



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

HODNOCENÍ PROFILOVÝCH PARAMETRŮ TEXTURY POVRCHU A POSOUZENÍ SHODY SE SPECIFIKACÍ NA VÝKRESE

EVALUATION OF SURFACE TEXTURE PROFILE PARAMETERS AND VERIFYING OF CONFORMITY WITH
THE SPECIFICATION IN THE DRAWING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Eva Houdková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vendula Sámelová, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Studentka: **Eva Houdková**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Vendula Sámelová, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.1111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Hodnocení profilových parametrů textury povrchu a posouzení shody se specifikací na výkrese

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Dodržení předepsané textury povrchu má vliv nejen na funkci výrobku, ale také na ekonomiku výroby. Nedodržení požadované textury povrchu bývá často předmětem sporu mezi dodavatelem a zákazníkem, a k tomu slouží metody posouzení shody se specifikací na výkrese podle ČSN EN ISO 14253. Tyto metody je třeba aplikovat na všechny požadavky v systému ISO GPS, včetně textury povrchu, a to v současnosti neexistuje. Hlavním úkolem je tedy návrh a posouzení možnosti hodnocení parametrů textury povrchu se zohledněním nejistot při měření, v souladu se systémem ISO GPS. Součástí řešení bude také vlastní změření vzorků na kontaktním profilometru.

Cíle bakalářské práce:

Současný stav řešené problematiky v oblasti hodnocení textury povrchu profilovou metodou.
Systémový rozbor problematiky.
Návrh řešení a jeho zdůvodnění.
Plánování experimentu a vlastní realizace měření kontaktním profilometrem.
Statistické zpracování a vyhodnocení výsledků měření.
Diskuse výsledků, vyvození vlastních závěrů a doporučení pro další rozvoj.

Seznam doporučené literatury:

CURTIS, Mark A. and Francis T. FARAGO. Handbook of dimensional measurement. Fifth edition. South Norwalk: Industrial Press, 2014. ISBN 978-0-8311-3465-5.

WHITEHOUSE, D. J. Surfaces and their measurement. London: Kogan Page Science, 2004, c2002. ISBN 9781903996607.

ČSN EN ISO 21920-1. Geometrická specifikace produktu (GPS) - Struktura povrchu: Profil – Část 1: Indikace struktury povrchu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2022, 64 s. Třídící znak 014457.

ČSN EN ISO 21920-2. Geometrická specifikace produktu (GPS) - Struktura povrchu: Profil – Část 2: Termíny, definice a parametry struktury povrchu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2022, 92 s. Třídící znak 014457.

ČSN EN ISO 21920-3. Geometrická specifikace produktu (GPS) - Struktura povrchu: Profil – Část 3: Operátory specifikace. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2022, 44 s. Třídící znak 014457.

ČSN EN ISO 14253-1. Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Zkoušení obrobků a měřidel měřením - Část 1: Pravidla rozhodování pro prokázání shody nebo neshody se specifikacemi. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2018, 36 s. Třídící znak 014100.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

V první části tato práce zkoumá současný stav poznání v oblasti textury povrchu a metod jejího hodnocení. Dále se věnuje problematice způsobu hodnocení textury povrchu profilovou metodou, včetně zohlednění nejistot měření. Následně je zaměřena na návrh řešení dané problematiky. V druhé části práce je realizováno měření vzorků kontaktním profilometrem a jsou vypočteny hodnoty profilových parametrů v programu TalyProfile Lite. Poté bylo navržené řešení aplikováno na naměřené hodnoty střední aritmetické výšky profilu drsnosti. Tento parametr byl vyhodnocen dle návrhu kombinace norem ČSN EN ISO 4288 a ČSN EN ISO 14253-1. Vyhodnocené výsledky byly poté porovnány i s případem, kdy byl povrch vyhodnocován pouze podle normy ČSN EN ISO 4288. Díky porovnání bylo možné dojít k závěru, že metoda vyhodnocování podle ČSN EN ISO 4288 je tolerantnější, než vyhodnocování se zohledněním obou norem a tím i nejistot měření.

ABSTRACT

The first part of this thesis investigates current state of the art in the field of surface texture and methods of its evaluation. It also deals with the issue of evaluating surface texture using profile method, including consideration of measurement uncertainties. Subsequently, it is focused on proposing solution of given issue. In the second part of the thesis samples are being measured by contact profilometer and profile parameters values are calculated in the program TalyProfile Lite. The proposed solution was then applied to the measured values of the mean arithmetic height of the roughness profile. This parameter was evaluated according to the proposed combination of standards ČSN EN ISO 4288 and ČSN EN ISO 14 253-1. Evaluated results were then compared with the case where the surface was evaluated only according to the ČSN EN ISO 4288 standard. Thanks to the comparison, it was possible to conclude that the evaluation method according to ČSN EN ISO 4288 is more tolerant than evaluation considering both standards and thus measurement uncertainties.

