



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**VYUŽITÍ PARAMETRŮ TEXTURY POVRCHU PRO
POSUZOVÁNÍ SHODY A ŘÍZENÍ PROCESU**

USE OF SURFACE TEXTURE PARAMETERS FOR CONFORMITY ASSESSMENT AND PROCESS CONTROL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Magda Špačková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Matej Harčarík

BRNO 2018

Zadání diplomové práce

| | |
|-------------------|--|
| Ústav: | Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky |
| Studentka: | Bc. Magda Špačková |
| Studijní program: | Strojní inženýrství |
| Studijní obor: | Kvalita, spolehlivost a bezpečnost |
| Vedoucí práce: | Ing. Matej Harčarik |
| Akademický rok: | 2017/18 |

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 diplomové práce:

Využití parametrů textury povrchu pro posuzování shody a řízení procesu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V práci student rozebere existující parametry textury povrchu a možnosti jejich využití pro posuzování shody a/nebo řízení procesu v průmyslové praxi, zejména s ohledem na zavádění přístupů Industry 4.0.

Cíle diplomové práce:

Přehled parametrů textury povrchu
Přehled metod posuzování shody pomocí parametrů textury
Přehled metod řízení procesu pomocí parametrů textury
Aplikace na výrobek/proces v průmyslové praxi
Doporučení pro praxi

Seznam doporučené literatury:

LEACH, Richard, Characterisation of areal surface texture. Heidelberg: Springer, 2013. ISBN 978--642-36458-7.

MURALIKRISHNAN, Bala. a J. RAJA, Computational surface and roundness metrology. New York: Springer, 2009. ISBN 978-1-84800-296-8.

WHITEHOUSE, J., Handbook of surface and nanometrology. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2010. ISBN 978-1-4200-8201-2.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18.

V Brně, dne 16. 10. 2017



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

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá využitím textury povrchu pro posuzování shody a řízení procesu. Cílem práce bylo vytvořit přehled parametrů textury povrchu, přehled metod posuzování shody a řízení procesu pomocí parametrů textury povrchu, aplikace na výrobek v průmyslové praxi a doporučení pro praxi. Práce obsahuje přehled profilových a plošných parametrů textury povrchu, včetně původního překladu termínů plošné metody. Dále jsou popsány metody posuzování shody a řízení procesu pomocí parametrů textury povrchu. Na základě 7200 hodnot plošných a 1843200 hodnot profilových parametrů naměřených na součástech ze sériové výroby byla provedena statistická analýza. V poslední kapitole práce jsou rozebrána doporučení pro praxi.

Klíčová slova

textura povrchu, plošné parametry, posuzování shody, řízení procesu, statistická klasifikace

ABSTRACT

This master's thesis deals with using surface texture parameters for conformity assessment and process control. The aim of the thesis was to create an overview of surface texture parameters, an overview of procedures for conformity assessment and process control using surface texture parameters, practical application on an industrial product and practical recommendations. The thesis includes an overview of profile and areal surface texture parameters, including an original translation of terms of the areal method. Methods of conformity assessment and process control in connection with the surface texture parameters are also described. Statistical analysis was performed based on 7200 values of surface parameters and 1843200 values of profile parameters which were measured on parts from serial production. The last chapter includes practical recommendations.

Key words

surface texture, areal parameters, conformity assessment, process control, statistical classification

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠPAČKOVÁ, M. *Využití parametrů textury povrchu pro posuzování shody a řízení procesu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 79 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Matej Harčarík.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že tuto diplomovou práci jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s využitím uvedené literatury a podkladů.

V Brně dne 25. 5. 2018

.....
Špačková Magda

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji vedoucímu práce panu Ing. Mateji Harčaríkovi za rady a cenné připomínky při zpracování diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat své rodině, příteli a přátelům za podporu během celého studia.

Obsah

| | |
|--|----|
| ÚVOD..... | 15 |
| 1 Hodnocení textury povrchu | 17 |
| 1.1 Hodnocení textury povrchu pomocí profilové metody | 17 |
| Pravidlo 16%..... | 19 |
| Pravidlo maxima | 19 |
| 1.2 Hodnocení textury povrchu pomocí plošné metody | 21 |
| 1.2.1 Výškové parametry | 23 |
| 1.2.2 Prostorové parametry | 25 |
| 1.2.3 Hybridní parametry | 26 |
| 1.2.4 Funkční a související parametry | 27 |
| Parametry materiálového poměru..... | 27 |
| Parametry pro povrchy se stratifikovanými funkčními vlastnostmi | 29 |
| Parametry plošné křivky pravděpodobnosti materiálu | 30 |
| Objemové parametry | 31 |
| Funkční parametry | 33 |
| 1.2.5 Další parametry | 34 |
| 1.2.6 Vyjmenované parametry prvků | 35 |
| 2 Posuzování shody a řízení procesu pomocí parametrů textury povrchu | 39 |
| 2.1 Posuzování shody | 39 |
| 2.1.1 Prokázání shody a neshody se specifikacemi | 39 |
| 2.2 Řízení procesu | 41 |
| 2.2.1 Statistická regulace procesu | 41 |
| Regulační diagramy | 41 |
| Statistická regulace..... | 45 |
| Způsobilost procesu..... | 47 |
| 2.2.2 Klasifikace - výběr vhodného parametru..... | 48 |
| Hodnocení kvality klasifikátorů..... | 49 |
| Metody klasifikace | 50 |
| Naivní bayesovská klasifikace | 50 |
| Klasifikace boosting | 51 |
| 3 Aplikace výsledků měření na výrobek v průmyslové praxi | 53 |
| 3.1 Měřené vzorky | 53 |

| | | |
|-----|---|----|
| 3.2 | Použité měřicí přístroje | 54 |
| | Taylor Hobson Talysurf CCI Lite | 54 |
| 3.3 | Analýza měření | 56 |
| | 3.3.1 Základní statistika | 58 |
| | 3.3.2 Statistická regulace | 60 |
| | 3.3.3 Posuzování shody | 61 |
| 4 | Doporučení pro praxi | 65 |
| | ZÁVĚR..... | 67 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ..... | 69 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ | 73 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK..... | 75 |
| | SEZNAM PŘÍLOH | 79 |

ÚVOD

V dnešním vysoce konkurenčním průmyslu si výrobce nemůže dovolit dodat na trh výrobek, který by nebyl funkční. Zároveň však není rentabilní plně kontrolovat funkci každého komponentu výrobku. Nicméně funkčnost výrobku by měla být zaručena, pokud výrobek odpovídá své specifikaci. To lze ověřit měřením geometrie a dalších vlastností výrobku v rámci procesu posuzování shody.

I úplné posuzování shody je v sériové a masové výrobě příliš nákladné. Aby bylo možné snížit četnost kontroly a zároveň snížit výskyt neshodných výrobků, aplikují se metody řízení procesu. Jejich správným použitím lze zaručit shodu se specifikací i u výrobků, které nebyly podrobeny kontrole.

Nutnou součástí specifikace strojírenských výrobků jsou požadavky na texturu povrchu. Textura povrchu¹ je dle normy [1] definována jako soubor opakovaných nebo náhodných odchylek od geometrického povrchu, které tvoří třírozměrnou topografii tohoto povrchu. V současném průmyslu bývají požadavky na texturu často zjednodušené a jejich splněním není garantována funkčnost výrobku.

Dříve byla textura povrchu hodnocena pouze pomocí profilových přístrojů, kde byly základní profilové parametry vyhodnoceny ihned po nasnímání povrchu. Nyní je měření profilovými přístroji doplňováno měřením bezkontaktními optickými zařízeními, které jsou schopny změřit a následně vyhodnotit značné množství parametrů, ať už zmíněných profilových nebo také parametry plošné a objemové. To rozšiřuje portfolio možností hodnocení textury povrchu.

Paralelně s vývojem zařízení pro měření textury povrchu byly rozvíjeny oblasti integrované digitalizace, robotizace a automatizace, které se dnes nazývají souhrnným termínem Průmysl 4.0. Jeho nedílnou součástí je sběr a využívání velkého objemu dat o výrobním procesu.

V této diplomové práci je hodnocení textury povrchu pro účely posuzování shody a řízení procesu spojeno s přístupy průmyslu 4.0. V oblasti posuzování shody je demonstrováno použití statistické klasifikace a výsledky měření jsou aplikovány na řízení procesu pomocí parametrů textury povrchu.

Cílem diplomové práce bylo vytvořit přehled parametrů textury povrchu, dále přehled jednotlivých metod posuzování shody pomocí parametrů textury povrchu a jejich využití v průmyslové praxi. Výstupem je také přehled metod řízení procesu pomocí textury povrchu a následná aplikace na určitý výrobek v průmyslové praxi.

¹ České normy nejsou jednotné v překladu anglického pojmu „*surface texture*“. Dříve býval tento termín překládán jako struktura povrchu, zejména v normách, které byly publikovány před rokem 2000. Některé normy, vydané později, používají překlad textura povrchu. V této diplomové práci je na základě domluvy s vedoucím práce v souvislosti s tímto pojmem používán termín textura povrchu.

Diplomová práce je rozdělena na čtyři kapitoly a závěr. První kapitola obsahuje popis vybraných profilových a plošných parametrů textury povrchu. Předmětem druhé kapitoly je posuzování shody dle specifikace a řízení procesu pomocí regulačních diagramů a metod klasifikace. Třetí kapitola zahrnuje popis měřicího přístroje, měřených vzorků a také analýzu měření a její vyhodnocení. Ve čtvrté kapitole jsou rozebrána doporučení pro praxi.

1 Hodnocení textury povrchu

Textura povrchu je definována souborem opakovaných nebo náhodných odchylek od geometrického povrchu, které tvoří třírozměrnou topografii povrchu. Je charakterizována pomocí stop po obrábění, drsnosti, vlnitosti, nedokonalostí povrchu a odchylek tvaru. [1]

Posuzování textury povrchu je obvykle prováděno na základě hodnocení profilů. Z počátku byla dostupná pouze profilová měřicí zařízení, která byla postupně nahrazována vyspělejšími technologiemi jako jsou bezkontaktní přístroje. Výsledkem je přechod z měření profilů k měření ploch a také vznik série technických norem pro hodnocení plošné metody textury povrchu. [2]

Hlavní rozdíl mezi profilovými a plošnými metodami hodnocení textury povrchu je použití filtrace. Profil získaný z S-L nebo S-F povrchu není matematicky stejný jako profil měřený na sérii standartních profilů. Při použití plošných filtrů mohou být výsledky při použití stejného typu filtru a cut-off velice rozdílné. [2]

Srovnávání hodnot plošných a profilových parametrů textury povrchu je možné u takových parametrů, které jsou vypočteny analogickým způsobem. Například plošný parametr S_q (průměrná kvadratická výška) může být porovnán s profilovým parametrem R_q (průměrná kvadratická odchylka). Nicméně pro parametr Str (poměr stran textury) neexistuje žádný ekvivalentní parametr profilu. [2]

Plošné parametry charakterizující extrémy povrchu (S_p , S_v , S_z) nabývají obvykle vyšších hodnot než jejich profilové ekvivalenty (R_p , R_v , R_z). Důvodem je pravděpodobně to, že nejvyšší bod profilu neleží na vrcholu uvedeného profilu, ale na jeho úpatí. Obecně platí, že hodnoty profilových a plošných parametrů textury povrchu jsou korelovatelné, ale nesmí se přímo srovnávat, kvůli výše zmíněným důvodům. [2]

Přístroje pro profilové měření textury povrchu bývají většinou kontaktní na rozdíl od přístrojů pro plošné měření textury povrchu, které jsou velmi často založeny na bezkontaktním principu měření. Odlišný způsob získávání dat o měřeném povrchu může být důvodem rozdílu naměřených hodnot profilových a plošných parametrů textury povrchu. [2]

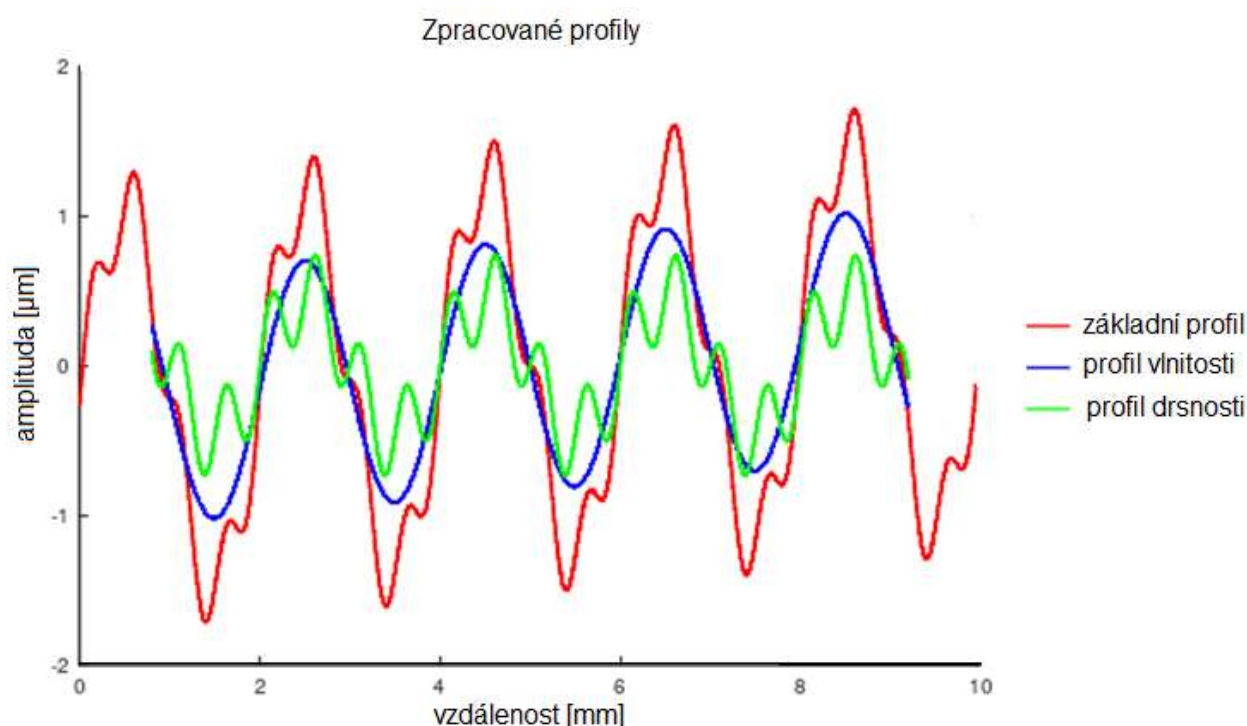
V této diplomové práci jsou popsány profilové a plošné parametry textury povrchu. Pomocí uvedených parametrů byla také prováděna analýza měřených dat.

1.1 Hodnocení textury povrchu pomocí profilové metody

Hodnocení textury povrchu, které je prováděno pomocí profilové metody, je založeno na matematicko-statistickém zpracování dat základního profilu. Ten vzniká úpravou profilu, který je snímán na skutečném povrchu. Ze základního profilu jsou pomocí filtru profilu odvozeny profil drsnosti a profil vlnitosti (obrázek 1.1). [3] Drsnost a vlnitost představují určité pásmo ve frekvenčním spektru profilu. [4] Drsnost odpovídá nerovnostem vznikajícím v důsledku působení nástroje, vlnitost vzniká různými vnějšími vlivy výrobního procesu, čímž mohou být např. vibrace. [5]

Filtr profilu je definován jako filtr, který rozděluje profil na dlouhovlnné a krátkovlnné složky. Filtr profilu λ_s definuje rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln, λ_c vymezuje rozhraní složek drsnosti a vlnitosti a filtr λ_f určuje rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln. [3]

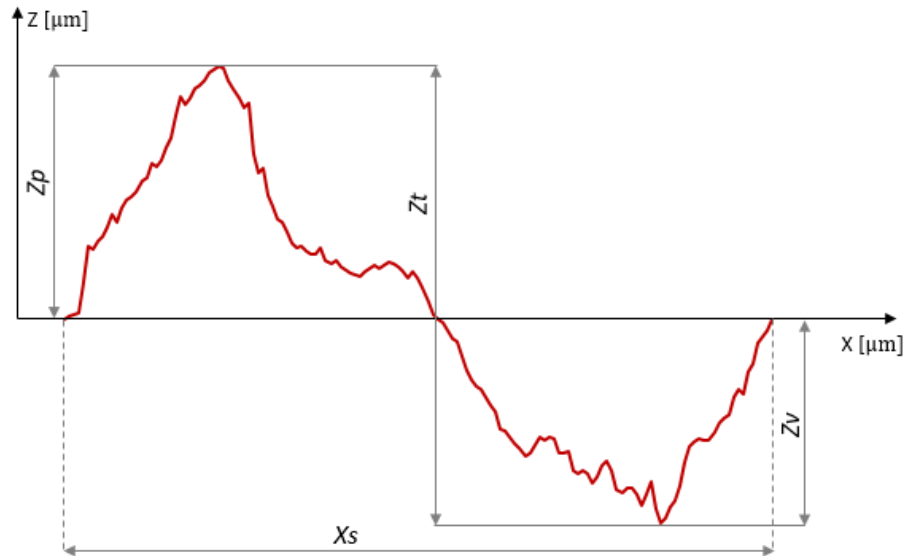
Nejrozšířenějším filtrem používaným pro analýzu profilu povrchu je Gaussův filtr. Profil drsnosti lze získat filtrováním základního profilu s použitím Gaussova hornopropustného filtru s cutoff λ_c . Aplikací Gaussova dolnopropustného filtru λ_{sw} vznikne profil vlnitosti. Zjednodušeně lze říci, že rozdíl mezi základním profilem a profilem drsnosti je profil vlnitosti. [4]



Obrázek 1.1: Složky textury povrchu

Profilové parametry textury povrchu se vypočítávají buď na základní délce (l_r), nebo na vyhodnocované délce (l_n). Norma ČSN EN ISO 4287 [3] definuje, zda má být daný parametr vyhodnocen na základní délce nebo vyhodnocované délce, přičemž obecně platí, že vyhodnocovaná délka je rovna pěti základním délkám. [3]

Každý profil je tvořen prvky profilu (obrázek 1.2), které představuje výstupek a přilehlá prohlubeň vztažené ke střední čáře. Výška prvku profilu Z_t je součtem výšky výstupku profilu Z_p a hloubky prohlubně profilu Z_v . [3]



Obrázek 1.2: Prvek profilu

V normě ČSN EN ISO 4288 [6] jsou definována dvě pravidla pro porovnání naměřených dat s tolerančními mezemi.

Pravidlo 16%

Povrch je považován za přijatelný, jestliže více než 16 % všech naměřených hodnot nepřesáhne hodnotu parametru specifikované horní meze. Analogickým způsobem platí pravidlo u specifikace dolní meze parametru. Za předpokladu normálního rozdělení souboru hodnot odpovídá 16 % měřených hodnot mezi určené hodnotou $\mu + \sigma$, kde μ je aritmetický průměr parametru profilu textury povrchu a σ je směrodatná odchylka hodnot. [6]

Pravidlo maxima

U požadavků, které jsou specifikovány největší hodnotou parametru, nesmí žádná z naměřených hodnot parametru na celém kontrolovaném povrchu v průběhu kontroly překročit hodnotu specifikovanou výkresem. [6]

Použití pravidla maxima je ve srovnání s pravidlem 16 % poměrně přísnější. Mnohé naměřené hodnoty, které jsou vyhovující pro pravidlo 16 % nemusí být vyhovující pro pravidlo maxima.

Nejistoty měření jsou uvažovány při prokázání shody či neshody se specifikací. Pokud je použito pravidlo 16 %, pak se při určování nejistoty měření nebere v úvahu nehomogenita povrchu, jelikož je již započtena přídatkem 16 %. [6]

Pravidla posuzování shody a neshody se specifikacemi jsou popsána ve druhé kapitole této práce.

Přehled vybraných profilových parametrů textury povrchu je uveden v tabulce č. 1.1. Základní dělení tvoří parametry výškové a délkové.

