkce konfokálního laserového rastrovacího mikroskopu .....	39
Obr. 3-21	Princip funkce interferometru s fázovým posunem.....	41
Obr. 3-22	Princip spojitého skenovacího mikroskopu.....	42
Obr. 3-23	Princip metody Variace sond .....	43
Obr. 3-24	Schéma elektronového rastrovacího mikroskopu.....	44
Obr. 3-25	Princip funkce mikroskopu atomárních sil.....	45
Obr. 4-1	Rozdělení funkčních povrchů.....	48
Obr. 4-2	Poloha čepu a hydrodynamického kluzného ložiska v různých fázích chodu .....	51

Obr. 4-3	Umístění písních kroužků.....	53
Obr. 4-4	Zrcadlový odraz (vlevo) a difúzní odraz (vpravo) .....	56

## 9 SEZNAM TABULEK

Tab. 3-1	Profilové výškové parametry (výstupky a prohlubně) .....	20
Tab. 3-2	Profilové výškové parametry (průměrné hodnoty pořadnic) .....	20
Tab. 3-3	Profilové délkové parametry .....	21
Tab. 3-4	Profilové tvarové parametry.....	21
Tab. 3-5	Parametry vlnitosti motif.....	27
Tab. 3-5	Plošné S-parametry výškové.....	31
Tab. 3-6	Plošné S-parametry prostorové.....	32
Tab. 3-7	Plošné S-parametry hybridní a smíšený S-parametr .....	33
Tab. 3-8	Plošné a další V-parametry plochy .....	35
Tab. 3-9	Plošné V-parametry neplatného objemu .....	36
Tab. 3-10	Plošné V-parametry objemu materiálu .....	37
Tab. 4-1	Obecná doporučení parametrů textury povrchu k funkčním plochám ve vzájemném kontaktu se vzájemným pohybem .....	49
Tab. 4-2	Obecná doporučení parametrů textury povrchu k funkčním plochám ve vzájemném kontaktu bez vzájemného pohybu .....	50
Tab. 4-3	Funkční vlastnosti hydrodynamického kluzného ložiska s vybranými parametry textury povrchu.....	52
Tab. 4-4	Funkční vlastnosti těsnicího pístního kroužku s vybranými parametry textury povrchu.....	54
Tab. 4-5	Funkční vlastnosti optických povrchů s vybranými parametry textury povrchu .....	55