KLÍČOVÁ SLOVA

Posouzení shody se specifikací, nejistoty měření, textura povrchu

KEYWORDS

Assessment of conformity with specification, measurement uncertainties, surface texture

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HOUDKOVÁ, Eva. *Hodnocení profilových parametrů textury povrchu a posouzení shody se specifikací na výkrese*. Brno, 2024. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157887>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Vendula Sámelová.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucí práce Ing. Vendule Sámelové, Ph.D. za cenné rady, odbornou pomoc a vstřícný přístup během vedení bakalářské práce. Dále bych chtěla poděkovat svým blízkým za podporu po celou dobu studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracovala jsem ji samostatně pod vedením Ing. Venduly Sámelové, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 7.5.2024

.....

Houdková Eva

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ	17
2.1	Definice textury povrchu	17
2.1.1	Stopy po obrábění	18
2.1.2	Odchyly tvaru a nedokonalosti povrchu	19
2.1.3	Vlnitost a drsnost	20
2.2	Metody měření	21
2.3	ČSN EN ISO 21920	23
2.3.1	První část: ČSN EN ISO 21920-1	23
2.3.2	Druhá část: ČSN EN ISO 21920-2	24
2.3.3	Třetí část: ČSN EN ISO 21920-3	26
2.3.4	Metody vyhodnocování	27
2.3.5	Profilové parametry	28
2.3.6	Srovnání změn proti starým normám	33
2.4	Chyby a nejistoty měření	35
2.4.1	Nejistota měření	36
3	SYSTÉMOVÝ ROZBOR	41
3.1	Problémová situace	41
3.2	Vymezení problému	41
3.3	Formulace cílů a řešení	41
3.4	Myšlenková mapa	41
4	NÁVRH ŘEŠENÍ	43
5	MĚŘENÍ	47
5.1	Měřené vzorky	47
5.2	Použité měřidlo a pomůcky	48
5.3	Metodika měření	49
5.3.1	Postup při volbě filtru	50
5.3.2	Naměřené hodnoty	52
6	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	55
6.1	Vzorek 1	55
6.1.1	Statistické zpracování dat	55
6.1.2	Vyhodnocení dle ČSN EN ISO 4288	55
6.1.3	Výpočet nejistot měření	56
6.1.4	Vyhodnocení dle ČSN EN ISO 14253-1	56
6.2	Vzorek 2	58
6.2.1	Vyhodnocení dle ČSN EN ISO 4288	58
6.2.2	Vyhodnocení dle ČSN EN ISO 14253-1	58
6.3	Vzorek 3	60
6.3.1	Vyhodnocení dle ČSN EN ISO 4288	60
6.3.2	Vyhodnocení dle ČSN EN ISO 14253-1	60
7	DISKUZE	63
8	ZÁVĚR	65
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	67

10 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....	71
10.1 Seznam zkratek a symbolů	71
10.2 Seznam tabulek.....	73
10.3 Seznam obrázků.....	73
11 SEZNAM PŘÍLOH.....	75

1 ÚVOD

Tato bakalářská práce se zabývá texturou povrchu, přesněji posouzením možnosti hodnocení parametrů textury povrchu, a to se zohledněním nejistot při měření. První část práce je věnována současnému stavu poznání v oblasti textury povrchu, jako jsou např. nově platné normy, které mění definice některých parametrů a metody vyhodnocování textury povrchu, v porovnání s dosavadními normami ČSN EN ISO 4287 a ČSN EN ISO 4288.

Práce rovněž zkoumá problematiku okolo způsobu hodnocení textury povrchu v rámci ISO GPS profilovou metodou, včetně zohlednění nejistot měření. Aktuálně jsou nicméně platné dvě normy pro posouzení shody parametrů textury povrchu se specifikací na výkrese, a těmi jsou normy ČSN EN ISO 21920 a ČSN EN ISO 14253-1. Norma ČSN EN ISO 21920 vyhodnocuje shodu se specifikací dle tří pravidel, ale nezohledňuje nejistoty měření, přestože u všech ostatních vlastností ISO GPS jsou zohledněny. Bez uvažování nejistot měření může dojít k tomu, že vzorek bude vyhovovat specifikaci podle normy ČSN EN ISO 21920, případně neaktuální normy ČSN EN ISO 4288, avšak podle ČSN 14253-1 ji splňovat nebude. V takovém případě mohou být ovlivněny třecí vlastnosti, účinnost mazání, a tím i celková trvanlivost, spolehlivost a funkčnost součástí, jelikož textura povrchu ovlivňuje mechaniku kontaktu mezi součástmi, a tím i přenos sil a energie [1]. V případě uvažování nejistot měření snižujeme riziko schválení vzorku, který nevyhovuje specifikaci, proto je nepochopitelné, že u textury povrchu, která ovlivňuje mnoho důležitých vlastností, nebývají zohledněny.