Tabulka 1.1: Vybrané profilové parametry textury povrchu

| | | | |
|-------------------|----------|-------------------|--|
| výškové parametry | R_p | [μm] | největší výška výstupku profilu |
| | R_v | [μm] | největší hloubka prohlubně profilu |
| | R_z | [μm] | největší výška profilu |
| | R_t | [μm] | celková výška profilu |
| | R_c | [μm] | průměrná výška prvků profilu |
| | R_a | [μm] | průměrná aritmetická odchylka posuzovaného profilu |
| | R_q | [μm] | průměrná kvadratická odchylka posuzovaného profilu |
| | R_{sk} | [-] | šikmost posuzovaného profilu |
| | R_{ku} | [-] | špičatost posuzovaného profilu |
| délkové parametry | R_{Sm} | [mm] | průměrná šířka prvků profilu |

Parametr R_p (obrázek 1.3), *největší výška výstupku profilu drsnosti*, je charakterizována jako výška nejvyššího výstupku daného profilu v rozsahu základní délky. [3]

Hloubka nejnižší prohlubně profilu je charakterizována parametrem R_v – *největší hloubka prohlubně profilu drsnosti* (obrázek 1.3). Stejně jako předchozí parametr je definována v rozsahu základní délky. [3]

Největší výška profilu drsnosti R_z je definována jako součet výšky nejvyššího výstupku profilu drsnosti a hloubky nejnižší prohlubně profilu drsnosti v rozsahu základní délky (obrázek 1.3). [3]

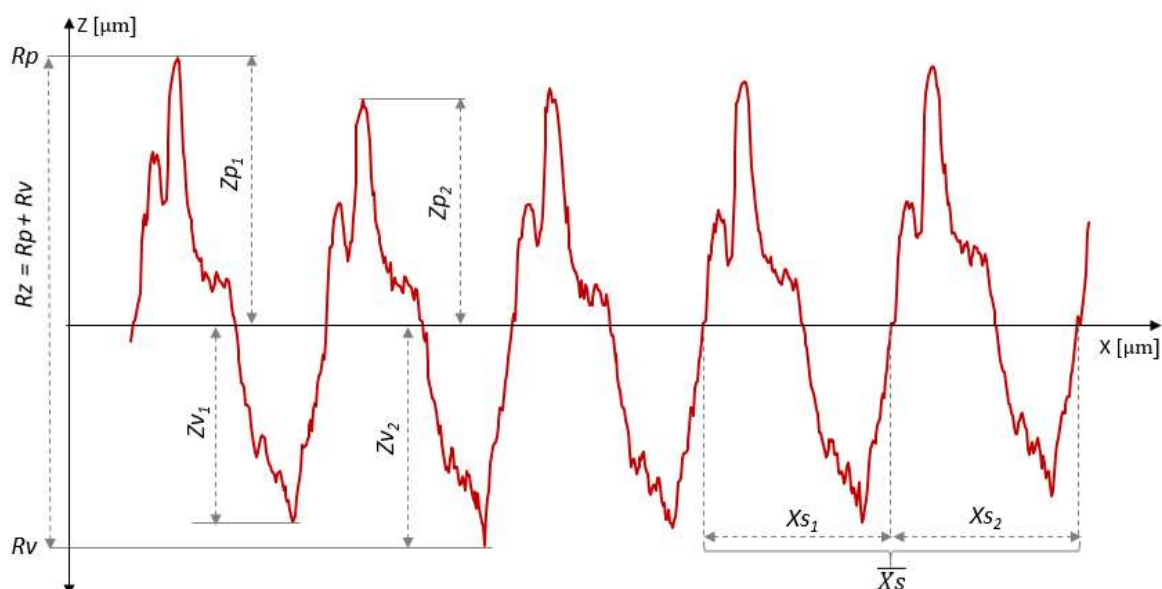
Celková výška profilu R_t je stejně jako parametr R_z definována součtem výšky výstupku a hloubky nejnižší prohlubně, avšak oproti parametru R_z je hodnocen v rozsahu vyhodnocované délky. [3]

Průměrná hodnota výšek prvků profilu v rozsahu základní délky je definována jako parametr R_c *průměrná výška prvků profilu*. [3]

Parametry R_a a R_q jsou průměrné odchylky posuzovaného profilu drsnosti. R_a je odchylka aritmetická a R_q kvadratická odchylka. *Průměrná aritmetická odchylka posuzovaného profilu drsnosti* je tedy aritmetický průměr absolutních hodnot souřadnic. *Průměrná kvadratická odchylka posuzovaného profilu drsnosti* je kvadratický průměr souřadnic. Oba parametry jsou definovány v rozsahu základní délky. [3]

Šikmost (Rsk) a špičatost (Rku) posuzovaného profilu drsnosti jsou blízkými parametry. Jsou to podíly průměrné hodnoty souřadnic a mocnin hodnoty parametru Rq v rozsahu základní délky. Šikmost posuzovaného profilu drsnosti je definována jako podíl průměrné hodnoty třetích mocnin souřadnic a třetí mocniny hodnoty Rq . Špičatost posuzovaného profilu drsnosti je charakterizována jako podíl průměrné hodnoty čtvrtých mocnin souřadnic ku čtvrté mocnině hodnoty Rq . Oba tyto parametry jsou definovány od $-\infty$ do $+\infty$, přičemž pokud je šikmost nebo špičatost negativní, převažují na profilu povrchu prohlubně, v případě kladných hodnot převládají výstupky. [3]

Parametr Rsm je jediným délkovým parametrem, popsáním v normě ČSN EN ISO 4287 [3] a jeho název je *průměrná šířka prvků profilu drsnosti*. Je charakterizován aritmetickým průměrem šířek prvků profilu drsnosti v rozsahu základní délky. [3]



Obrázek 1.3: Znáornění parametrů Rp , Rv , Rz a Rsm

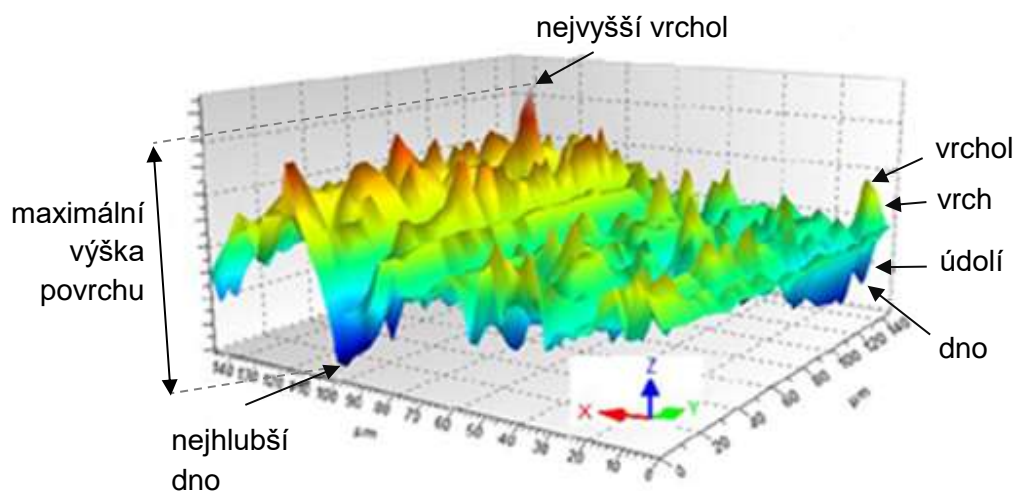
1.2 Hodnocení textury povrchu pomocí plošné metody

Plošné hodnocení textury povrchu je založeno na matematickém zpracování dat získaných z modelu neideálního povrchu. Z něj je pak získán základní povrch pomocí vzorkování a aplikace krátkovlnného s-filtru. [7]

Plošné parametry textury povrchu jsou vyhodnocovány na S-F nebo S-L povrchu. S-F povrch je povrch odvozený ze základního povrchu pomocí odstranění tvaru s použitím F-operace. Je ekvivalentem základního profilu. Povrch S-L je definován jako povrch, který je odvozený od S-F povrchu odstraněním značných stranových složek při použití L-filtru. Představuje plošný ekvivalent profilu drsnosti. [7]

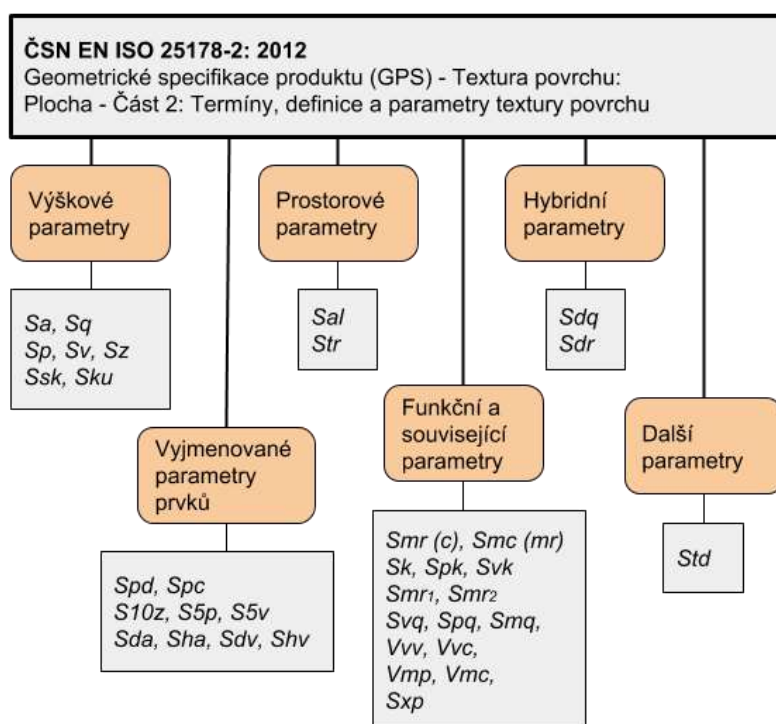
Na obrázku 1.4 se nachází topografické prvky, mezi které patří mimo jiné i vrchol, vrch, údolí a dno. Vrchol je nejvyšším bodem vrchu, respektive dno je nejhlubším bodem údolí.

Vrchol je tedy dle definice bod povrchu, který je vyšší než všechny jeho okolní body. Oblast, kde směr všech čar největšího spádu končí ve vrcholu je označována jako vrch. Dno charakterizuje nejnižší bod povrchu, který je nižší než ostatní body v jeho okolí. Údolím je nazvána oblast, kde všechny čáry největšího spádu končí na dně. [2]



Obrázek 1.4: Znáornění základních pojmů plošné textury povrchu (upraveno dle [8])

V normě ČSN EN ISO 25178-2: 2012 jsou uvedeny plošné parametry textury povrchu, které jsou rozděleny do několika skupin: výškové, prostorové, hybridní, funkční a smíšené parametry, vyjmenované parametry prvků a poslední skupinou jsou další parametry. Rozdělení ukazuje následující obr 1.5.



Obrázek 1.5: Schéma rozdělení plošných parametrů textury povrchu (upraveno dle [9])

1.2.1 Výškové parametry

Všechny výškové parametry jsou vymezeny na definiční ploše. Mezi plošné výškové parametry patří průměrná aritmetická a kvadratická výška, šikmost, špičatost, dále maximální výška vrcholu, maximální hloubka dna a také maximální výška posuzovaného povrchu.

Tabulka 1.2: Plošné výškové parametry textury povrchu

| | | |
|----------|-------------------|--|
| S_q | [μm] | <i>průměrná kvadratická výška posuzovaného povrchu</i> |
| S_a | [μm] | <i>průměrná aritmetická výška posuzovaného povrchu</i> |
| S_{sk} | [-] | <i>šikmost posuzovaného povrchu</i> |
| S_{ku} | [-] | <i>špičatost posuzovaného povrchu</i> |
| S_p | [μm] | <i>maximální výška vrcholu posuzovaného povrchu</i> |
| S_v | [μm] | <i>maximální hloubka dna posuzovaného povrchu</i> |
| S_z | [μm] | <i>maximální výška posuzovaného povrchu</i> |

Parametr S_q popisuje *střední kvadratickou výšku posuzovaného povrchu*, která je dána střední kvadratickou hodnotou souřadnic uvnitř definiční plochy (A). [7]

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x,y) dx dy} \quad (1.1)$$

Průměrnou aritmetickou výšku posuzovaného povrchu S_a lze zjistit pomocí rovnice 1.2. Je definována jako aritmetický průměr absolutních hodnot souřadnic uvnitř definiční plochy (A). [7]

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x,y)| dx dy \quad (1.2)$$

Parametry S_a a S_q patří mezi hlavní výškové parametry a také vzájemně silně korelují. Parametr S_q je statisticky významnější. [10]

Šikmost posuzovaného povrchu S_{sk} je podíl průměrné hodnoty třetích mocnin hodnot souřadnic a třetí mocniny S_q uvnitř definiční plochy (A). [7]

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \left[\frac{1}{A} \iint_A z^3(x,y) dx dy \right] \quad (1.3)$$

Parametr šikmosti může být kladný, záporný nebo nulový a je udáván bez jednotky. Parametr popisuje tvar topografického rozdělení výšky. Směr šikmosti je závislý na tom, zda je většina materiálu nad střední čarou (negativní šikmost), nebo pod střední čarou (pozitivní šikmost). Šikmost je nulová u povrchu s Gaussovým rozdělením výšky a zároveň se symetrickou topografií. Například pórovitý, slinutý nebo litinový povrch bude mít vysokou hodnotu parametru šikmosti. Vlastností dobré ložiskové plochy je to, že by měla mít negativní parametr šikmosti, což naznačuje

přítomnost poměrně málo vrcholů, které by mohly být opotřebovány rychle a relativně hluboká údolí, aby se udržely stopy maziva. Plocha s pozitivním parametrem šikmosti pravděpodobně bude špatně zadržovat maziva kvůli nedostatku hlubokých údolí, ve kterých se stopy maziva udržují. [10]

Špičatostí posuzovaného povrchu Sku se rozumí podíl průměrné hodnoty čtvrtých mocnin hodnot souřadnic a čtvrté mocniny Sq uvnitř definiční plochy (A). [7]

$$Sku = \frac{1}{Sq^4} \left[\frac{1}{A} \iint_A z^4(x, y) dx dy \right] \quad (1.4)$$

Špičatost je kladný, bezrozměrný parametr a charakterizuje rozptyl rozdělení výšky. Plocha s Gaussovým rozdělením výšky má hodnotu špičatosti tři. Použitím tohoto parametru lze zjistit, zda jsou špičky rovnoměrně rozloženy na povrchu. U povrchu, který obsahuje velké množství špiček, bude špičatost nabývat vyšších hodnot než u povrchu, který je méně špičatý (až hrbolatý). U rovného povrchu je špičatost minimální až nulová. [10]

Parametry Ssk a Sku mohou být matematicky méně stabilní než jiné parametry, protože ve svých rovnicích používají vyšší mocniny, což vede k rychlejšímu šíření chyb. [10]

Maximální výška vrcholu posuzovaného povrchu Sp popisuje výšku nejvyššího vrcholu na definiční ploše. [7]

Maximální hloubka dna posuzovaného povrchu Sv je absolutní hodnota hloubky nejnižší položeného bodu v definiční oblasti. [7]

Maximální výška posuzovaného povrchu Sz je součtem maximální výšky vrcholu posuzovaného povrchu Sp a maximální hloubky dna posuzovaného povrchu Sv na definiční ploše. [7]

Parametr Sp představuje *maximální výšku vrcholu*, tj. výšku nejvyššího bodu na daném povrchu. Sv parametr reprezentuje maximální hloubku dna, což znamená hloubku nejnižšího bodu povrchu. Vzhledem k výškám, které jsou počítány od střední roviny, Sp je vždy kladný a Sv je po použití absolutní hodnoty také kladný. Parametr Sz značí maximální výšku plochy, tj. je součtem Sp a Sv (rovnice 1.5). [10]

$$Sz = Sp + Sv \quad (1.5)$$

Maximální výškové parametry je třeba používat s opatrností, protože jsou citlivé na vrcholy, které jsou ojedinělé pro daný povrch, avšak nemusí být významné. Maximální výškové parametry lze také využít při hledání neobvyklých podmínek, jako je například ostrá špička vrcholu nebo ořep na povrchu, což může naznačovat špatný materiál nebo špatné zpracování. Jako robustnější alternativu těchto parametrů lze využít parametry $S10z$ a Sdc , které jsou popsány v dalších kapitolách této práce. [10]

1.2.2 Prostorové parametry

Do skupiny plošných prostorových parametrů patří délka autokorelace a poměr stran textury. Oba tyto prostorové parametry jsou určeny na definiční ploše.

Tabulka 1.3: Prostorové plošné parametry textury povrchu

| | | |
|------------|-------------------|---------------------|
| <i>Sal</i> | [μm] | délka autokorelace |
| <i>Str</i> | [-] | poměr stran textury |

Délka autokorelace *Sal* je horizontální vzdálenost $f_{ACF}(t_x, t_y)$, u které dochází k nejrychlejšímu poklesu na specifikovanou hodnotu s , kde $0 \leq s < 1$. [7]

$$Sal = \min \sqrt{t_x^2 + t_y^2} \quad (1.6)$$

t_x a $t_y \in R$, kde $R = \{(t_x, t_y): f_{ACF}(t_x, t_y) \leq s\}$.

Autokorelační funkce (ACF) je funkce, která popisuje korelaci mezi povrchem a tím stejným povrchem, který je posunutý o (t_x, t_y) na definiční ploše A .

$$f_{ACF}(t_x, t_y) = \frac{\iint_A z(x, y)z(x - t_x, y - t_y) dx dy}{\iint_A z^2(x, y) dx dy} \quad (1.1)$$

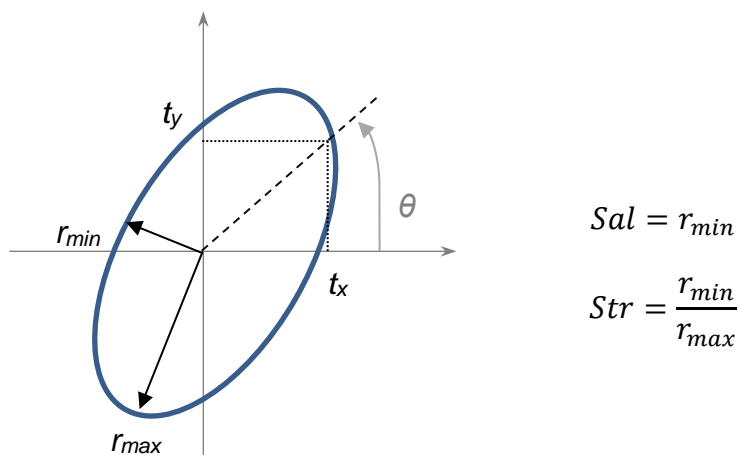
Parametr s se pro poměrně hladké povrchy nastavuje na hodnotu 0,2. Lze však použít i jiné hodnoty, což se v budoucnu zřejmě promítne do norem v oblasti plošné specifikace. Pro anizotropní povrch má parametr *Sal* směr kolmý ke směru povrchu. Parametr *Sal* vyjadřuje vzdálenost od původního místa měření, ve které lze nalézt statisticky rozdílnou texturu povrchu. [10]

Parametr *Str* popisuje *poměr stran textury*. Konkrétněji poměr horizontální vzdálenosti $f_{ACF}(t_x, t_y)$, která má nejrychlejší pokles specifikované hodnoty s vzhledem k horizontální vzdálenosti $f_{ACF}(t_x, t_y)$, u které dochází k nejpomalejšímu poklesu s , kde $0 \leq s < 1$. [7]

$$Str = \frac{\min \sqrt{t_x^2 + t_y^2}}{\max \sqrt{t_x^2 + t_y^2}} \quad (1.2)$$

t_x a $t_y \in R$, kde $R = \{(t_x, t_y): f_{ACF}(t_x, t_y) \leq s\}$.

Tento parametr je jedním z nejdůležitějších parametrů při charakterizaci povrchu plošným způsobem, který charakterizuje izotropii povrchu. Vypočítá se z minimálních a maximálních poloměrů (viz obrázek 1.6), nalezených za stejných podmínek v grafu autokorelace. [10]



Obrázek 1.6: Význam autokorelační délky v polárních souřadnicích (upr. dle [7])

Parametr Str je bezrozměrný a jeho hodnoty leží mezi 0 a 1. Může být také vyjádřen v procentech (0 a 100 %). Lze říci, že tento parametr je hodnocením izotropie textury povrchu. Pokud je Str blízko 1, pak je povrch izotropní, tzn. že má stejné vlastnosti bez ohledu na směr. V případě, kdy je Str blízko 0, je povrch anizotropní, tzn. že má dominantní směr textury povrchu. V této situaci udává směr úhlu textury povrchu parametr Std . [10]

1.2.3 Hybridní parametry

K hybridním plošným parametrům se řadí střední kvadratický sklon a rozvinutý poměr plochy rozhraní posuzovaného povrchu.

Tabulka 1.4: Hybridní plošné parametry textury povrchu

| | | |
|-------|-------|--|
| Sdq | [rad] | střední kvadratický sklon posuzovaného povrchu |
| Sdr | [%] | rozvinutý poměr plochy rozhraní posuzovaného povrchu |

Střední kvadratický sklon posuzovaného povrchu Sdq definuje střední kvadratická odchylka sklonu povrchu na definiční ploše (A) posuzovaného povrchu (rovnice 1.8). [7]

$$Sdq = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A \left[\left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy} \quad (1.3)$$

Parametr Sdq má bezrozměrnou kladnou hodnotu, případně může být vyjádřen v $[\mu\text{m}/\mu\text{m}]$ nebo $[\mu\text{m}/\text{mm}]$ nebo také jako úhel v [rad]. Sdq je užitečný pro posouzení těsnících a pohledových povrchů. [10]

Parametr Sdr , rozvinutý poměr plochy rozhraní posuzovaného povrchu, je definován jako poměr přírůstku plochy rozhraní posuzovaného povrchu ku velikosti definiční plochy na definiční ploše (A) posuzovaného povrchu (rovnice 1.9). [7]

$$Sdr = \frac{1}{A} \left[\iint_A \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial y} \right)^2} - 1 \right) dx dy \right] \quad (1.4)$$

Parametr *Sdr* může být uváděn jako bezrozměrné kladné číslo, nebo procentuálně. Hodnota obvykle bývá mezi 0 a 10 %. Dokonale hladký a plochý povrch by měl mít hodnotu *Sdr* = 0 %. Parametr je používán jako měřítko složitosti povrchu zejména při srovnání mezi několika stupni zpracování povrchu. Může také poskytovat užitečné informace o adhezních površích. [10]

1.2.4 Funkční a související parametry

Do skupiny funkčních a souvisejících plošných parametrů patří parametry materiálového poměru, parametry pro povrchy se stratifikovanými funkčními vlastnostmi, parametry plošné křivky pravděpodobnosti materiálu, objemové parametry a funkční parametry. Patří sem také parametry fraktálové, ty však v této práci dle pokynů vedoucího nebudou rozebírány.

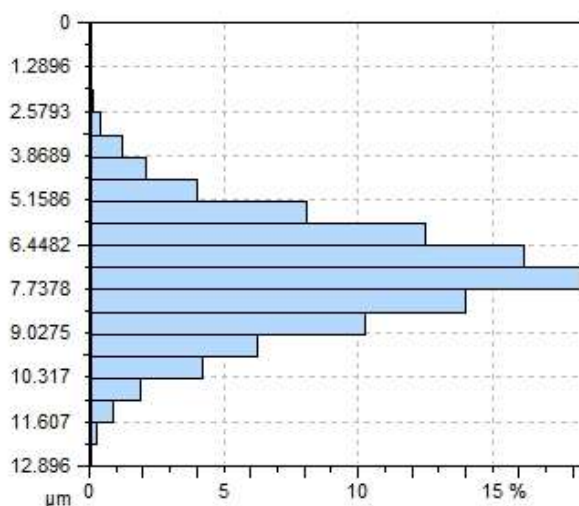
Tabulka 1.5: Funkční a související plošné parametry textury povrchu

| | | |
|-----------------|-----------------------|---|
| <i>Smr</i> (c) | [%] | <i>plošný materiálový poměr posuzovaného povrchu</i> |
| <i>Smc</i> (mr) | [μm] | <i>obrácený plošný materiálový poměr posuzovaného povrchu</i> |
| <i>Sdc</i> | [μm] | <i>výškový rozdíl materiálových poměrů</i> |
| <i>Sk</i> | [μm] | <i>výška jádra</i> |
| <i>Spk</i> | [μm] | <i>redukováná výška vrcholů</i> |
| <i>Svk</i> | [μm] | <i>redukováná hloubka údolí</i> |
| <i>Smr1</i> | [%] | <i>materiálový poměr</i> |
| <i>Smr2</i> | [%] | <i>materiálový poměr</i> |
| <i>Svq</i> | [μm] | <i>střední kvadratická odchylka údolí</i> |
| <i>Spq</i> | [μm] | <i>střední kvadratická odchylka plošiny</i> |
| <i>Smq</i> | [μm] | <i>materiálový poměr</i> |
| <i>Vvv</i> | [ml·m ⁻²] | <i>prázdný objem údolí posuzovaného povrchu</i> |
| <i>Vvc</i> | [ml·m ⁻²] | <i>prázdný objem jádra posuzovaného povrchu</i> |
| <i>Vmp</i> | [ml·m ⁻²] | <i>objem materiálu vrchů posuzovaného povrchu</i> |
| <i>Vmc</i> | [ml·m ⁻²] | <i>objem materiálu jádra posuzovaného povrchu</i> |
| <i>Sxp</i> | [μm] | <i>extrémní výška vrcholu</i> |

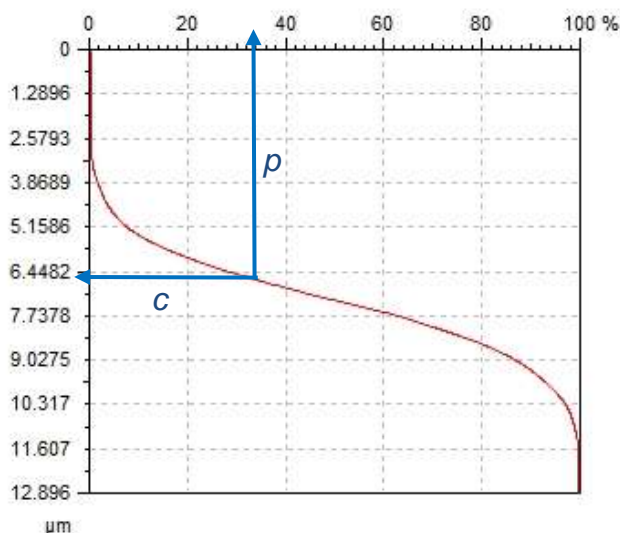
Parametry materiálového poměru

Rozdělení výšky může být znázorněno jako histogram výšek povrchu (obrázek 1.7), který kvantifikuje počet bodů na povrchu ležících v dané výšce. Křivka materiálového poměru (obrázek 1.8) je křivka kumulativní distribuční funkce. Tato křivka se počítá od

nejvyššího bodu na povrchu (kde je materiálový poměr roven 0%) do nejnižšího bodu (kde materiálový poměr dosáhne 100%). Výška řezu c udává posunutí od určitého místa, kde je definován materiálový poměr. U profilových parametrů je reference posunutí v maximu, tzn. že se vždy posouvá od maxima, což není dokonalým řešením. Pokud zde bude nějaký unikátní nevypovídající bod, tak bude tato reference posunuta v závislosti na tomto bodu. Proto se u plošné metody používá posunutí od střední roviny. [10]



Obrázek 1.7: Histogram výšek povrchu



Obrázek 1.8: Křivka materiálového poměru

Parametr $S_{mr}(c)$, *plošný materiálový poměr posuzovaného povrchu*, je poměr materiálu ve specifikované výšce c ku hodnocené ploše. Funkce $S_{mr}(c)$ charakterizuje poměr materiálu p odpovídající výšce řezu c , která je uvedena jako parametr (obrázek 1.8). Obvykle bývá vyjádřen v %. [7]

Parametr $S_{mc}(mr)$ neboli *obrácený plošný materiálový poměr posuzovaného povrchu* je definován jako výška, ve které je dosáhnutý materiálový poměr. [7]

Parametr S_{dc} není v normě ISO 25178-2 [7] přímo uveden, avšak je jednoduchým rozšířením parametru $R\delta c^2$, který je definován v normách řady ISO 4287 [3]. Leach [10] zařazuje tento parametr do skupiny parametrů materiálového poměru. V nově připravované normě ISO/WD 25178-2 [11] je již tento parametr zařazen.

Výškový rozdíl materiálových poměrů (S_{dc}) je definován na základě rovnice (1.10), kde p a q jsou dva poměry materiálů, které lze volně vybrat v závislosti na dalším použití. [10]

$$S_{dc} = S_{mc}(p) - S_{mc}(q) \quad (1.5)$$

² Dle normy ČSN EN ISO 4287 [3] se parametr $R\delta c$ nazývá *rozdíl výšky úseku profilu* a je definován jako vertikální vzdálenost mezi úrovněmi dvou úseků daného materiálového poměru.

Parametr Sdc může být použit k získání maximální výšky povrchu, jestliže jsou odstraněny extrémní vrcholy a údolí nebo pokud je aplikována mezní hodnota, například když je $p = 2\%$ a $q = 98\%$. [10]

Parametry pro povrchy se stratifikovanými funkčními vlastnostmi

Profilové parametry Rk , Rvk , Rpk , $Mr1$ a $Mr2$ jsou založené na grafické konstrukci Abbott-Firestoneovy³ křivky. Tyto parametry jsou extrahovány z filtrovaného povrchu za použití robustního filtru⁴, který byl navržen speciálně pro stratifikované povrchy. Parametry Sk , Spk , Svk , $Smr1$ a $Smr2$ jsou plošnými ekvivalenty profilových parametrů definovaných výše. [10]

Výška jádra Sk je určena vzdáleností mezi nejvyšší a nejnižší hladinou jádra povrchu. [11]

Redukovaná výška vrcholů Spk je výška vyčnívajících vrcholů nad jádro povrchu po procesu redukce. [11]

Parametr Svk , redukovaná hloubka údolí, je hloubka vyčnívajících údolí pod jádro povrchu po procesu redukce. [11]

Parametr $Smr1$ resp. $Smr2$ je plošný *materiálový poměr* v průsečnici přímky, která odděluje vyčnívající vrcholy (resp. údolí) od jádra povrchu na hodnocené ploše. Poměr bývá vyjádřen procentuálně. [7]

Ekvivalentní přímka, popsána níže, protíná 0 a 100 % na ose Smr (obrázek 1.9). Z těchto bodů jsou rovnoběžně s osou x vyneseny dvě čáry, které určují jádro povrchu tím, že oddělují vyčnívající vrcholy a údolí. Vertikální vzdálenost mezi těmito průsečíky je výška jádra Sk . Průsečíky s křivkou materiálového poměru definují poměry materiálu $Smr1$ a $Smr2$. [7]

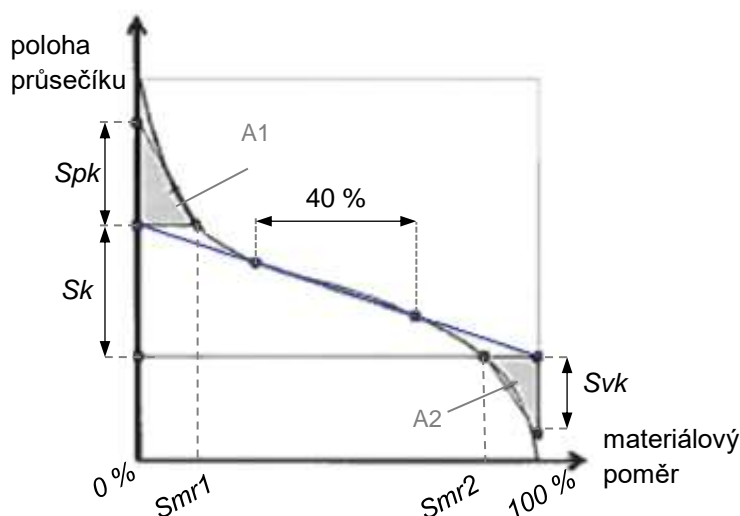
Ekvivalentní přímka je vypočtena pro centrální oblast křivky plošného materiálového poměru, která zahrnuje 40 % z naměřených bodů povrchu. Tato centrální oblast leží v místě, kde sečna křivky plošného materiálového poměru ukazuje nejmenší gradient (40 % plošného materiálového poměru). [7]

Šrafované plochy ($A1$, $A2$ - obrázek 1.9) ležící nad a pod oblastí křivky plošného materiálového poměru, vyjadřují výšku jádra Sk . Odpovídají ploše průřezu povrchu

³Abbott-Firestoneova křivka je křivka materiálového poměru. Byla prvním "funkčním parametrem". Myšlenkou bylo popsat, jak užitečný může být povrch, pokud je používán jako ložisko. Tento materiálový poměr je definován vůči vzduchu počínaje od místa, které považoval jako první kontakt (tj. za nejvyšší vrchol) a ukazuje, jak se změnil s hloubkou. Problém této definice je, že je těžké zjistit, kde je první kontakt. Nejvyšší vrchol v jednom posuzovaném profilu nemusí být nutně celkový nejvyšší vrchol. V literatuře se uvádí, že vertikální osa je za některých podmínek uvažována jako hodnota parametru Rq . [30]

⁴Robustní filtr je technika filtrování, která má v sobě zabudovaný způsob ke snížení extrémně velkých vrcholů a údolí na základním profilu. Takové extrémy mohou být defekty nebo zbytky hrubších výrobních procesů. [32]

vrchů a údolí, které vyčnívají z jádra povrchu. Parametry Spk a Svk jsou vypočteny jako výška pravoúhlého trojúhelníku, který je sestavený tak, aby měl stejnou plochu jako „plocha vrchů“ nebo „plocha údolí“. Pravoúhlý trojúhelník odpovídající „ploše vrchů A1“ má jako základnu rozdíl od 0 % po $Smr1$ a trojúhelník, který odpovídá „ploše údolí A2“ má za základnu rozdíl mezi 100 % a $Smr2$. Výška Spk , získaná pomocí redukčního procesu, je menší než výška mezi nejvyšším bodem (0 %) a vrcholem centrální oblasti. To stejné platí pro Svk , které je menší než vzdálenost mezi dnem centrální oblasti a nejnižším bodem (100 %). Definované zpracování není procesem průměrování⁵. [11]



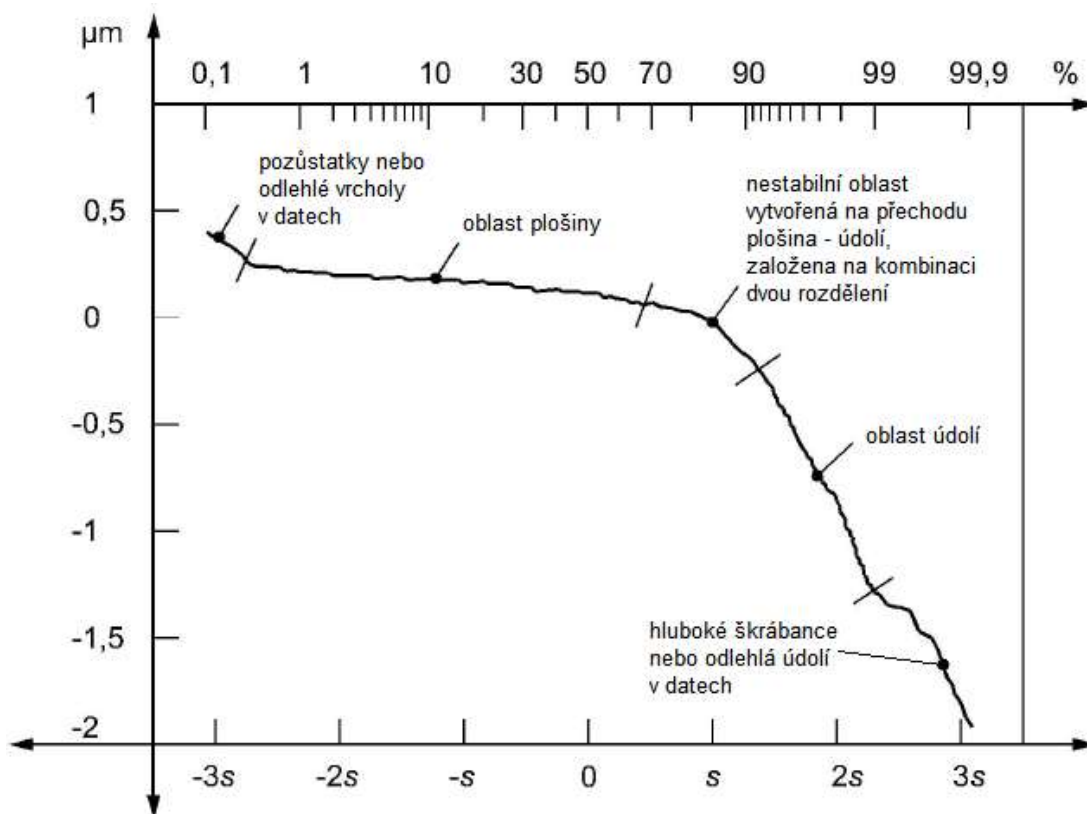
Obrázek 1.9: Znáznornění parametrů Sk , Spk a Svk (upr. dle [11])

Parametry Sk , Spk , Svk , $Smr1$ a $Smr2$ by měly být vypočítávány, jestliže je křivka plošného materiálového poměru ve tvaru „S“ (obrázek 1.9), tedy pokud má pouze jeden inflexní bod. Dle zkušeností to vždy platí pro lapovaný, broušený nebo honovaný povrch. [7]

Parametry plošné křivky pravděpodobnosti materiálu

Pravděpodobnostní křivka materiálového poměru (obrázek 1.10) představuje křivku plošného materiálového poměru, ve kterém je plošný materiálový poměr vyjádřen hodnotami směrodatných odchylek normálního rozdělení pravděpodobnosti. Ty jsou lineárně vykreslené na horizontální ose. [7]

⁵ V normě ISO 25178-2:2012 jsou parametry Spk a Svk definovány jako průměrné výšky vyčnívajících vrcholů (údolí) nad (pod) jádro povrchu. V nově připravované normě ISO/WD 25178-2:2017 jsou již tyto parametry definovány správně jako výška, resp. hloubka vyčnívajících vrcholů, resp. údolí nad (pod) jádro povrchu pomocí grafické interpretace výšek pravoúhlých trojúhelníků.



Obrázek 1.10: Pravděpodobnostní křivka materiálového poměru (upr. dle [7])

Střední kvadratická odchylka údolí Svq (plošiny Spq) je sklon regresní přímky, která je provedena přes oblast údolí (plošiny). *Materiálový poměr Smq* vyjadřuje poměr materiálu na průsečíku údolí a plošiny. [7]

Objemové parametry

Objemové parametry tvoří dvě podskupiny, a to Vv -parametry (prázdný objem) a Vm -parametry (objem materiálu).

Prázdný objem (Vv) je objem prázdných míst na jednotku plochy, při daném materiálovém poměru, vypočtený z křivky materiálového poměru. [7]

$$Vv(p) = \frac{K}{100\%} \int_p^{100\%} [Smc(p) - Smc(q)] dq \quad (1.6)$$

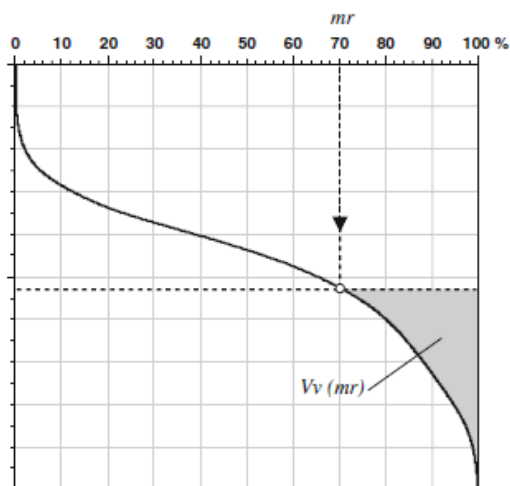
Leach [10] značí parametr jako $Vv(mr)$. Dále uvádí, že prázdný objem (obrázek 1.11) je pro $mr = 100\%$ nulový a pro $mr = 0\%$ maximum. Výpočty prázdného objemu jsou často užitečné při hodnocení textury povrchu mechanických součástí, které jsou používány v kontaktu s jinými povrchy. Prázdný objem lze vyjádřit pomocí rovnice 1.11, kde K je konstanta sloužící k převedení objemu na požadovanou jednotku [μm^3], [$\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$] nebo [ml/m^2].

Objem materiálu (Vm) je objem materiálu na jednotku plochy při daném materiálovém poměru, který je vypočtený z křivky materiálového poměru následovně:

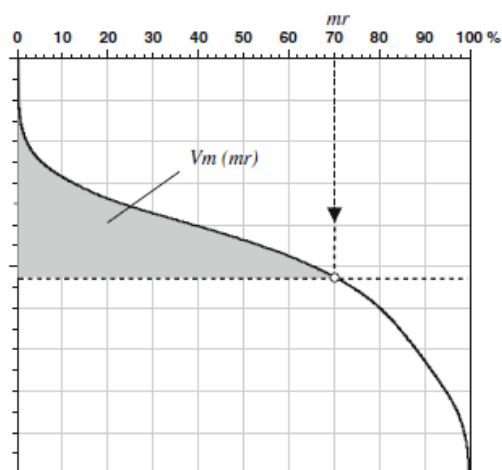
$$V_m(p) = \frac{K}{100\%} \int_0^p [S_{mc}(q) - S_{dc}(p)] dq \quad (1.7)$$

K je opět konstanta sloužící k převedení na mililitry na metr čtvereční. [7]

V literatuře se také uvádí, že parametr je vypočten integrací objemu uzavřeného pod povrchem a nad horizontální rovinou řezu ve výšce $h = S_{dc}(mr)$. Objem materiálu (obrázek 1,12) je na rozdíl od prázdného objemu pro $mr = 100\%$ maximální a pro $mr = 0\%$ je nulový. [10]



Obrázek 1.11: Prázdný objem definovaný materiálovým poměrem mr [10]



Obrázek 1.12: Objem materiálu definovaný materiálovým poměrem mr [10]

Parametr V_{vv} - prázdný objem údolí posuzovaného povrchu definuje materiálový poměr mr_2 , kde $mr_2 = 80\%$. [10]

$$V_{vv} = V_v(mr_2) \quad (1.8)$$

Prázdný objem jádra posuzovaného povrchu V_{vc} vyjadřuje rozdíl prázdného objemu mezi materiálovými poměry mr_1 (výchozí hodnota 10 %) a mr_2 (80 %). [10]

$$V_{vc} = V_v(mr_1) - V_v(mr_2) \quad (1.9)$$

Objem materiálu vrchů posuzovaného povrchu V_{mp} je definován jako materiálový objem v hladině p . [7] Dle normy ISO 25178-3 [12] je výchozí hodnota p stanovena na 10 %, stejně jako výchozí hodnota mr_1 , která je určena dle Leache [10] taktéž 10 %.

$$V_{mp} = V_m(mr_1) \quad (1.10)$$

Tento parametr lze použít pro stejný účel jako parametr S_{pk} , tj. pro charakterizaci objemu materiálu, který je pravděpodobně odstraněn během záběhu součástí. [10]

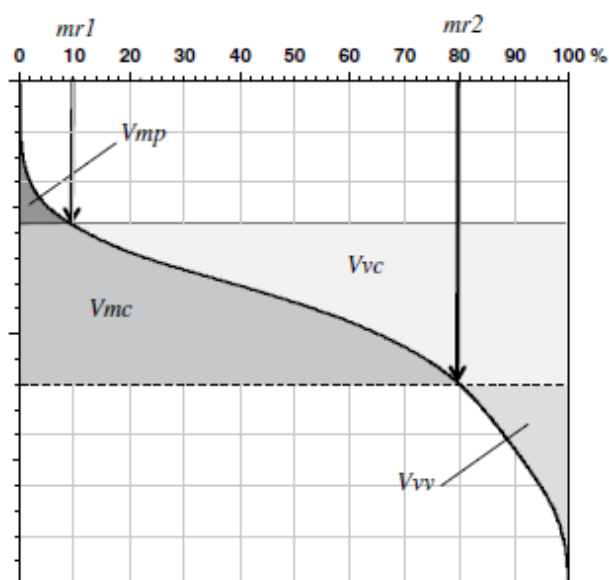
Parametr V_{mc} - *objem materiálu jádra posuzovaného povrchu* vyjadřuje rozdíl objemu materiálu mezi materiálovými poměry p a q . [7]

Jestliže je rovnice upravena podle Leache [10], pak jsou namísto parametrů p a q dosazeny hodnoty $mr1$ a $mr2$ a rovnice vypadá následovně:

$$V_{mc} = V_{m}(mr2) - V_{m}(mr1) \quad (1.11)$$

Výchozími hodnotami jsou $mr2 = 80\%$ a $mr1 = 10\%$. Tento parametr představuje část povrchu materiálu, která není v kontaktu s jiným povrchem a nehraje roli při mazání materiálu. [10]

Obrázek 1.13 znázorňuje 4 objemové parametry, které jsou počítány z materiálových poměrů $mr1$ a $mr2$. Ukazují dobrou korelaci s funkčními požadavky v mnoha použitích pro dokonalé zpracování. [10]



Obrázek 1.13: Význam objemových parametrů na křivce materiálového poměru [10]

Parametr V_{vv} charakterizuje objem zadržené tekutiny v nehlubších údolích povrchu. Parametr V_{mp} popisuje objem materiálu umístěného na nejvyšších vrcholech povrchu, které jsou odstraňovány během procesu opotřebení. Po několika hodinách provozu jsou na použité mechanické součásti nejvyšší vrcholy odříznuty nebo plasticky deformovány. Odpovídající částice materiálu jsou zachyceny v nehlubších údolích, takže chování povrchu je pravděpodobněji popsáno parametry V_{mc} a V_{vc} . [10]

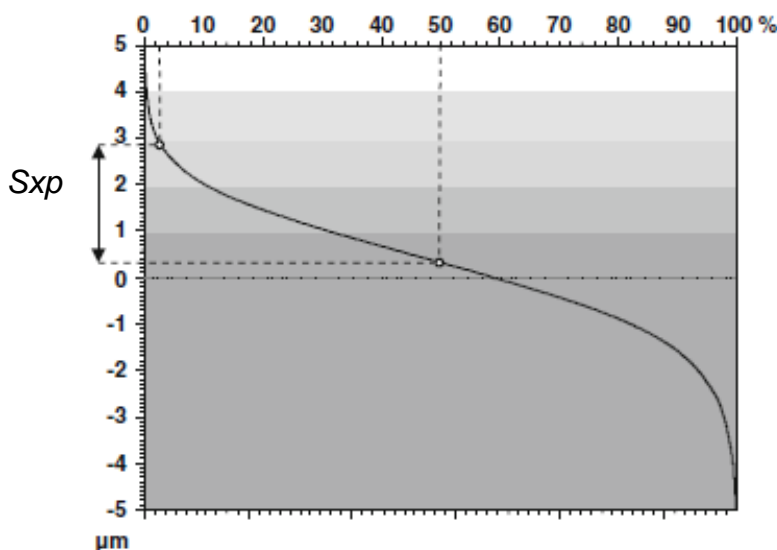
Funkční parametry

Parametr S_{xp} je *extrémní výška vrcholu*, která je dána rozdílem výšky materiálového poměru p a q (obrázek 1.14). Výchozí hodnoty poměrů jsou $p = 2,5\%$ a $q = 50\%$. [7]

$$S_{xp} = S_{mc}(p) - S_{mc}(q) \quad (1.12)$$

Parametr S_{xp} je zaměřen na charakterizaci horní části povrchu, od střední roviny po nejvyšší vrchol, bez ohledu na malé procento nejvyšších vrcholů, které nemusí být významné. [10]

Hodnoty 2,5 % a 50 % jsou definovány jako výchozí, ale lze je v závislosti na použití nastavit i na odlišné hodnoty (měly by být blízké těmto výchozím hodnotám, protože je tento parametr specifický pro popis vrcholů). Pro obecnější výškové rozdíly by měl být použit parametr S_{dc} (definovaný výše), který je speciálním případem parametru S_{xp} . Platí pro něj stejná rovnice (1.16) při použití výchozích hodnot poměrů, které jsou v tomto případě $p = 2 \%$ a $q = 98 \%$. [10]



Obrázek 1.14: Znárodnění parametru S_{xp} [10]

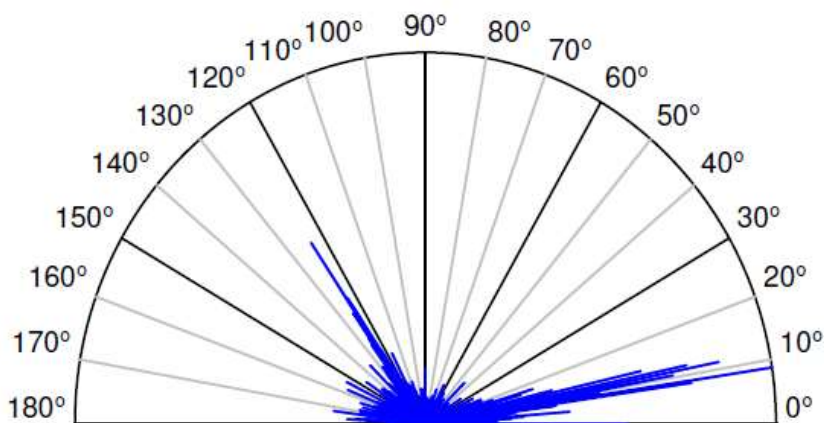
Tento parametr již není v nově připravované normě ISO/WD 25178-2:2017 definován.

1.2.5 Další parametry

Parametr Std vyjadřuje *směr textury posuzovaného povrchu*. Je to úhel absolutní nejvyšší hodnoty v úhlovém spektru vztažen k zadanému úhlu θ . [7]

Parametr Std je hodnocen pomocí Fourierova spektra povrchu. Fourierovo spektrum udává energetický obsah každé prostorové frekvence na povrchu a je obvykle znázorněno jako graf. Při přesunu ze středu na okraj spektra v daném směru, se prostorové frekvence pohybují od nejnižší k nejvyšší hodnotě. Frekvence uprostřed spektra odpovídá spojitě hodnotě v ose z (nulové frekvenci nebo nekonečné vlnové délce). Amplitudy frekvenčních složek podél poloměru v daném směru lze integrovat mezi dvěma vybranými prostorovými frekvencemi f_{min} a f_{max} , čímž se vypočte hodnota, která představuje frekvenční obsah v tomto směru. Opakováním této integrace pro všechny úhly mezi 0° a 180° je získáno spektrum polárních souřadnic, které lze znázornit půlkruhovým grafem (viz obrázek 1.15). Maximální hodnota v grafu (obrázek 1.15) se nazývá hlavní směr textury povrchu neboli Std . Pokud je poměr

izotropie Str mezi hodnotami 0,6 – 0,8 (v závislosti na aplikaci), měl by být parametr Std považován za nevýznamný. Parametr Std se hodí pro povrchy, který vykazují škrábance a orientovanou texturu povrchu. [10]



Isotropy: 6.5416 %

Obrázek 1.15: Znárodnění směru textury frézovaného povrchu

Literatura uvádí různé zařazení tohoto parametru. Dle normy ISO 25178-2:2012 [7] patří do skupiny další parametry, avšak v příloze normy ČSN EN ISO 25178-3:2013 je již zařazen do skupiny prostorových parametrů. Dle Leache (r. 2013 [10]) spadá taktéž do skupiny prostorových parametrů a v článku [9] (r. 2013) je uveden pod skupinou funkčních parametrů textury povrchu. V nově připravované normě ISO/WD 25178-2:2017 je zařazen ve skupině dalších parametrů, proto je v této práci začleněn také do této skupiny.

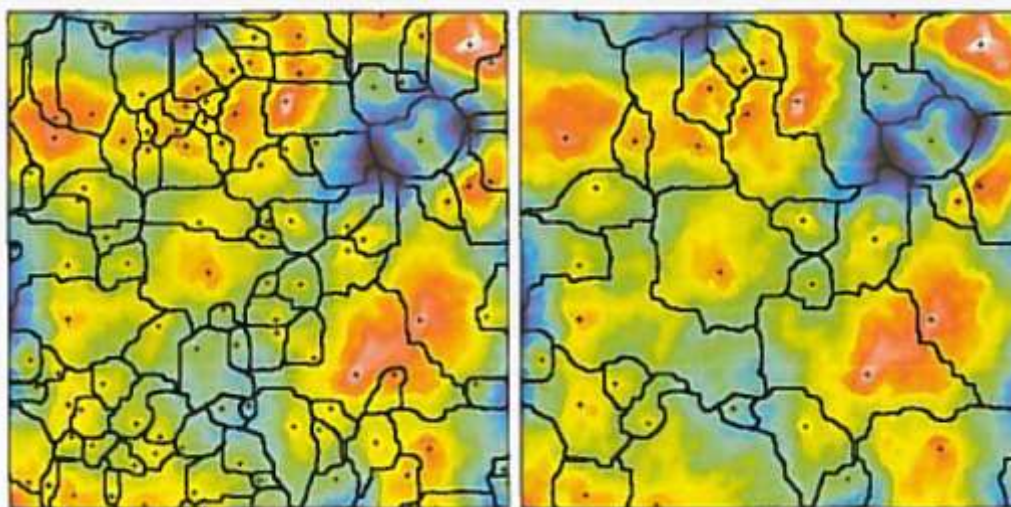
1.2.6 Vyjmenované parametry prvků

Charakterizace prvků obsahuje techniky pro rozpoznání vzorku, které mohou být použity pro charakterizaci specifikovaných prvků na posuzovaném povrchu. Proces charakterizace je rozdělen do pěti fází: výběr typu prvků textury, segmentace, stanovení významných prvků, výběr vlastností prvků a statistická kvantifikace vlastností prvků. [7]

Existují tři typy výběru prvků textury, a to plošné prvky (vrchy a údolí), prvky přímky a body prvků (vrcholy, dna). Pro funkci kontrolované plochy je důležité vybrat vhodný typ prvků textury povrchu. [7]

Segmentace je používána pro určení oblastí posuzovaného povrchu, které jsou definovány posuzovanými prvky. Proces segmentace je založen na zjištění všech vrchů a údolí na posuzovaném povrchu. To obvykle vede k rozsáhlejší segmentaci povrchu, takže menší segmenty jsou odříznuty, aby byla zachována vhodná segmentace posuzovaného povrchu. Kritériem velikosti segmentace je například Wolfovo pročištění, které definuje malé segmenty k odříznutí (pročištění).

Na obrázku 1.16 je znázornění definovaných vrchů pomocí Wolfova pročištění, vlevo při použití 1 % Sz a vpravo při použití 5 % Sz. [7]



Obrázek 1.16: Znázornění definovaných vrchů z Wolfova pročištění [11]

Při stanovení významných prvků je důležité odlišení funkčně významných a nevýznamných prvků. Pro každou funkci povrchu musí být definována funkce segmentace, která identifikuje vhodnost prvků definovaných segmentací. Je nutné stanovit vhodné vlastnosti prvků pro charakterizaci, kterými může být například délka, plocha nebo objem prvku. Poslední částí charakterizace prvků je výpočet patřičných statistik vlastností významných prvků, parametry prvků nebo také histogram hodnot vlastností. [7]

Mezi vyjmenované parametry prvků patří hustota vrcholů, aritmetický průměr zakřivení vrcholů, výška 10 bodů povrchu, výška 5 vrcholů a hloubka 5 prohlubní, dále střední plocha údolí a vrchu a taktéž střední objem vrchu a údolí.

Tabulka 1.6: Vyjmenované parametry prvků textury povrchu

| | | |
|-------------|---------------------|---|
| <i>Spd</i> | [mm ⁻²] | <i>hustota vrcholů</i> |
| <i>Spc</i> | [mm ⁻²] | <i>aritmetický průměr zakřivení vrcholů</i> |
| <i>S5p</i> | [μm] | <i>výška 5 vrcholů</i> |
| <i>S5v</i> | [μm] | <i>hloubka 5 prohlubní</i> |
| <i>S10z</i> | [μm] | <i>výška 10 bodů povrchu</i> |
| <i>Sda</i> | [μm ²] | <i>střední plocha údolí</i> |
| <i>Sha</i> | [μm ²] | <i>střední plocha vrchů</i> |
| <i>Sdv</i> | [μm ³] | <i>střední objem údolí</i> |
| <i>Shv</i> | [μm ³] | <i>střední objem vrchů</i> |

Parametr *Spd* je definován jako *hustotu vrcholů* a udává počet vrcholů na jednotku plochy. [7]

Aritmetický průměr hlavních zakřivení vrcholů na definiční ploše je definován jako parametr *Spc* – *aritmetický průměr zakřivení vrcholu*. [7]

Parametr *S5p* je *výška 5 vrcholů*, která je dána průměrnou hodnotou výšky 5 vrcholů s největší celkovou výškou vrcholu na definiční ploše. [7]

Výška 5 prohlubní S5v je definována jako průměrná hodnota hloubky 5 prohlubní s největší celkovou hloubkou prohlubně na definiční ploše. [7]

Výška 10 bodů povrchu S10z je součtem parametru *S5p* a *S5v*, které jsou popsány výše. [7]

Parametr *Sda* určuje *střední plochu údolí*, parametr *Sha* definuje *střední plochu vrchů*. [7]

Střední objem údolí je určen parametrem *Sdv* a parametr *Shv* stanoví *střední objem vrchů*. [7]

2 Posuzování shody a řízení procesu pomocí parametrů textury povrchu

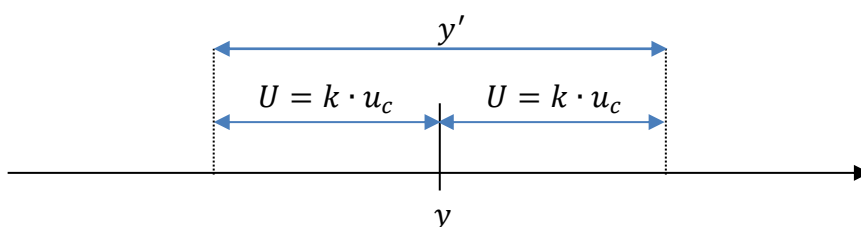
Tato kapitola pojednává o posouzení shody, neshody a rozsahu nejistot. Dále jsou zde rozebrány metody řízení procesu s využitím parametrů textury povrchu.

2.1 Posuzování shody

Při provádění posuzování shody či neshody se specifikací je třeba brát v úvahu odhadovanou nejistotu měření. Problém vzniká, jestliže výsledek měření spadá blízko horní nebo dolní meze specifikace. V tomto případě není možné vždy prokázat shodu nebo neshodu se specifikací, protože výsledek měření rozšířený o nejistotu měření zahrnuje jednu ze specifikačních mezí. [13]

Pole shody je definováno jako pole specifikace, které je zmenšené o rozšířenou nejistotu měření. *Pole neshody* je pole, které je vně pole specifikace a je zvětšené o rozšířenou nejistotu měření. *Rozsah nejistoty* určuje rozsah v okolí specifikačních mezí, kde nemůže být prokázána shoda ani neshoda s ohledem na nejistotu měření. *Kompletním výsledkem měření* y' (rovnice 2.1, obrázek 2.1) je výsledek měření y včetně rozšířené nejistoty měření U , přičemž rozšířená nejistota měření U je součinem kombinované standartní nejistoty měření u_c a koeficientu rozšíření k . [14]

$$y' = y \pm U \quad (2.1)$$



Obrázek 2.1: Schéma kompletního výsledku měření y' (upraveno dle [14])

2.1.1 Prokázání shody a neshody se specifikacemi

Pokud kompletní výsledek měření spadá do pole tolerance charakteristiky obrobku (rovnice 2.2), je prokázána shoda se specifikací. [14]

$$LSL \leq y - U \quad a \quad y + U \leq USL \quad (2.2)$$

Podobná situace nastane, pokud výsledek měření spadá do pole tolerance charakteristiky obrobku, které je zmenšené o rozšířenou nejistotu měření. Takto je definováno pole shody, které je definováno v rovnici 2.3. Velikost pole shody přímo souvisí s danou specifikací a aktuální rozšířenou nejistotou, proto mohou být obrobky schváleny, jestliže je prokázána shoda se specifikací dle níže uvedené rovnice. [14]

$$LSL + U \leq y \leq USL - U \quad (2.3)$$

Jestliže kompletní výsledek měření nespadá do pole tolerance charakteristiky obrobku (rovnice 2.4), pak je prokázána neshoda se specifikací (není prokázána shoda). [14]

$$y + U \leq LSL \text{ nebo } USL \leq y - U \quad (2.4)$$

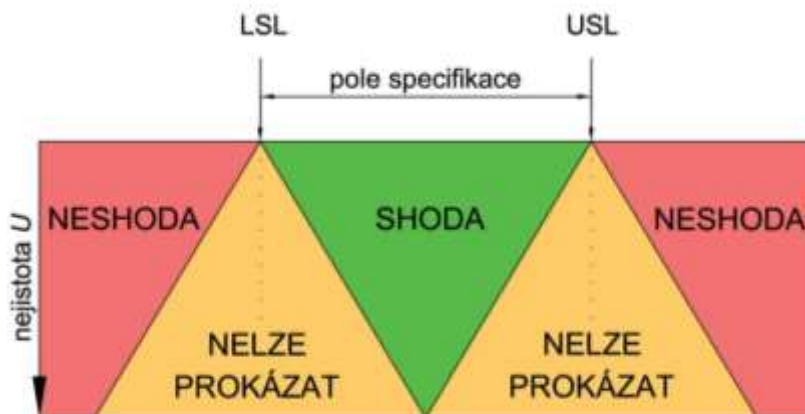
Obdobně může být prokázána neshoda, pokud výsledek měření spadá vně pole tolerance charakteristiky obrobku, zvětšené o rozšířenou nejistotu měření (rovnice 2.5). Pokud je prokázána neshoda se specifikací při použití výše zmíněného pravidla, mohou být obrobky odmítnuty. [14]

$$y \leq LSL - U \text{ nebo } USL + U \leq y \quad (2.5)$$

Shoda ani neshoda nemůže být prokázána v případě, že kompletní výsledek měření obsahuje jednu mezní hodnotu obrobku (rovnice 2.6), nebo spadá do jednoho z rozsahů nejistoty (rovnice 2.7)⁶. Kvůli rozsahu nejistoty, který přímo souvisí s rozšířenou nejistotou měření, nemůže být automaticky rozhodnuto o přijetí nebo odmítnutí obrobku. [14]

$$y - U < LSL < y + U \text{ nebo } y - U < USL < y + U \quad (2.6)$$

$$LSL - U < y < LSL + U \text{ nebo } USL - U < y < USL + U \quad (2.7)$$



Obrázek 2.2: Schéma pole shody a neshody (upraveno dle [14])

Na texturu povrchu se vztahují také pravidla 16 % a maxima, jež jsou zmíněná výše. Obvykle se používá pouze horní mez specifikace USL. Pravidlo 16 % se většinou aplikuje u profilových parametrů, pravidlo maxima pak u plošných i profilových parametrů textury povrchu.

⁶ V normě ČSN EN ISO 14253-1:2014 [14] i v normě ISO 14253-1:2013 je chybně uvedená rovnice jako $USL - U < y < USL - U$. Správná verze rovnice je $USL - U < y < USL + U$.

2.2 Řízení procesu

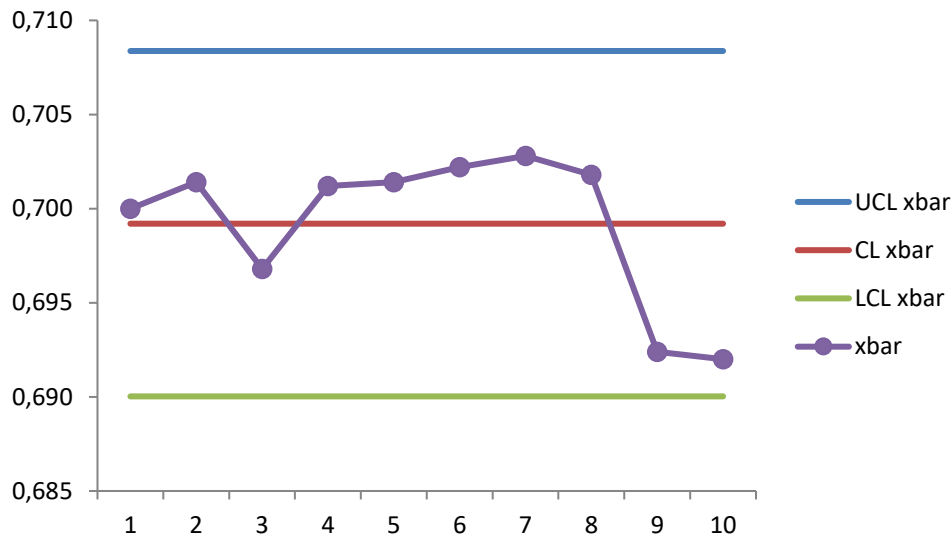
2.2.1 Statistická regulace procesu

SPC („*Statistical process control*“) je pravděpodobně nejpoužívanější statistickou metodou, která je využívána především při výrobních procesech. Zlepšování kvality a uvedení procesu do stabilního stavu je základním cílem SPC. [15]

Podstatou statistické regulace procesu je pravidelná a průběžná výběrová kontrola kvality procesů, která je založena na matematicko-statistickém hodnocení kvality. Poskytuje podněty k pohotovým zásahům do procesu a tím umožňuje okamžité zlepšení procesu. Mezi cíle SPC kromě dosažení statisticky stabilního procesu patří mimo jiné také udržování statisticky zvládnutého procesu na požadované stabilní úrovni, předcházení neshodných produktů, vytváření podmínek pro hodnocení způsobilosti procesu a další zlepšování procesu. [16]

Regulační diagramy

Hlavním statistickým nástrojem pro regulaci procesu jsou regulační diagramy, které jsou grafickou metodou znázornění a porovnání informací. Typický regulační diagram je zobrazen na obrázku 2.3. Tento graf znázorňuje průměry měření kvalitativních charakteristik ve vzorcích odebraných z procesu v závislosti na čase (nebo čísle vzorku). [17]

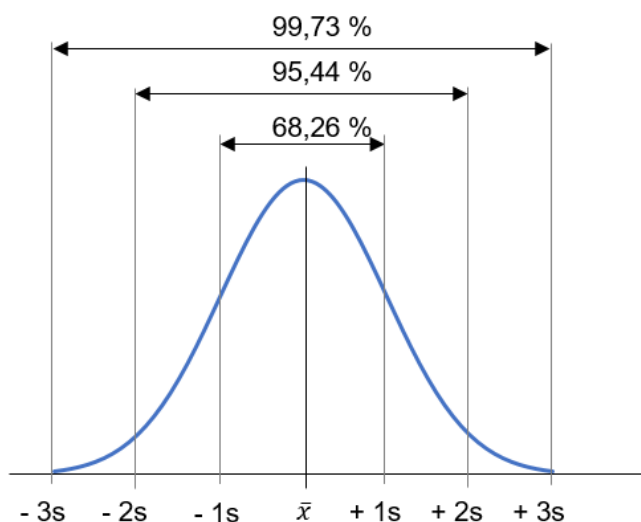


Obrázek 2.3: Typický regulační diagram

Regulační diagramy mají obecně sloužit jako diagnostický nástroj k posouzení, zda se monitorovaný proces, který je představovaný nějakou měřenou veličinou, chová tak, jak je od něj očekáváno. Také se sleduje, zda nedošlo k nečekané změně procesu. Jestliže k takovéto změně došlo, je potřeba ji vysvětlit a případně přikročit k nějakému zásahu. Regulační diagramy se dají obecně použít všude tam, kde jsou v čase získávány informace o kvalitě. [18]

Pomocí regulačních diagramů je prováděna identifikace variability. Regulační diagram je v podstatě průběhový diagram s horní a dolní regulační mezí, jenž je vyznačena na obě strany od průměrné hodnoty procesu. Typické regulační meze jsou ve vzdálenosti $\pm 3\sigma$ (znázornění $\pm 3\sigma$ je uvedeno v obrázku 2.4). Regulační diagramy obsahují tyto základní prvky [15]:

- *centrální přímka CL* („*central line*“), je přímka ležící v referenční hodnotě sledovaného znaku kvality x , obvykle je to střední hodnota procesu.
- *horní regulační mez UCL* („*upper control limit*“) je umístěna ve vzdálenosti $+ 3$ sigma od střední hodnoty procesu (CL).
- *dolní regulační mez LCL* („*lower control limit*“) je umístěna ve vzdálenosti $- 3$ sigma od střední hodnoty procesu (CL).

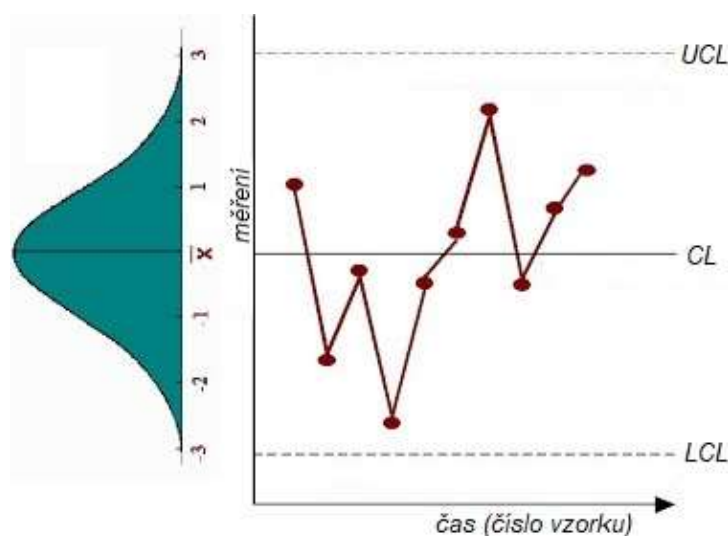


Obrázek 2.4: Znázornění ± 3 sigma

Regulační meze UCL a LCL definují oblast působení pouze náhodných příčin variability. Jsou základním rozhodovacím kritériem, zda je nutné zasáhnout do procesu. Regulační meze jsou určeny statisticky, nelze je zaměňovat s tolerančními mezemi. [16]

Regulační diagram je velmi užitečnou technikou monitorování procesu. Jestliže jsou přítomny neobvyklé zdroje variability, průměrné hodnoty vzorků vykreslí mimo regulační meze. Toto je signál, že by mělo být provedeno určité vyšetření procesu a také by mělo být zavedeno nápravné opatření k odstranění těchto neobvyklých zdrojů variability. Systematické používání regulačního diagramu je vynikající způsob, jak snížit variabilitu. [17]

V případě, že nejsou zjištěny speciální příčiny nestability, jsou data z procesu rozdělena do normálního rozdělení (obrázek 2.5), přičemž by měly být všechny body uvnitř regulačních mezí. [15]



Obrázek 2.5: Data rozdělena dle Gaussovy křivky [15]

Základním předpokladem pro použití regulačního (Shewhartova) diagramu je normální rozdělení sledovaného znaku kvality $N(\mu, \sigma^2)$, kde μ představuje střední hodnotu a σ^2 rozptyl. Za statisticky zvládnutý proces je považován takový proces, kde se parametry μ a σ nemění v čase (dle testů vymezených příčin – tabulka 2.1). V případě, že má sledovaný znak kvality jiné než normální rozdělení, musí být použit jiný druh diagramu. [20]

Regulační diagram umožňuje rozlišit variabilitu procesu, která je vyvolána náhodnými příčinami od variability vyvolané vymezenými (zvláštními) příčinami.

Náhodné neboli přirozené příčiny ukazují širokou škálu neidentifikovaných příčin, z nichž se každá podílí zanedbatelnou složkou na celkové variabilitě. Součet jednotlivých příspěvků těchto příčin je měřitelný a je chápán jako přirozený znak procesu. Působení tohoto druhu příčin je trvalé a relativně předvídatelné, protože se variabilita sledovaných znaků kvality vlivem náhodných příčin prakticky nemění. Omezení celkového působení náhodných příčin lze docílit pouze nežádoucími radikálními zásahy do výrobního procesu, kterými může být například změna technologie nebo změna výrobního zařízení. [21]

Vymezené (zvláštní) příčiny variability jsou takové příčiny, které vyvolávají variabilitu procesu vedoucí k nežádoucí reálné změně výrobního procesu. Jejich působení je nežádoucí, náhodné a nepředvídatelné. Rozdělují se na nepředvídatelné a předvídatelné vymezené příčiny [21]:

- *Nepředvídatelné vymezené příčiny* nepředstavují přirozený průběh procesu, působí nepravidelně a nemůžou být popsány statistickými zákonitostmi, a proto by měly být odstraněny. Tyto příčiny jsou obvykle identifikovatelné

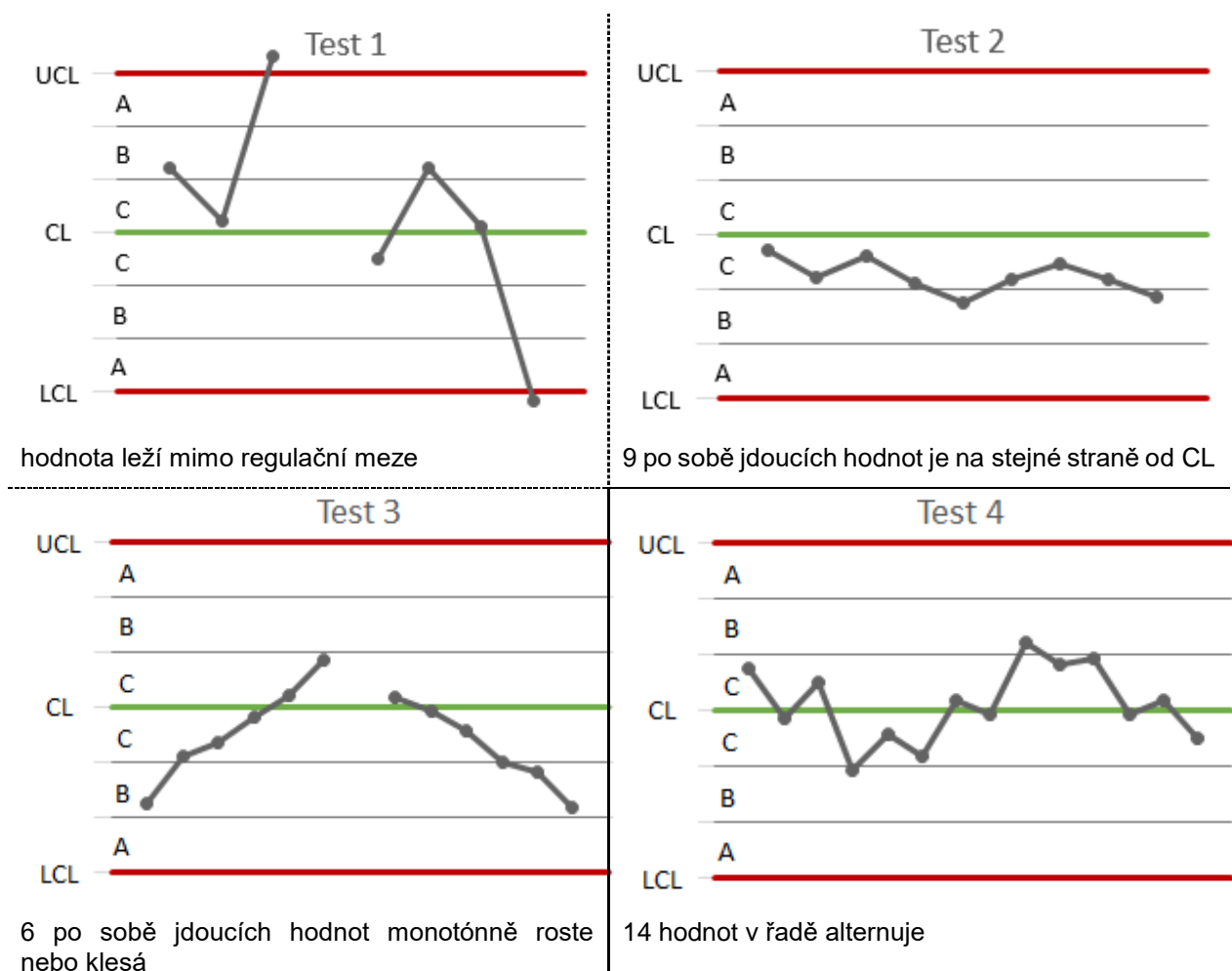
a většinou odstranitelné. V případě, že nejsou zavedena trvalá nápravná opatření, mohou se tyto příčiny znovu objevit.

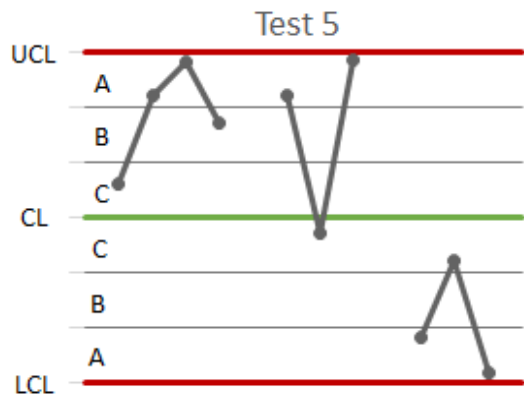
- *Předvídatelné vymezitelné příčiny* jsou takové příčiny, jejichž účinky jsou popsány fyzikálními zákonitostmi a experimentálním zkoumáním. Lze je do jisté míry eliminovat, ale nemohou být zcela odstraněny.

V situaci, kdy jsou objeveny signály působení vymezitelných příčin, je nutná identifikace těchto příčin a jejich odstranění (pokud je to možné) takovým způsobem, aby proces dosáhl stavu, jehož variabilitu budou vyvolávat pouze náhodné příčiny. Takový proces je označován jako statisticky zvládnutý proces. Jeho hlavní výhodou je předvídatelnost sledovaného znaku kvality. [22]

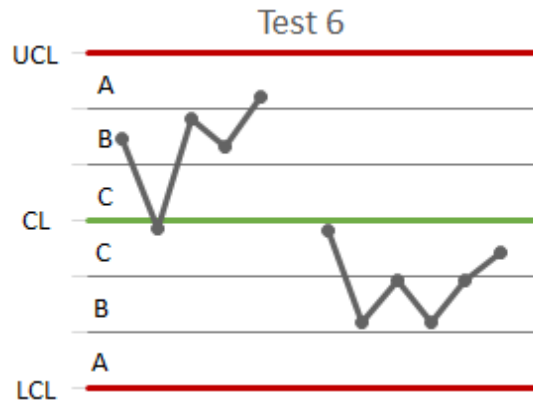
V normě ČSN ISO 8258 [23] jsou uvedeny doporučené testy vymezitelných příčin pro diagram výběrového aritmetického průměru případně pro diagram individuálních hodnot. Testy vymezitelných příčin znázorňuje tabulka 2.1.

Tabulka 2.1: Testy vymezitelných příčin (upraveno dle [23])

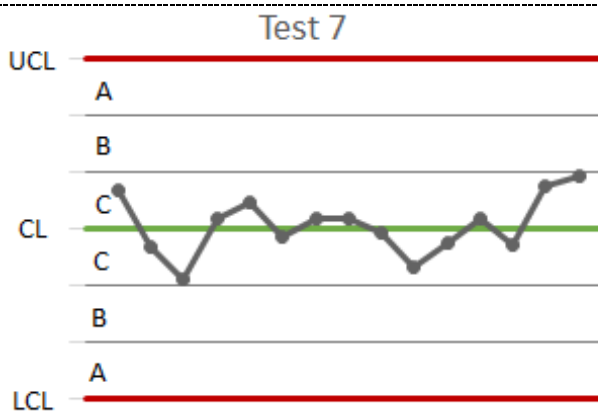




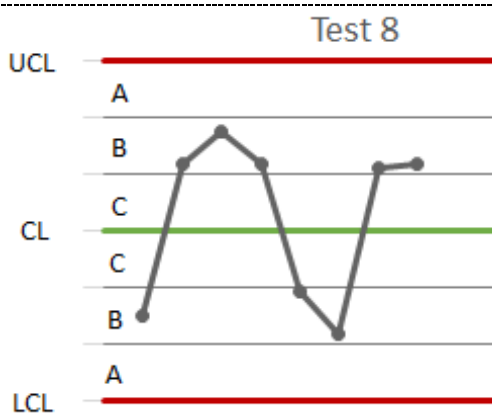
2 ze 3 po sobě jdoucích hodnot leží v pásu A



4 z 5 po sobě jdoucích hodnot leží v pásu B nebo vzdálenějším od CL



15 hodnot v řadě za sebou leží v pásu C, nad nebo pod CL



ani jeden z 8 bodů v řadě za sebou neleží v pásu C

Statistická regulace

Podle vlastností sledovaného znaku kvality se rozlišují dva druhy statistické regulace, a to statistická regulace srovnáváním a statistická regulace měřením. První ze zmíněných metod je univerzálně použitelná, protože pro její aplikaci stačí identifikace neshodných produktů nebo stanovení počtu neshod. V případě, kdy nevznikají neshody či neshodné produkty tuto metodu nelze použít. Při tomto postupu se pracuje pouze s jedním regulačním diagramem. Jestliže má sledovaný znak kvality měřitelnou hodnotu, používá se statistická regulace měřením. [22]

Regulační diagramy pro statistickou regulaci měřením lze rozdělit do několika skupin. V praxi se nejčastěji používají v těchto dvojicích [20]:

- (\bar{x}, R) – regulační diagram pro průměr \bar{x} a rozpětí R
- (\bar{x}, s) – regulační diagram pro průměr \bar{x} a směrodatné odchyly s
- (x_i, R_k) – regulační diagram pro individuální hodnoty x_i a klouzavé rozpětí R_k
- (\tilde{x}, R) – regulační diagram pro medián \tilde{x} a rozpětí R

Při použití regulačních diagramů je nutné využít kombinaci dvojice, tzn. jeden regulační diagram pro polohu a současně použití regulačního diagramu pro variabilitu. Při sestrojování diagramů by měl být nejdříve vytvořen regulační diagram pro variabilitu a až poté regulační diagram polohy. [20]

Protože je textura povrchu spojitou veličinou, je vhodné ji posuzovat pomocí regulačních diagramů pro statistickou regulaci měření. Vhodnými dvojicemi pro hodnocení statistické regulace procesu jsou pro texturu povrchu regulační diagramy (\bar{x}, R) , (\bar{x}, s) případně (x_i, R_k) . V této diplomové práci jsou pro analýzu použity regulační diagramy pro průměr a rozpětí, proto je zde podrobněji popsán pouze tento druh regulačních diagramů.

Regulační diagramy pro výběrový aritmetický průměr \bar{x} a výběrové rozpětí R patří mezi nejrozšířenější dvojice regulačních diagramů. Jestliže se pracuje s rozsahy výběrů 2-10 jednotek v podskupině, pak jsou tyto regulační diagramy nejvhodnější. Pro větší počet jednotek v podskupině je přijatelnější zvolit dvojici *regulačních diagramů pro výběrový průměr \bar{x} a výběrovou směrodatnou odchylku s* . Výběrové rozpětí je totiž při větším počtu jednotek v podskupině méně přesným odhadem variability procesu. Z matematického hlediska však mohou být použity i pro menší výběry. [20]

Regulační diagram pro výběrový průměr je určen pro sledování hodnot jednotlivých výběrových průměrů, které mají konstantní rozsah n . *Regulační diagram pro výběrové rozpětí R* pak určuje sledování hodnot jednotlivých výběrových rozpětí s konstantním rozsahem n . [20]

Pro \bar{x} - diagram platí [21]:

$$CL_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} = \frac{\sum_{j=1}^l \bar{x}_j}{l} \quad (2.8)$$

$$LCL_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} - A_2 \cdot \bar{R} \quad (2.9)$$

$$UCL_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} + A_2 \cdot \bar{R} \quad (2.10)$$

- kde:
- $\bar{\bar{x}}$ - průměrná hodnota průměru v podskupinách
 - \bar{R} - průměrná hodnota variačního rozpětí v podskupinách
 - l - počet podskupin
 - A_2 - koeficient závislý na rozsahu podskupiny

Pro \bar{R} - diagram platí [21]:

$$CL_R = \bar{R} \quad (2.11)$$

$$LCL_R = D_3 \cdot \bar{R} \quad (2.12)$$

$$UCL_R = D_4 \cdot \bar{R} \quad (2.13)$$

kde platí stejná legenda jako výše a navíc:

D_3, D_4 - koeficienty závislé na rozsahu podskupiny

Koeficienty A_2, D_3, D_4 jsou uvedeny v normě ČSN ISO 8258 [23].

Do dvojice regulačních diagramů jsou vyneseny hodnoty vypočtených výběrových charakteristik hodnot v podskupinách a také hladiny regulačních mezí. Analýza regulačních diagramů je založena na posouzení průběhů výběrových charakteristik regulované veličiny, zda nesignalizují působení vymezených příčin variability (popsaných výše). [22]

V souvislosti s texturou povrchu je nutné zvolit vhodný parametr k vytvoření regulačního diagramu a následnému posouzení způsobilosti procesu. Vybraný parametr by měl být stabilní. Obecně se uvádí, že je vhodné použití parametrů průměrných hodnot, kterými může být například parametr S_a nebo S_q . Naopak nevhodnými parametry jsou takové parametry, které uvádí maximální hodnoty (např. S_p, S_v, S_z).

Způsobilost procesu

Způsobilostí procesu („*proces capability*“) se rozumí schopnost procesu trvale dosahovat stanovených hodnot znaků výrobku, aby byly dodrženy cílové hodnoty znaků kvality a dovolené míry variability. [24]

Indexy způsobilosti procesu („*process capability index = PCI*“) jsou nástrojem k ohodnocení, do jaké míry jsou dodržovány předepsané regulační meze a definovaná úroveň znaku kvality. Index způsobilosti je bezrozměrné číslo. Existuje více druhů indexů způsobilosti (viz. dále), které nemohou být vzájemně srovnávány. Při nejednoznačnosti označení indexu může dojít k jejich záměně. Proto je třeba dbát obezřetnosti a srovnávat pouze indexy stejného druhu. [25]

Index způsobilosti procesu c_p obecně vyjadřuje poměr požadavku na variabilitu ku velikosti variability (rovnice 2.14). [24]

$$c_p = \frac{\text{požadavek na variabilitu procesu}}{\text{velikost variability procesu}} \quad (2.14)$$

Indexem způsobilosti je nejjednodušším způsobem vyjádřena míra, zda jsou dodržovány regulační meze procesu. Může být vyjádřen také pomocí rovnice 2.15. Předpokladem je, že regulační meze UCL a LCL byly stanoveny na základě stabilního

procesu jako $\bar{x} \pm 3\sigma$. Směrodatná odchylka σ je odhadem z již sledovaného procesu. Jestliže je dosaženo hodnoty $c_p \geq 1$, lze říci, že proces vyhovuje předepsaným mezím (z hlediska variability). Pokud je $c_p < 1$ je proces považován za nezpůsobilý. Nevýhodou indexu c_p je, že je hodnocena pouze variabilita procesu vůči předepsaným mezím. Posunutí střední hodnoty se neuvažuje. Index c_p nelze použít, jestliže se střední hodnota sledovaného procesu neshoduje s předepsanou hodnotou. [25]

$$c_p = \frac{UCL - LCL}{6\sigma} \quad (2.15)$$

Index c_{pk} (rovnice 2.16) nepřímo řeší problém předcházejícího indexu, posunutí střední hodnoty vůči předepsané hodnotě zde nehraje velkou roli. Pokud je střední hodnota procesu mimo regulační meze, může být tento index záporný. c_{pk} lze také použít v případě, že LCL a UCL jsou asymetrické. Obecně platí, že c_{pk} je vždy menší než c_p a tedy i přísnější. Obecně může být hodnota indexu c_{pk} rovna hodnotě indexu c_p , jestliže průměr procesu je přesně roven předepsané hodnotě (vycentrovaný proces). [25]

$$c_{pk} = \frac{(UCL - \bar{x}; \bar{x} - LCL)}{3\sigma} \quad (2.16)$$

V současnosti je obvykle proces považován za způsobilý, jestliže hodnota indexů způsobilosti dosahuje minimálně hodnoty 1,33 ($c_p \geq 1,33, c_{pk} \geq 1,33$). [16]

V některé starší literatuře je navíc uváděn například index c_{pm} nebo c_{pmk} . Tyto indexy však nejsou tak používané jako výše zmíněné c_p a c_{pk} .

Existují i další nástroje pro řízení kvality. Patří mezi ně například Paretova analýza, i když se o statistickou metodu vlastně nejedná. Vychází ze zkušenosti vyjádřené Paretovým pravidlem, kde je 80 % problémů způsobeno 20 % příčin. Dalším doporučeným nástrojem je diagram příčin a následků (Ishikava), který je spíše organizační nástroj. Někdy je také nazýván diagram rybí kosti. Jeho cílem je nalézt nejpravděpodobnější příčiny řešeného problému. [25]

2.2.2 Klasifikace - výběr vhodného parametru

V praxi je v dnešní době využíváno pouze omezené množství parametrů textury povrchu (zejména Ra popř. Rz). Tyto parametry nemusí dokonale popisovat funkci parametru nebo možnost jeho kontroly. Výběr vhodného parametru, který by dokázal rozlišit dobré a špatné výrobky bývá složitý. V souvislosti s pokroky v oblasti statistiky se na tyto úlohy začaly nasazovat metody statistické klasifikace.

Klasifikaci lze popsat jako proces přiřazování značek vzorkům. Klasifikace může být seskupena do binární klasifikace a multi-klasifikace. V binární klasifikaci jsou zahrnuty pouze dvě třídy, zatímco u multi-klasifikace je rozlišování prováděno na třech nebo více třídách. Zvláštním případem klasifikace je klasifikace jedné třídy. [10]

Proces je rozdělen do několika kroků: (1) sestavení tréninkové množiny, která obsahuje údaje o měření vzorků a jejich funkce, (2) učení klasifikátoru nastavením rozhodovacího pravidla, (3) klasifikovat nové neznámé vzorky a (4) hodnocení. [10]

Hodnocení kvality klasifikátorů

K tomu, aby mohly být vzájemně porovnány jednotlivé metody klasifikace slouží analýza ROC („*receiver operating characteristics*“). Pro binární klasifikaci platí tyto výstupy [10]:

- TP („*true positive*“) - výstupem klasifikátoru je dobrý kus a je očekáván jako dobrý
- TN („*true negative*“) - výstup klasifikátoru je špatný vzorek a je očekáván také špatný
- FP („*false positive*“) - klasifikátorem je vzorek zařazen jako dobrý, ale má být špatný = chyba I. druhu.
- FN („*false negative*“) - výstup klasifikátoru je špatný vzorek, avšak má být dobrý = chyba II. druhu.

Jednou z možností pro vyjádření přesnosti klasifikátoru je výpočet, kterým je zjištěna procentuální přesnost klasifikátoru. K tomu je třeba nejprve spočítat hodnoty TP a TN. [10]

Citlivost (TPR - znázorněn na obrázku 2.6, rovnice 2.17) lze vypočítat jako poměr počtu TP ku součtu TP a FN. FNR je pak rozdílem do 100%. [10]

$$TPR = \frac{\#TP}{\#P} = \frac{\#TP}{\#TP + \#FN} \quad (2.17)$$

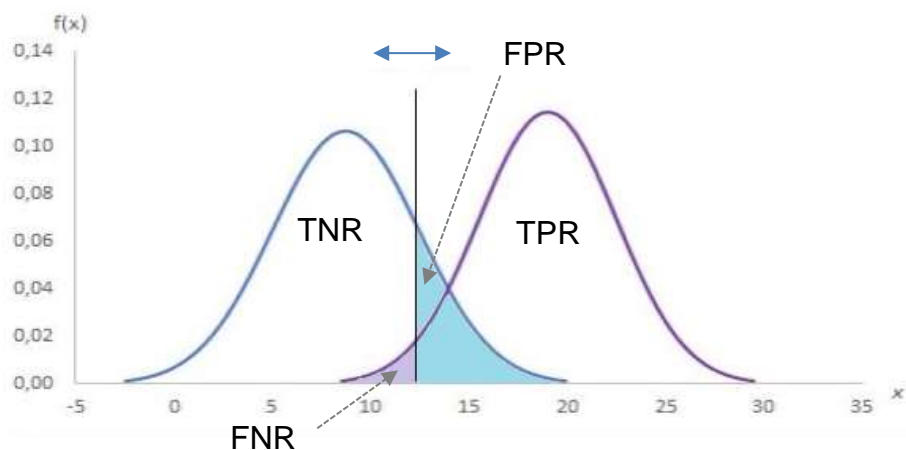
Specifická (TNR - obrázek 2.6, rovnice 2.18) se vypočte jako poměr počtu TN dělený součtem počtů TN a FP. FPR je rozdílem 1-TNR. [10]

$$TNR = \frac{\#TN}{\#N} = \frac{\#TN}{\#TN + \#FP} \quad (2.18)$$

Přesnost je pak určena na základě výpočtu poměru součtu počtů TP a TN ku součtu počtů P a N. [10]

$$přesnost = \frac{\#TP + \#TN}{\#P + \#N} \quad (2.19)$$

P je počet kladných (pozitivních) trénovacích vzorků a N je počet záporných (negativních) trénovacích vzorků. Znak # v tomto případě reprezentuje počet. [10]



Obrázek 2.6: Ilustrace TNR, FPR, TPR a FNR (upr. dle [10])

Metody klasifikace

Při použití metody průměrné a standardní odchylky je znám význam každého parametru. Pokud jsou intervaly odděleny, lze klasifikaci vyřešit pomocí parametru s nejvyšším významem. Nejznámějšími metodami jsou Naivní Bayesova klasifikace a klasifikace boosting. Tyto metody klasifikace tvoří základ pro vznik nejmodernějších metod, jako jsou neuronové sítě. [10]

Naivní bayesovská klasifikace

Naivní bayesovská klasifikace je metoda statistické klasifikace založená na Bayesově větě (rovnice 2.20). Každý nový vzorek je zařazen do třídy s maximální aposteriorní⁷ pravděpodobností. Metoda klasifikace pracuje v následujících krocích. Existuje tréninková množina, která obsahuje vzorky se správným označením třídy. Naivní bayesovský klasifikátor přidělí vzorek do určité třídy s nejvyšší aposteriorní pravděpodobností. [10]

$$\frac{P(A|B) \cdot P(A)}{P(B)} \quad (2.20)$$

Hlavní výhodou naivního bayesovského klasifikátoru je jeho krátký výpočetní čas pro učení. Tyto klasifikátory byly použity v široké škále aplikací (například klasifikace textů, dolování dat, lékařská oblast) a při aplikaci na experimentální data vykazovaly vysokou přesnost a rychlost. [10]

Nicméně naivní bayesovská klasifikace je založena na podmíněném nezávislém předpokladu, který může být v některých aplikačních oborech nereálný, například lékařská diagnóza (korelace mezi věkem a určitými příznaky). Proto je obvykle tato

⁷ Aposteriorní pravděpodobnost je taková pravděpodobnost, vyplývající z analýzy hypotéz, které jsou ověřené zkušeností. Aposteriorní pravděpodobnost platnosti konkrétní hypotézy je dána definicí $p(H_k|D)$, kde H_k – hypotéza, D – data nebo konkrétní měření. [31]

metoda méně přesná než sofistikovanější přístupy. Bylo navrženo několik modifikací základního modelu pro zvýšení jeho výkonnosti. [10]

Klasifikace boosting

Zvláštním případem je klasifikace jedné třídy (také známá jako detekce odlehlých hodnot nebo detekce nových hodnot), která předpokládá, že tréninková množina obsahuje pouze vzorky jedné třídy. Boosting je algoritmus strojového učení, který kombinuje přibližná klasifikační pravidla do jediného pravidla predikce vyšší přesnosti a takzvaný silný klasifikátor. Taková přibližná klasifikační pravidla se nazývají slabé klasifikátory a často se jednoduše zakládají na jedné z vlastností prostoru, kterým může být některý parametr textury povrchu. Jediný parametr však nemusí být dostatečný k rozlišení mezi dobrou a špatnou částí. Ke zlepšení přesnosti se boosting algoritmus učí určitý počet slabých klasifikátorů (každý s lepšími rozhodnutí než náhodný odhad) na jeden silný klasifikátor. [10]

V současné době je investováno mnoho peněz do strojů pro masovou výrobu v elektronice a automobilovém průmyslu. Skutečná přesnost a opakovatelnost těchto strojů je poměrně vysoká vzhledem k dostupným nástrojům měřících topografii povrchu. Díky vysoké přesnosti výrobních strojů jsou často k dispozici pouze vzorky jedné třídy (dobré části), ale žádné (nebo málo) vzorků třídy B (vzorky s vadami, mimořádnými hodnotami apod.). Pokud jsou k dispozici pouze vzorky jedné třídy, nelze použít binární ani multi-klasifikaci, proto se používá klasifikace boosting. Existují tři speciální případy: tréninková množina obsahuje pouze kladné vzorky, nebo je složena z kladných i záporných vzorků, nebo zahrnuje kladné a neoznačené vzorky. Známými metodami pro klasifikaci jedné třídy jsou hraniční metody, metody odhadů hustoty a metody rekonstrukce. [10]

V literatuře jsou uváděny i další klasifikační algoritmy. Patří mezi ně mimo jiné také algoritmy založené na neuronových sítích, logické algoritmy, statistické techniky učení a vektorová podpora strojů. [10]

3 Aplikace výsledků měření na výrobek v průmyslové praxi

Tato kapitola je rozdělena do několika podkapitol. V první podkapitole jsou popsány měřené vzorky, ve druhé pak měřicí přístroj. Poslední podkapitolou je analýza a vyhodnocení měření.

3.1 Měřené vzorky

Výše popsané metody byly demonstrovány na sériově vyráběných výrobcích (obrázek 3.1 a 3.2), které jsou v prvním kroku frézovány a následně broušeny. Vzorky byly poskytnuty brněnskou firmou. Z důvodu ochrany obchodního tajemství není uveden název firmy a detaily o výrobku.

Ze série vyrobených produktů bylo vybráno vždy 5 vzorků, a to na začátku směny, poté při výměně obráběcího nástroje a následně na konci směny. Takto bylo postupně změřeno celkem 45 kusů.

Dodané vzorky byly nejprve změřeny po operaci frézování, poté byly poslány na další operace. Po procesu broušení byly vzorky znovu změřeny a následně vyhodnoceny.



Obrázek 3.1: Fotografie měřeného vzorku (po operaci frézování)



Obrázek 3.2: Fotografie měřeného vzorku (po operaci broušení)

3.2 Použité měřicí přístroje

Existuje velké množství optických metod měření textury povrchu. Jsou využívány na různé měření profilů, plošnou topografii a také na integrační měření. Mezi metody patří mimo jiné i různé druhy interferometrů a mikroskopů. [26]

V této práci byl pro měření použit přístroj Taylor Hobson Talysurf CCI Lite, který je dostupný v laboratoři ÚVSSR na VUT – FSI.

Taylor Hobson Talysurf CCI Lite

Taylor Hobson Talysurf CCI Lite (na obrázku 3.3) je bezdotykový 3D profilometr, který je založen na principu koherenčně rastrovací interferometrie („*coherence scanning interferometry*“⁸). Přístroj je vybaven třemi objektivy Mirau, u nichž je možné zvětšení 10×, 20× a 50×. [27]



Obrázek 3.3: Taylor Hobson Talysurf CCI Lite [28]

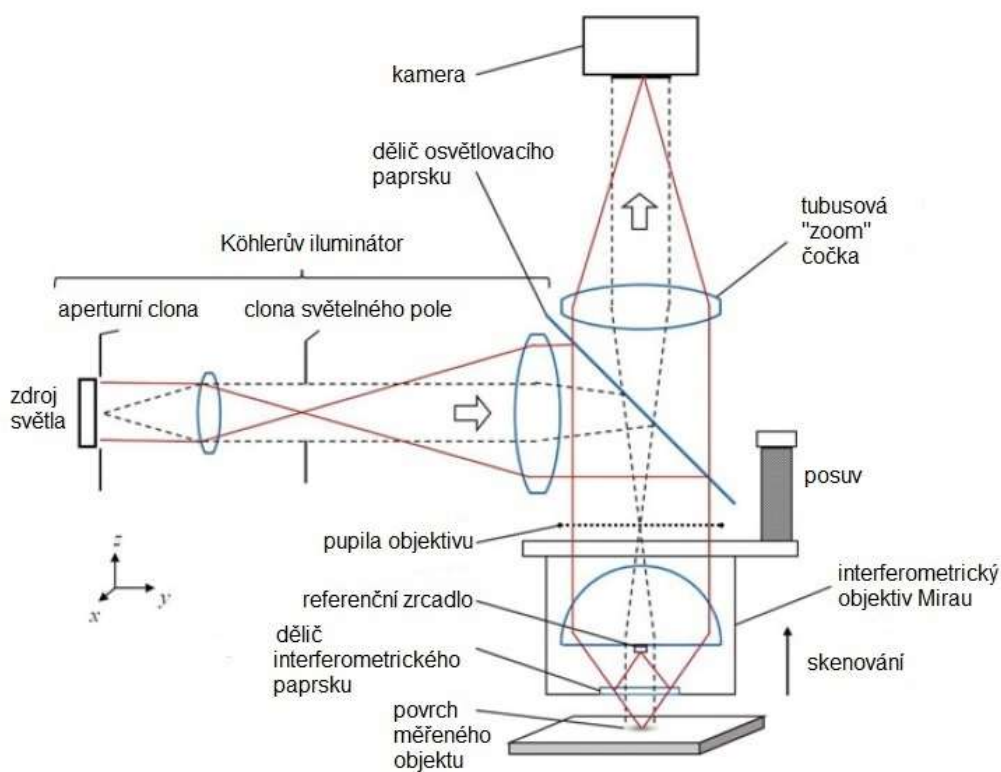
⁸ Koherenční rastrovací interferometrie („*coherence scanning interferometry*“ – CSI), avšak firma Taylor Hobson nazývá přístroj CCI – „*coherence correlation interferometry*“ (koherenčně korelační interferometrie. [26]

Vzorky jsou umísťovány na dvouosý stůl, který je řízen elektronicky. Náklon stolu lze částečně zkorigovat pomocí šroubů situovaných na podstavci. Jako zdroj osvětlení slouží zelené LED světlo. CCD snímač, jenž je použit v přístroji, má rozlišení 1024×1024 bodů. [26]

K seřízení přístroje pro měření slouží software TalySurf CCI, v němž se provede veškeré nastavení pro následné snímání. Naměřená data jsou dále zpracována pomocí softwaru TalyMap, kde lze různě upravovat model povrchu. Umožňuje například výpočetní vyrovnání povrchu, odstranění tvaru, interpolace nenaměřených bodů. Také lze vyhodnotit profilové i plošné parametry textury povrchu. Samozřejmostí je export dat v různých formátech pro další zpracování. [27]

Kalibrace přístroje je prováděna pomocí softwaru Talysurf CCI a lze ji rozdělit na kalibraci výšky stupně, příčnou kalibraci a korekci základny. Kalibrace vertikálních měření je prováděna pomocí stupňovitých standardů. Příčná kalibrace je realizována prostřednictvím etalonu se soustřednými kružnicemi, současně je korigováno zorné pole i rozteč pixelů. Pro ideální provedení měření je vyžadováno odstranění všech chyb, způsobených nepřesnostmi referenčního zrcadla objektivu. Toho je dosaženo korekcí základny pomocí přesného plochého zrcadla. [27]

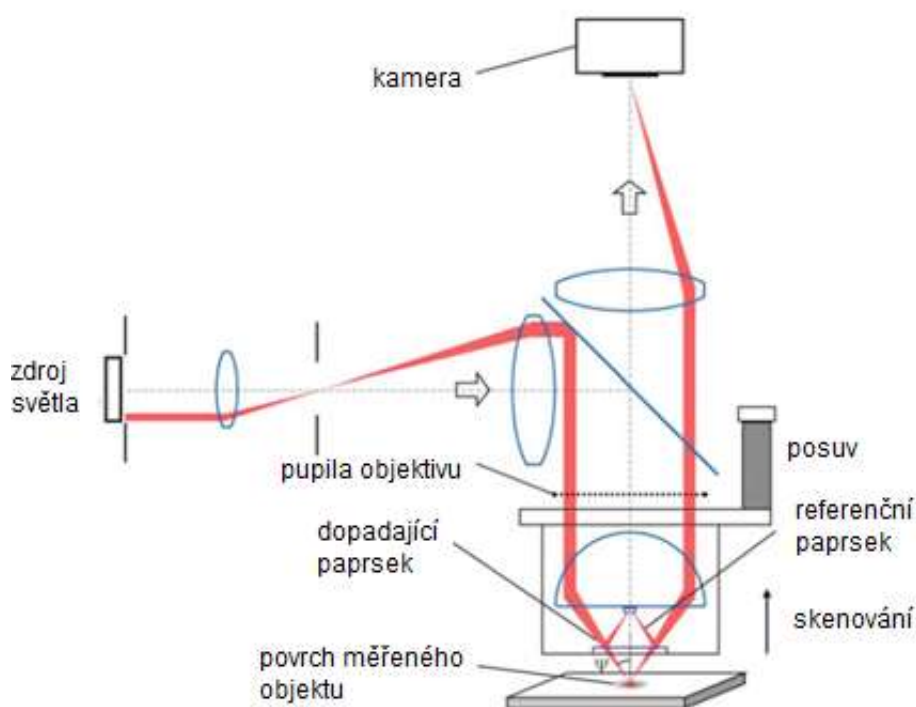
Jak již bylo zmíněno výše Taylor Hobson CCI Lite pracuje na principu koherenční rastrovací interferometrie (obrázek 3.4). Tato technika pro měření textury povrchu je založena na sledování změn viditelnosti interferenčních obrazců v závislosti na změně pozorovací vzdálenosti. [26]



Obrázek 3.4: Sestava koherenčního rastrovacího interferometru [29]

Zdrojem světla při probíhajícím měření může být nekoherentní světlo s širokopásmovým spektrem, prostorovým rozsahem, nebo obojí. Celkový signál je součtem všech nekoherentních interferenčních svazků paprsků procházejících pupilou objektivu a všech paprsků odražených od měřeného objektu a referenčních ploch. [29]

Na obrázku 3.5 lze pozorovat princip šíření paprsku uvnitř koherenčně rastrovacího interferometru.



Obrázek 3.5: Princip šíření paprsku [29]

3.3 Analýza měření

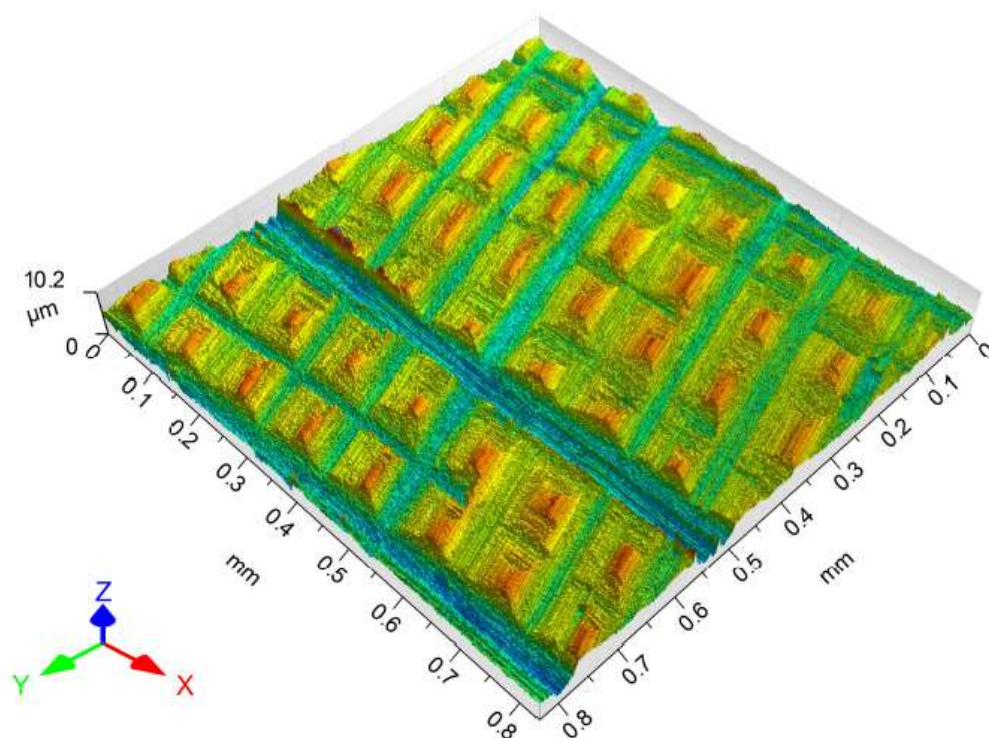
V této části diplomové práce je provedena analýza měřených vzorků pomocí profilových a plošných parametrů textury povrchu. Naměřené vzorky byly zpracovány v programu TalyMap, statistické operace byly simulovány v software Statistica, Matlab a MS Excel.

Měření bylo provedeno na dvou stranách celkem 45 vzorků. Analýza pak vychází ze 7200 hodnot plošných parametrů textury povrchu (40 parametrů, 45 hodnot daného parametru, 2 strany vzorku, 2 výrobní operace) a 1843200 hodnot profilových parametrů textury povrchu (10 parametrů, 45×1024 hodnot profilů daného parametru, 2 strany vzorku, 2 výrobní operace).

V práci bylo vyhodnocováno celkem 10 profilových parametrů textury povrchu a 40 plošných parametrů textury povrchu, které byly popsány v kapitole 1.

Veškeré analýzy jsou uvedené v přílohách. V této kapitole jsou uvedeny pouze demonstrační příklady několika parametrů a dílčí závěry.

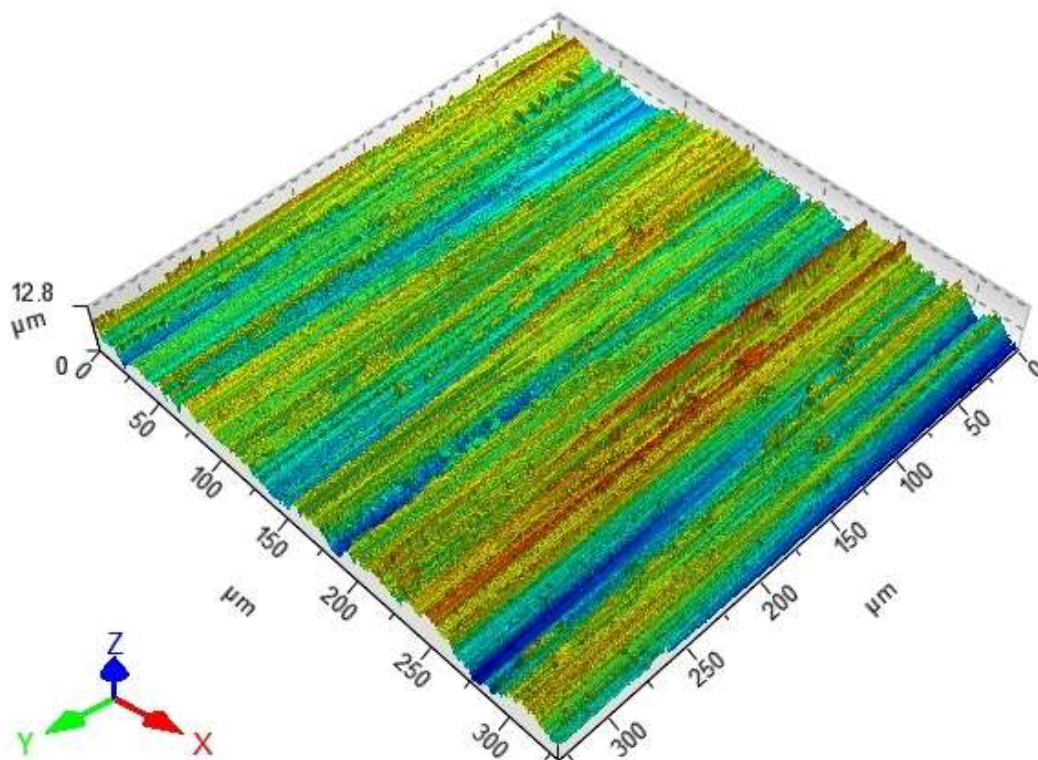
Hodnocený vzorek byl změřen pomocí přístroje TH CCI (popsaný v kapitole 3.2). Nasnímaný povrch byl exportován do software TalyMap, kde vznikl model analyzovaného povrchu. Na obrázcích 3.6 a 3.7 jsou zobrazeny 3D modely vzorků. Na modelu frézovaného vzorku na obrázku 3.6 jsou vidět charakteristické stopy po frézování, stejně jako na modelu broušeného vzorku (obrázek 3.7), kde lze pozorovat stopy broušení. Dále byly doplněny neměřené body a povrch byl vyrovnán. Následně bylo z vyrovnaného povrchu vytvořeno 1024 základních profilů, z nichž jsou vypočteny profilové parametry textury povrchu. Tyto parametry byly vyhodnoceny za použití Gaussova filtru 0,25 mm.



Obrázek 3.6: 3D model frézovaného vzorku

Plošné parametry textury povrchu byly vyhodnoceny obdobným způsobem jako parametry profilové. Po nasnímání měřeného povrchu byly doplněny neměřené body (pro některé parametry je vyžadována spojitá funkce) a z vyrovnaného S-F povrchu byly bez použití filtrů vypočteny plošné parametry textury povrchu.

Vyhodnocené profilové a plošné parametry textury povrchu byly předmětem dalších analýz, které jsou popsány v následujících odstavcích.



Obrázek 3.7: 3D model broušeného vzorku

3.3.1 Základní statistika

Pomocí software Statistica byly vytvořeny histogramy vyhodnocených plošných i profilových parametrů textury povrchu. Počet tříd histogramu byl zvolen dle Sturgesova pravidla, pro plošné parametry textury povrchu o počtu 45 měření na 7 tříd a pro profilové parametry textury povrchu při počtu 46080 hodnot na 17 tříd.

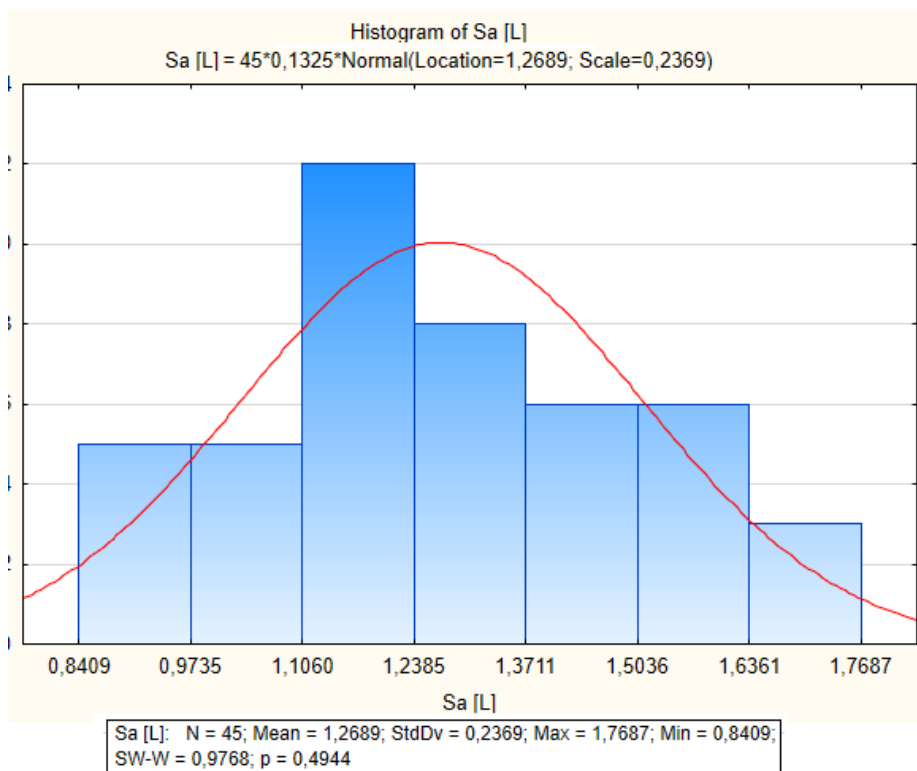
V histogramech je uvedena také popisná statistika dat a testování hypotézy o normálním rozdělení souboru. K testování normality byl použit Shapiro-Wilkův test. Pokud je p-hodnota testu menší než 0,05, se spolehlivostí větší než 95% lze tvrdit, že hodnoty nepocházejí ze základního souboru, jež má normální rozdělení.

Histogramy jednotlivých plošných i profilových parametrů textury povrchu jsou uvedeny v přílohách A a B.

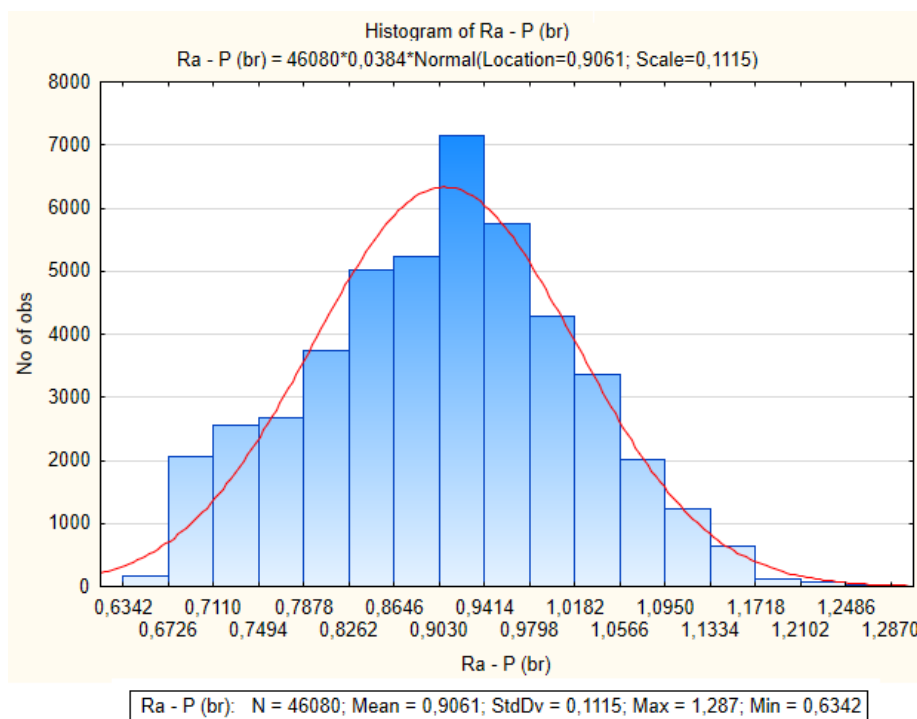
Na obrázku 3.8 je zobrazen histogram hodnot plošného parametru S_a broušeného povrchu. Z popisné statistiky je zde uveden aritmetický průměr měřených hodnot, jejich směrodatná odchylka a také minimální a maximální hodnota. P-hodnota je v tomto případě větší než 0,05 a lze konstatovat se spolehlivostí vyšší než 95%, že hodnoty parametru měřeného vzorku pochází ze souboru s normálním rozdělením, což lze pozorovat i z grafické interpretace.

Histogram hodnot stejného povrchu, avšak profilového parametru R_a je ilustrován na obrázku 3.9. Je zde opět vyobrazena základní popisná statistika. U profilových parametrů textury povrchu nebylo možné provést test normality, protože

jednotlivé profily jsou s největší pravděpodobností korelované, a proto nelze očekávat normalitu dat.



Obrázek 3.8: Histogram hodnot parametru Sa, broušený povrch, levá strana



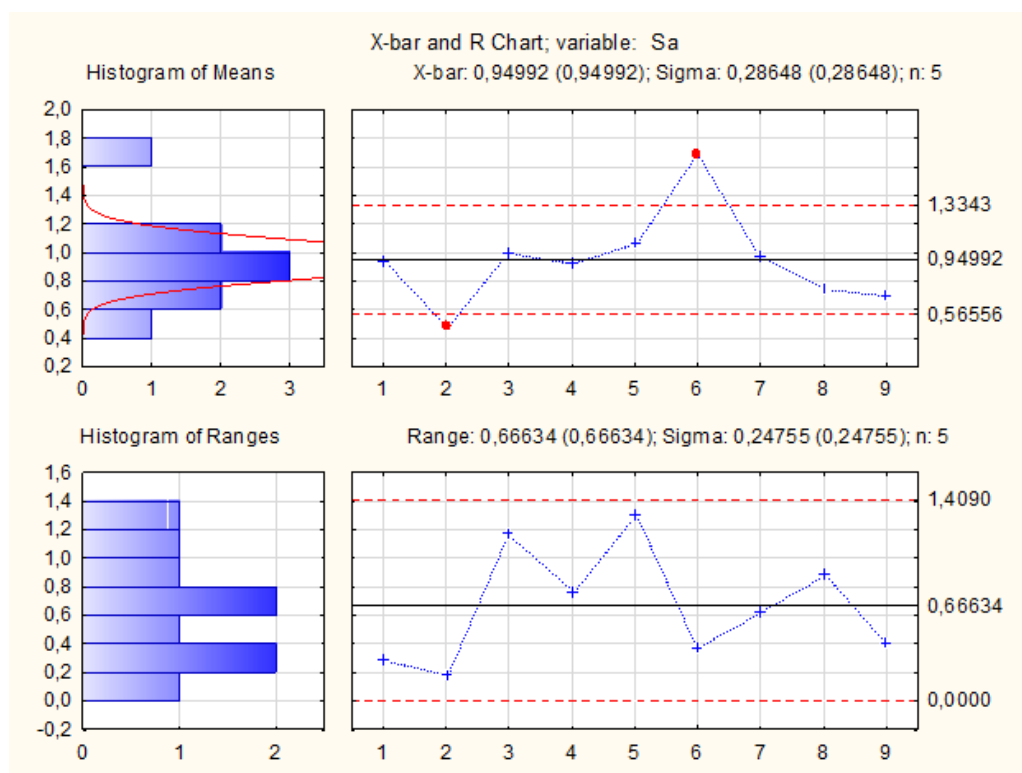
Obrázek 3.9: Histogram hodnot parametru Ra, broušený povrch, pravá strana

Následně bylo pomocí párového t-testu provedeno porovnání hodnot plošných parametrů textury povrchu levých a pravých stran výrobku. U frézovaných povrchů nebyly nalezeny významné rozdíly mezi oběma stranami, tzn. že p-hodnoty byly u všech parametrů vyšší než 0,05. Lze tedy s 95 % spolehlivostí říci, že pravá a levá strana měřeného vzorku se významně neliší. U broušených povrchů byly identifikovány rozdíly v parametrech *Sku* ($p = 0,04$), *Sal* a *Str* ($p = 0,01$). Jedná se o parametr špičatosti, délku autokorelace a poměr stran textury. *Sal* a *Str* patří do skupiny prostorových parametrů a mají společnou definici dle autokorelační funkce, která popisuje korelaci mezi dvěma povrchy - povrchem a tím stejným povrchem posunutým o definovanou vzdálenost. Autokorelační funkce je pravděpodobnou příčinou vzniku významných rozdílů mezi dvěma stranami povrchu. Jednotlivé p-hodnoty provedených t-testů jsou uvedeny v příloze C.

3.3.2 Statistická regulace

Původním plánem byl experiment s větším objemem měřených vzorků, ale z důvodu změn v plánu výroby a následné opožděné výrobě menší série se podařilo nasbírat pouze 9 sad vzorků (po 5 kusech). Proto je statistická regulace pouze ilustrována na těchto 9 podvýběrech.

Regulační diagramy byly vytvořeny pouze v případech, kdy měl soubor sledovaného parametru normální rozdělení. Na obrázku 3.10 je regulační diagram pro parametr *Sa* frézovaného vzorku. V regulačním diagramu lze vidět odlehlou hodnotu sady vzorků, které byly vyrobeny na konci směny. To ovšem ještě nemusí znamenat výchylku v procesu.



Obrázek 3.10: Regulační diagram souboru hodnot parametru *Sa* pro frézovaný povrch, levá strana

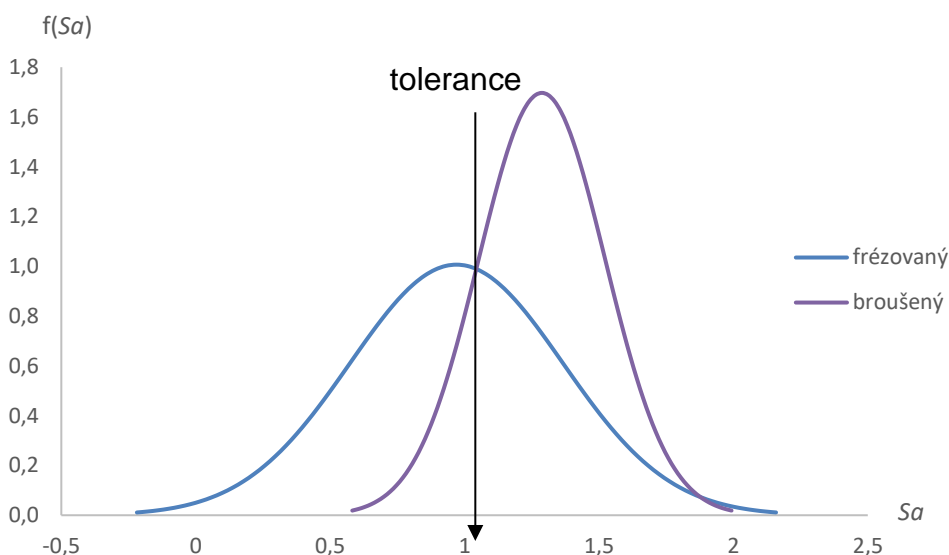
Další regulační diagramy lze nalézt v příloze D. Při pohledu na regulační diagramy je zřejmé, že trend je téměř shodný u všech regulačních diagramů. Různé parametry tedy poskytují podobné informace o vývoji procesu. Pro profilovou metodu nebyly regulační diagramy konstruovány z důvodu neproveditelného testu normality.

3.3.3 Posuzování shody

V oblasti posuzování shody je stále významným problémem správná identifikace funkčních mezí výrobku. Tolerance pro drsnost jsou obvykle voleny dle tabulek pro určitou funkci. Tyto tabulky však mají spíše orientační hodnotu. Z tohoto důvodu jsou v této práci ilustrovány postupy, jak experimentálně zjistit danou toleranci.

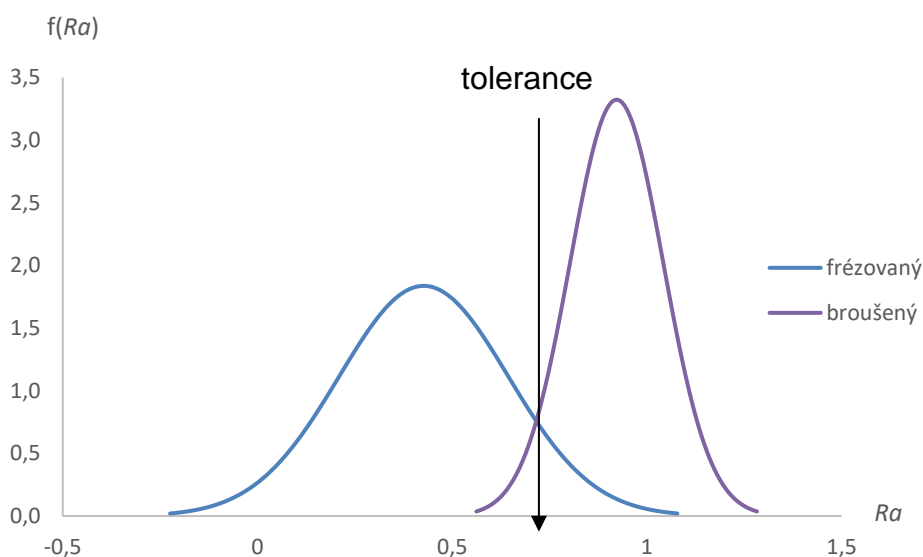
Nejjednodušším způsobem pro zvolení toleranční meze je změření funkčních a nefunkčních výrobků. Z takto změřených dat lze najít hodnotu, která rozděluje oblast funkčních a nefunkčních výrobků. Tento postup je možné ilustrovat pomocí grafu, kde se každému souboru dat přiřadí křivka normálního rozdělení.

Pro zjištění této meze byly vytvořeny grafy normálních rozdělení profilových i plošných parametrů textury povrchu. V grafu 3.1 lze pozorovat, že křivka normálního rozdělení vytvořená z naměřených dat parametru Sa má vyšší hodnoty parametru u broušeného povrchu. Tímto je vyvráceno očekávání, že vyšší hodnoty budou mít data frézovaného povrchu. Grafy normálních rozdělení dalších parametrů jsou uvedeny v příloze E.



Obrázek 3.11: Znárodnění normálního rozdělení parametru Sa

Stejných výsledků je dosaženo i při hodnocení profilovou metodou. Je zřejmé, že broušením se povrch stal „drsnějším“ než byl po frézování.



Obrázek 3.12: Znárodnění normálního rozdělení parametru Ra

Původním plánem bylo stanovení toleranční meze pro rozlišení mezi správně vybroušenými povrchy a frézovanými povrchy s vyššími hodnotami parametrů textury povrchu. Avšak po provedení analýzy a vytvoření grafů normálních rozdělení je zřejmé, že texturu povrchu mají kvalitnější frézované vzorky.

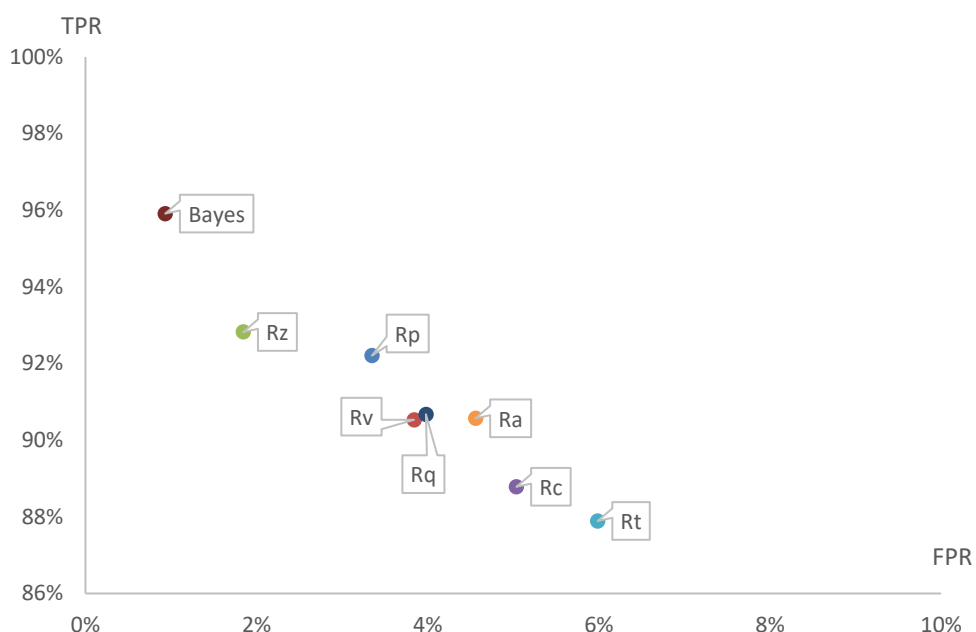
Následující text proto slouží pouze k demonstraci využití různých způsobů klasifikace. Za správné vzorky jsou považovány frézované kusy a za nefunkční výrobky jsou považovány kusy broušené. Výsledky nejsou přímo aplikovatelné na měřené výrobek. U něj je nutné nejprve zanalyzovat technologii výroby a vztah textury povrchu a funkce.

Pro aplikaci jednoduché binární klasifikace nalezením toleranční hodnoty v grafu byly sestaveny grafy normálních rozdělení hodnot parametrů z broušených a frézovaných povrchů. Toleranční hodnoty byly určeny z průsečíku zobrazených Gaussových křivek. Schopnost těchto tolerančních mezí rozlišit různé třídy povrchu byla posouzena pomocí ukazatelů TP, TN, FP a FN, které jsou definované v kapitole 2.2.2. Následně byla vypočtena přesnost této klasifikace pro jednotlivé profilové i plošné parametry textury povrchu. U některých grafů hodnot parametrů textury povrchu nebylo možné nalezení hranice tolerance, protože se křivky normálního rozdělení přetínaly na dvou místech. Tyto parametry textury povrchu nebyly podrobeny analýze.

Přesnost klasifikace pomocí toleranční meze se pohybuje u profilových parametrů textury povrchu přibližně v rozmezí 93 až 96 %, u plošných parametrů textury povrchu v rozmezí 60 až 98 %, viz příloha F. Taková přesnost může být pro některé aplikace dostačující.

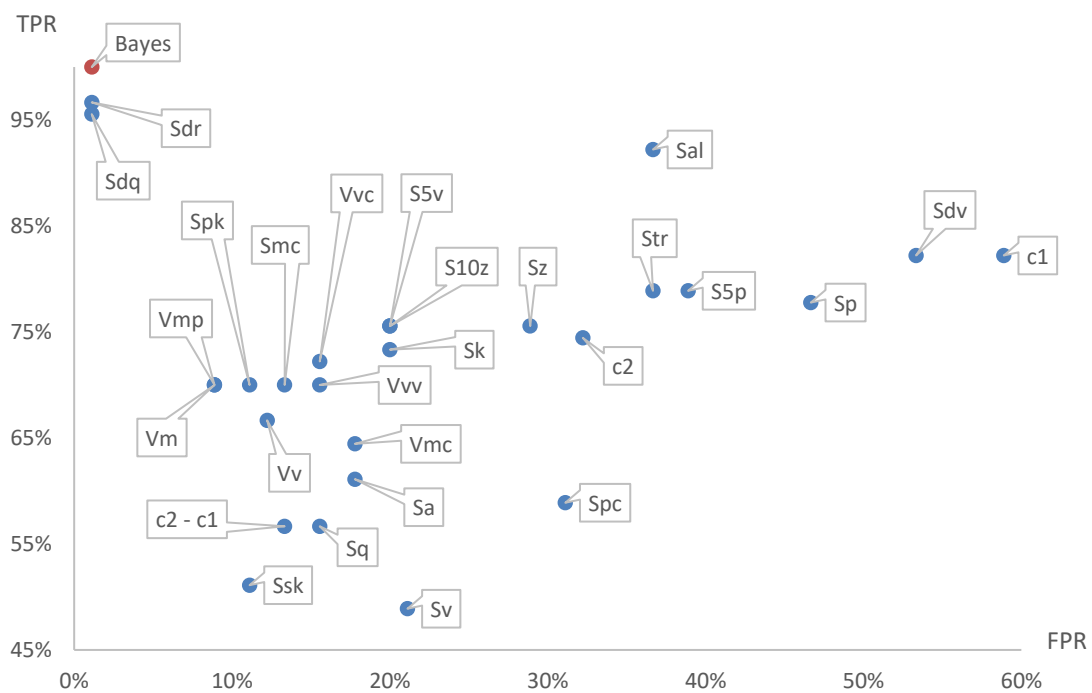
V případě, že je nutné další zvýšení přesnosti, lze využít pokročilejších metod statistické klasifikace. Pro demonstraci byla využita metoda naivní bayesovské klasifikace. Do vyhodnocení touto metodou byly zahrnuty všechny parametry, čímž byla dosažena výrazně vyšší přesnost. Ta u profilových parametrů byla 97,5 % a u plošných parametrů dosáhla až 99,4 %.

Grafu na obrázku 3.13 znázorňuje závislost TPR (citlivosti) na FPR (doplňek specificity). Lze pozorovat, že nejpřesnějších výsledků je dosaženo při použití naivní bayesovské klasifikace (97,5 %), která již zahrnuje vybrané profilové parametry. Ideálním případem by bylo dosažení 100 % citlivosti při nulovém FPR. Z grafu lze vyčíst, že v tomto případě rozložení dat, dosahují výškové parametry Rz , Rp a Rv značně vyšších přesností (93 až 95 %) než průměrné odchylky Ra a Rq (93 %). Nejnižší přesnosti z výběru těchto parametrů je dosaženo u parametrů Rc a Rt (90 až 92 %).



Obrázek 3.13: Znázornění závislosti hodnot TPR a FPR pro profilové parametry

Stejný typ grafu byl vytvořen pro hodnoty plošných parametrů textury povrchu (graf na obrázku 3.14). Klasifikace dle Bayese opět dokazuje nejpřesnějších výsledků (99,5 %). U ostatních skupin plošných parametrů textury povrchu nelze žádnou ze skupin označit za obecně přesnější. Avšak skupina hybridních parametrů je vhodným parametrem pro klasifikaci, její přesnost je přibližně 97 %. Přesnost kolem 70 až 80 % byla detekována u funkčních a souvisejících parametrů. Nejnižší přesnost klasifikace byla zjištěna u vyjmenovaných parametrů prvků a výškových parametrů (60 až 70 %).



Obrázek 3.14: Znáornění závislosti hodnot TPR a FPR pro plošné parametry

4 Doporučení pro praxi

V současné době přibývá množství měřicích přístrojů, které dokáží snímat povrch a hodnotit texturu povrchu. Jejich využívání se však v praxi omezuje pouze na několik tradičně zavedených parametrů textury povrchu. Většina podniků kontroluje jen velmi malé množství profilových parametrů jako jsou R_a případně R_z .

Výsledkem toho je, že specifikace textury povrchu výrobku mívá jen povrchní vztah k funkci. Požadavky na povrchy nevycházejí ze znalostí o fungování konkrétního výrobku, nýbrž z obecně dostupných tabulek doporučovaných hodnot.

Tabulky doporučovaných hodnot parametrů textury povrchu nemusí být adekvátní základ specifikace pro každou aplikaci. Všude, kde je textura povrchu důležitá pro správnou funkci, je vhodné funkční meze určit experimentálně.

Pro výrobky, u kterých je rozdíl mezi funkční a nefunkční texturou povrchu dostatečně velký, lze jako specifikaci použít hodnotu vybraného parametru textury povrchu, u kterého lze tento rozdíl zřetelně pozorovat. Stanovení konkrétní hodnoty je možné provést například graficky, viz obrázky 3.11 a 3.12.

U povrchu, kde rozdíl mezi funkční a nefunkční texturou povrchu není zřetelný z hodnoty žádného z parametrů, lze funkční a nefunkční povrchy úspěšně rozlišovat pomocí pokročilejších metod statistické klasifikace. Jak ukazují výsledky předešlé kapitoly, použití statistické klasifikace vede k významnému zvýšení přesnosti třídění na shodné a neshodné výrobky.

Úspěšné použití výše zmíněných postupů je založeno na zpracování velkého množství dat. Protože je měření textury povrchu časově a personálně poměrně náročné, je vhodné sběr dat provádět současně s běžnou pravidelnou kontrolou zkoumaných součástí. Ta by měla být doplněna o hodnocení dalších parametrů textury povrchu a případně i informaci o funkčních vlastnostech výrobku. Po dostatečně dlouhé době sledování procesu lze z takových dat úspěšně určit skutečné funkční meze textury povrchu pro daný výrobek.

Z analýz klasifikace pomocí profilových a plošných parametrů je zřejmé, že lze použitím obou druhů parametrů dosáhnout vysokou úroveň přesnosti kontroly. Pro mnohé aplikace proto nebude nezbytně nutné investovat do měřicí techniky například optických 3D profilometrů.

Tyto metody určování tolerance a posuzování shody se dají snadno integrovat do výrobních a kontrolních systémů navržených v souladu s principy průmyslu 4.0. Dokáží totiž efektivně využívat automatizované systémy měření a sběru dat. Hlubší integrace do inteligentních systémů může v budoucnu zahrnovat pokročilejší metody umělé inteligence jako jsou například neuronové sítě.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce řeší problematiku využití textury povrchu pro posuzování shody a řízení procesu s využitím parametrů textury povrchu.

Prvním cílem práce bylo vytvořit přehled parametrů textury povrchu. Tento cíl je splněn v kapitole 1, kde jsou popsány profilové a plošné parametry textury povrchu. Při tvorbě této kapitoly byly využívány normy řady ISO GPS. Vzhledem k nízké jazykové úrovni českého překladu norem o plošné metodě hodnocení povrchu byly názvy a definice plošných parametrů opraveny s využitím původních anglických textů a další literatury. Tím bylo dosaženo zlepšení srozumitelnosti a použitelnosti těchto parametrů v české průmyslové praxi. V této kapitole jsou také rozebrány postupy hodnocení textury povrchu profilovou a plošnou metodou.

Druhým a třetím cílem práce bylo vytvoření přehledu metod posuzování shody a řízení procesu s využitím parametrů textury povrchu. To je předmětem kapitoly 2. V dílčích podkapitolách jsou objasněny postupy posuzování shody, řízení procesu a metody určování tolerančních mezí. V oblasti posuzování shody jsou vysvětleny způsoby prokázání shody či neshody se specifikací a také specifika posuzování shody textury povrchu. V podkapitole zaměřené na řízení procesu jsou popsány vhodné metody statistické regulace procesu. Součástí statistické regulace procesu je popis regulačních diagramů, které se při tomto procesu využívají. V této kapitole lze nalézt také popis výpočtu způsobilosti procesu. Poslední podkapitola je zaměřena na určování tolerančních mezí pomocí metod klasifikace a hodnocení kvality klasifikátorů. Jsou zde rozebrány některé metody klasifikace, které jsou předmětem pozdějších analýz. Tímto je splněn druhý a třetí cíl práce.

Čtvrtým cílem práce byla aplikace na průmyslový výrobek. Tento cíl byl splněn ve třetí kapitole, kde je provedena analýza výsledků měření a vyhodnocení plošných a profilových parametrů textury povrchu na sériově vyráběných dílech. Na úvod kapitoly jsou popsány měřené vzorky a metodika jejich měření. Dále je zde popsán použitý měřicí přístroj.

Hlavní část kapitoly tvoří statistická analýza naměřených dat. V části základní statistiky jsou vytvořeny histogramy dat parametrů textury povrchu. Z parametrů, které pochází ze souboru hodnot s normálním rozdělením jsou vytvořeny regulační diagramy. Na základě plošných parametrů byl proveden párový t-test za účelem odhalení případných rozdílů mezi povrchy na protilehlých stranách výrobku. Mezi jednotlivými stranami nebyly nalezeny významné rozdíly. V další části kapitoly je demonstrováno postup určování tolerance pro posuzování shody. To je provedeno na základě hodnot jednotlivých parametrů a také pomocí naivní bayesovské klasifikace využívající všechny vyhodnocené parametry textury povrchu.

Výsledky klasifikace jsou objasněny v 3.3.3. Pro třídění pomocí mezních hodnot parametrů i naivní bayesovské klasifikace byly vypočteny ukazatele přesnosti klasifikace. U profilových parametrů se hodnota přesnosti určená pomocí binární klasifikace třídění dvou vzorků pohybuje v rozmezí 93 až 96 %. Přesnost klasifikace

profilových parametrů vytvořená na základě naivní bayesovské klasifikace dosáhla až 97,5 %. Pro určení přesnosti klasifikace u plošných parametrů textury povrchu byly využity data o téměř 30 parametrech. Přesnost jejich třídění se pohybuje v rozmezí 64 až 98 %. Při aplikaci naivní bayesovské klasifikace byl výsledek přesnosti 99,4 %. Z provedené analýzy je vidět, že klasifikace dle Bayese je viditelně přesnější než klasifikace pomocí libovolného parametru textury povrchu.

Ve čtvrté kapitole je splněn závěrečný cíl práce, kterým jsou doporučení pro průmyslovou praxi. Hodnocení textury povrchu v praxi lze zlepšit experimentálním zjišťováním tolerančních mezí a také nasazením pokročilejších metod statistické klasifikace. Tyto přístupy lze úspěšně implementovat do výrobních a kontrolních systémů založených na myšlenkách průmyslu 4.0.

Na tuto práci lze navázat podrobnějším ověřením správnosti prezentovaných postupů. Další zkoumání si zaslouží aplikace dalších metod statistické klasifikace jako je například boosting či tvorba neuronových sítí. V neposlední řadě by bylo možné pokračovat sestavením integrovaného výrobního systému, který by v této práci představené metody využíval pro online řízení procesu a posuzování shody výrobků.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ČSN EN ISO 8785. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Nedokonalosti povrchu - Termíny, definice a parametry*. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [2] ČSN EN ISO 25178-3. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Textura povrchu: Plocha - Část 3: Specifikace operátorů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví., 2013.
- [3] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [4] MURALIKRISHNAN, Bala. a J. RAJA. *Computational surface and roundness metrology*. New York: Springer, 2009. ISBN 978-1-84800-296-8.
- [5] BUMBÁLEK, Bohumil, Vladimír ODVODY a Bohuslav OŠŤÁDAL. *Drsnost povrchu*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989.
- [6] ČSN EN ISO 4288. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- [7] ISO 25178-2. *Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Areal - Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters*. Switzerland: International Organization for Standardization, 2012.
- [8] JANKOVÝCH, Róbert a Bohumil BUMBÁLEK. Výškové parametry textury povrchu. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2014, (11) [cit. 2018-03-19]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vyskove-parametry-textury-povrchu.html>
- [9] FILIPOVA, Natalija a Janis RUDZITIS. Surface Texture Parameters Application for Nanocoatings. *Transport* [online]. 2013, 35, 118-124 [cit. 2018-02-14]. ISSN 14078015.
- [10] LEACH, Richard. *Characterisation of areal surface texture*. Heidelberg: Springer, 2013. ISBN 978-3-642-36458-7.
- [11] ISO/WD 25178-2. *Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Areal - Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters*. Switzerland, 2017.
- [12] ISO 25178-3. *Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Areal - Part 3: Specification operators*. Switzerland: International Organization for Standardization, 2012.

- [13] ISO 14253-1. *Geometrical product specifications (GPS) — Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment — Part 1: Decision rules for proving conformity or nonconformity with specifications*. Switzerland, 2013.
- [14] ČSN EN ISO 14253-1. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Zkouška obrobků a měřidel měřením - Část 1: Pravidla rozhodování pro prokázání shody nebo neshody se specifikacemi*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví., 2014.
- [15] PQM. *SPC* [online]. Ostrava, 2017 [cit. 2018-04-20].
- [16] JAROŠOVÁ, Eva a Darja NOSKIEVIČOVÁ. *Pokročilejší metody statistické regulace procesu*. Praha. Grada Publishing, 2015. ISBN 978-80-247-5355-3.
- [17] MONTGOMERY, Douglas. *Introduction to statistical quality control*. 6th ed. Hoboken, N.J.: Wiley, 2009. ISBN 978-0-470-16992-6.
- [18] MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ. *Kompendium statistického zpracování dat*. Vyd. 1. Praha: Academia, 2002. ISBN 80-200-1008-4.
- [19] KOCOUREK, Vladimír. *Kvalita v laboratorní a kontrolní praxi: Statistické nástroje pro řízení kvality, SPC* [online]. Praha: VŠCHT, 2017 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: https://web.vscht.cz/~kocourev/files/QA_SPC-print.pdf
- [20] JANKOVÝCH, Róbert. *Statistická regulace měřením*. Brno, 2017. [přednáška]. VUT.
- [21] PLURA, Jiří. *Plánování a neustálé zlepšování jakosti*. Vyd. 1. Praha: Computer Press, 2001. Business books (Computer Press). ISBN 80-7226-543-1.
- [22] HUTYRA, Milan. *Management jakosti* [online]. První. Ostrava: VŠB – TUO, 2007, s. 209 [cit. 2018-04-28]. ISBN 978-80-248-1484-1.
- [23] ČSN ISO 8258. *Shewhartovy regulační diagramy*. Praha: Český normalizační institut, 1994.
- [24] JANKOVÝCH, Róbert. *Způsobilost procesů*. Brno, 2017. [přednáška]. VUT.
- [25] KUPKA, Karel. *Statistické řízení jakosti: interaktivní analýza a interpretace dat pro řízení jakosti a ekonomiku*. Pardubice: TriloByte, 1997. ISBN 80-238-1818-X.
- [26] HARČARÍK, Matej. *Charakteristiky textury povrchu a jejich využití pro hodnocení kvality výrobků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, dosud nepublikováno. Dizertační práce. Vedoucí práce Doc. Ing. Róbert Jankových, CSc.
- [27] TAYLOR HOBSON, . *Talysurf CCI Lite - bezdotykový 3D profilometr*. [pdf], 2008, 8s.

- [28] ŠPAČKOVÁ, Magda. *Hodnocení drsnosti povrchu kontaktní a bezkontaktní metodou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. Bakalářská práce. Vedoucí práce Doc. Ing. Róbert Jankových, CSc..
- [29] LEACH, Richard, ed. *Optical measurement of surface topography*. Berlin: Springer, 2011. ISBN 978-3-642-12011-4.
- [30] WHITEHOUSE, David. *Surfaces and their measurement*. London: HPS, 2002. ISBN ISBN 1 9039 9601 5.
- [31] HONZÍK, Petr. *Bayesovské učení*. [přednáška]. Brno, 2014. Dostupné také z: http://midas.uamt.feec.vutbr.cz/STU/Lectures/09_Bayesovske_uceni.pdf
- [32] WHITEHOUSE, David. *Handbook of surface and nanometrology*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2011. ISBN 978-1-4200-8201-2.

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

| | |
|---|----|
| Obrázek 1.1: Složky textury povrchu | 18 |
| Obrázek 1.2: Prvek profilu | 19 |
| Obrázek 1.3: Znázornění parametrů R_p , R_v , R_z a R_{sm} | 21 |
| Obrázek 1.4: Znázornění základních pojmů plošné textury povrchu (upraveno dle [8]) | 22 |
| Obrázek 1.5: Schéma rozdělení plošných parametrů textury povrchu (upraveno dle [9]) | 22 |
| Obrázek 1.6: Význam autokorelační délky v polárních souřadnicích (upr. dle [7]) | 26 |
| Obrázek 1.7: Histogram výšek povrchu | 28 |
| Obrázek 1.8: Křivka materiálového poměru | 28 |
| Obrázek 1.9: Znázornění parametrů S_k , S_{pk} a S_{vk} (upr. dle [11]) | 30 |
| Obrázek 1.10: Pravděpodobnostní křivka materiálového poměru (upr. dle [7]) | 31 |
| Obrázek 1.11: Prázdný objem definovaný materiálovým poměrem m_r [10] | 32 |
| Obrázek 1.12: Objem materiálu definovaný materiálovým poměrem m_r [10] | 32 |
| Obrázek 1.13: Význam objemových parametrů na křivce materiálového poměru [10] | 33 |
| Obrázek 1.14: Znázornění parametru S_{xp} [10] | 34 |
| Obrázek 1.15: Znázornění směru textury frézovaného povrchu | 35 |
| Obrázek 1.16: Znázornění definovaných vrchů z Wolfova pročištění [11] | 36 |
| Obrázek 2.1: Schéma kompletního výsledku měření y' (upraveno dle [14]) | 39 |
| Obrázek 2.2: Schéma pole shody a neshody (upraveno dle [14]) | 40 |
| Obrázek 2.3: Typický regulační diagram | 41 |
| Obrázek 2.4: Znázornění ± 3 sigma | 42 |
| Obrázek 2.5: Data rozdělena dle Gaussovy křivky [15] | 43 |
| Obrázek 2.6: Ilustrace TNR, FPR, TPR a FNR (upr. dle [10]) | 50 |
| Obrázek 3.1: Fotografie měřeného vzorku (po operaci frézování) | 53 |
| Obrázek 3.2: Fotografie měřeného vzorku (po operaci broušení) | 53 |
| Obrázek 3.3: Taylor Hobson Talysurf CCI Lite [28] | 54 |
| Obrázek 3.4: Sestava koherenčního rastrovacího interferometru [29] | 55 |
| Obrázek 3.5: Princip šíření paprsku [29] | 56 |
| Obrázek 3.6: 3D model frézovaného vzorku | 57 |

| | |
|---|----|
| Obrázek 3.7: 3D model broušeného vzorku..... | 58 |
| Obrázek 3.8: Histogram hodnot parametru Sa, broušený povrch, levá strana..... | 59 |
| Obrázek 3.9: Histogram hodnot parametru Ra, broušený povrch, pravá strana..... | 59 |
| Obrázek 3.10: Regulační diagram souboru hodnot parametru Sa pro frézovaný povrch, levá strana | 60 |
| Obrázek 3.11: Znázornění normálního rozdělení parametru Sa | 61 |
| Obrázek 3.12: Znázornění normálního rozdělení parametru Ra..... | 62 |
| Obrázek 3.13: Znázornění závislosti hodnot TPR a FPR pro profilové parametry.... | 63 |
| Obrázek 3.14: Znázornění závislosti hodnot TPR a FPR pro plošné parametry..... | 64 |
| | |
| Tabulka 1.1: Vybrané profilové parametry textury povrchu | 20 |
| Tabulka 1.2: Plošné výškové parametry textury povrchu | 23 |
| Tabulka 1.3: Prostorové plošné parametry textury povrchu | 25 |
| Tabulka 1.4: Hybridní plošné parametry textury povrchu..... | 26 |
| Tabulka 1.5: Funkční a související plošné parametry textury povrchu..... | 27 |
| Tabulka 1.6: Vyjmenované parametry prvků textury povrchu | 36 |
| Tabulka 2.1: Testy vymežitelných příčin (upraveno dle [23]) | 44 |

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| | |
|-----------------|---|
| A_2, D_3, D_4 | koeficient závislý na rozsahu podskupiny |
| CCI | <i>coherence correlation interferometry</i> , koherenčně rastrovací interferometrie |
| CL | <i>central line</i> , centrální přímka |
| C_p, C_{pk} | <i>process capability index</i> , index způsobilosti procesu |
| FN | <i>false negative</i> |
| FNR | <i>false negative rate</i> |
| FP | <i>false positive</i> |
| FPR | <i>false positive rate</i> |
| k | koeficient rozšíření |
| l | počet podskupin |
| LCL | <i>lower control limit</i> , dolní regulační mez |
| ln | vyhodnocovaná délka |
| lr | základní délka (cut-off) |
| LSL | <i>lower specification limit</i> , dolní mez specifikace |
| R | rozpětí |
| \bar{R} | průměrná hodnota variačního rozpětí v podskupinách |
| Ra | průměrná aritmetická odchylka posuzovaného profilu |
| Rc | průměrná výška prvků |
| R_k | klouzavé rozpětí |
| Rku | špičatost posuzovaného profilu |
| Rp | největší výška výstupku profilu |
| Rq | průměrná kvadratická odchylka posuzovaného profilu |
| Rsk | šikmost posuzovaného profilu |
| RSm | průměrná šířka prvků profilu |
| Rt | celková výška profilu |
| Rv | největší hloubka prohlubně profilu |
| Rz | největší výška profilu |
| S_{10z} | výška 10 bodů povrchu |
| S_{5p} | výška 5 vrcholů |

| | |
|-------------------|---|
| <i>S5v</i> | hloubka 5 prohlubní |
| <i>Sa</i> | průměrná aritmetická výška posuzovaného povrchu |
| <i>Sal</i> | délka autokorelace |
| <i>Sda</i> | střední plocha údolí |
| <i>Sdc</i> | výškový rozdíl materiálových poměrů |
| <i>Sdq</i> | střední kvadratický sklon posuzovaného povrchu |
| <i>Sdr</i> | rozvinutý poměr plochy rozhraní posuzovaného povrchu |
| <i>Sdv</i> | střední objem údolí |
| <i>Sha</i> | střední plocha vrchů |
| <i>Shv</i> | střední objem vrchů |
| <i>Sk</i> | výška jádra |
| <i>Sku</i> | špičatost posuzovaného povrchu |
| <i>Smc (mr)</i> | obrácený plošný materiálový poměr posuzovaného povrchu |
| <i>Smq</i> | materiálový poměr |
| <i>Smr (c)</i> | plošný materiálový poměr posuzovaného povrchu |
| <i>Smr1, Smr2</i> | materiálový poměr |
| <i>Sp</i> | maximální výška vrcholu posuzovaného povrchu |
| <i>Spc</i> | aritmetický průměr zakřivení vrcholů |
| <i>SPC</i> | <i>statistical process control</i> , statistická regulace procesu |
| <i>Spd</i> | hustota vrcholů |
| <i>Spk</i> | redukováná výška vrcholů |
| <i>Spq</i> | střední kvadratická odchylka plošiny |
| <i>Sq</i> | průměrná kvadratická výška posuzovaného povrchu |
| <i>Ssk</i> | šikmost posuzovaného povrchu |
| <i>Std</i> | směr textury posuzovaného povrchu |
| <i>Str</i> | poměr stran textury |
| <i>Sv</i> | maximální hloubka dna posuzovaného povrchu |
| <i>Svk</i> | redukováná hloubka údolí |
| <i>Svq</i> | střední kvadratická odchylka údolí |
| <i>Sxp</i> | extrémní výška vrcholu |
| <i>Sz</i> | maximální výška posuzovaného povrchu |
| <i>TN</i> | <i>true negative</i> |

| | |
|-----------------------|--|
| <i>TNR</i> | <i>true negative rate</i> , specificita |
| <i>TP</i> | <i>true positive</i> , |
| <i>TPR</i> | <i>true positive rate</i> , citlivost |
| <i>U</i> | rozšířená nejistota měření |
| <i>u_c</i> | kombinovaná standardní nejistota měření |
| <i>UCL</i> | <i>upper control limit</i> , horní regulační mez |
| <i>USL</i> | <i>upper specification limit</i> , horní mez specifikace |
| <i>V_m</i> | objem materiálu |
| <i>V_{mc}</i> | objem materiálu jádra posuzovaného povrchu |
| <i>V_{mp}</i> | objem materiálu vrchů posuzovaného povrchu |
| <i>V_v</i> | prázdný objem |
| <i>V_{vc}</i> | prázdný objem jádra posuzovaného povrchu |
| <i>V_{vv}</i> | prázdný objem údolí posuzovaného povrchu |
| <i>x_i</i> | individuální hodnoty |
| <i>x_s</i> | šířka prvku profilu |
| \bar{x} | aritmetický průměr |
| \tilde{x} | medián |
| $\bar{\bar{x}}$ | průměrná hodnota průměru v podskupinách |
| <i>y</i> | výsledek měření |
| <i>y'</i> | kompletní výsledek měření |
| <i>Z_p</i> | výška výstupku profilu |
| <i>Z_t</i> | výška prvku profilu |
| <i>Z_v</i> | výška prohlubně profilu |
| μ | střední hodnota |
| σ, s | směrodatná odchylka |
| σ^2 | rozptyl |

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha A** Histogramy hodnot plošných parametrů textury povrchu (elektronická příloha)
- Příloha B** Histogramy hodnot profilových parametrů textury povrchu (elektronická příloha)
- Příloha C** Výsledky t-testu plošných parametrů textury povrchu (elektronická příloha)
- Příloha D** Regulační diagramy hodnot plošných parametrů textury povrchu (elektronická příloha)
- Příloha E** Znázornění normálního rozdělení plošných a profilových parametrů textury povrchu (elektronická příloha)
- Příloha F** Vypočtené hodnoty parametrů klasifikace a její přesnost (elektronická příloha)