Dále je v práci uveden návrh možné kombinace normy ČSN EN ISO 4288 a ČSN EN ISO 14253-1 tak, aby daný parametr byl vyhodnocen v souladu s oběma normami. Pro demonstraci návrhu řešení bylo provedeno měření vzorků pomocí kontaktního profilometru. Měření bylo výškový parametr R_a a následně byl vyhodnocován dle navrhovaného řešení, které se skládá z vyhodnocování parametru textury povrchu dle normy ČSN EN ISO 4288 a zároveň z ověření shody nebo neshody s danou specifikací podle normy ČSN EN ISO 14253-1, která uvažuje nejistoty měření. Pro posouzení měřeného parametru byla zvolena taková specifikace, aby bylo možné vyjádřit všechny potenciální scénáře při určování shody se specifikací.

2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Anglický termín „*surface texture*“ nebyl doposud v českých normách definován jednoznačně. Například ve starších normách, jako jsou ČSN EN ISO 4287:1998 a ČSN EN ISO 1302:2002, je tento termín přeložen jako struktura povrchu [2, 3]. V aktuálních normách, přesněji v normě ČSN EN ISO 21920, se již můžeme setkat s překladem textura povrchu [4].

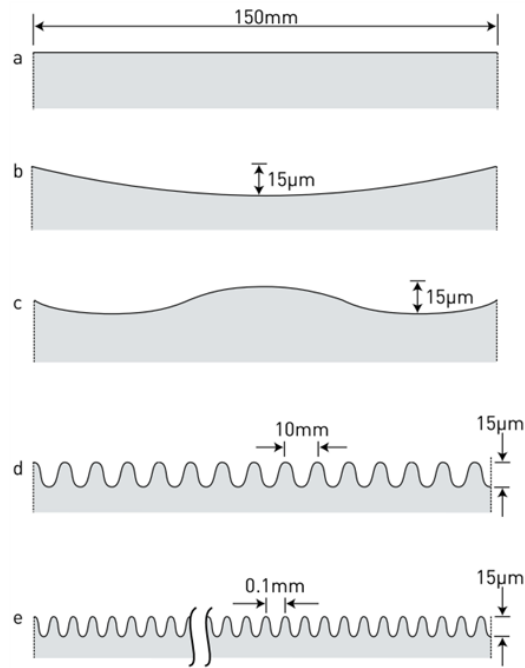
Vzhledem k tomu, že tato bakalářská práce bude dále pracovat s nejnovějšími normami, je zde termín „*surface texture*“ překládán jako textura povrchu.

2.1 Definice textury povrchu

Během procesu produkce technických součástí dochází k vzájemnému působení mnoha faktorů, které zapříčiňují opakované a náhodně uspořádané odchylky na povrchu součásti od ideálně geometrického tvaru [5]. V aktuální normě ČSN EN ISO 21930-2 je termín „*textura povrchu*“ definován jako: „*geometrické nepravidelnosti obsaženy v měřítku vymezeném povrchu*“ [6].

Pro představu je možné si vizualizovat hladký povrch s libovolnou délkou. V případě, že se na tomto povrchu objeví přesně uprostřed prohlubeň o určité hloubce, budeme mluvit o povrchu, který je lehce zakřivený, resp. vlnitý, ale stále jej budeme považovat za hladký. Zakřivení v tomto případě představuje odchylku od očekávaného tvaru. Pokud se počet těchto prohlubní zdvojnásobí, můžeme považovat tento povrch stále za vlnitý. Takto může narůstat počet prohlubní až do momentu, kdy se povrch bude zdát na pohled hladký, ale zároveň bude drsný (zobrazeno na obrázku 1). Tyto prohlubně označujeme jako texturu povrchu, která zahrnuje topografické odchylky obecně spojené s relativně pravidelnými průběhy, které nazýváme drsností [7]. V současnosti lze texturu povrchu charakterizovat podle [8] na posuzované ploše povrchu pomocí:

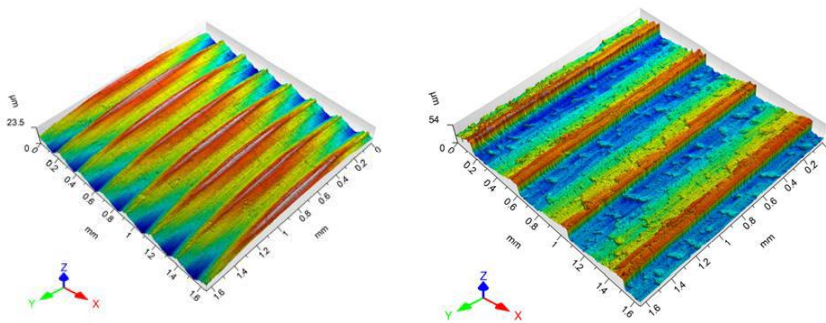
- stop po obrábění (*lay*),
- odchylek tvaru (*form deviations*),
- nedokonalostí (*imperfections*),
- vlnitosti (*waviness*),
- drsnosti (*roughness*).



Obrázek 1: Povrchy s prohlubněmi lišícími se v jejich vzdálenosti (upraveno) [7]

2.1.1 Stopy po obrábění

Jedná se o jedny z hlavních složek textury povrchu a jsou ovlivněny metodou obrábění, která je v procesu výroby součásti zvolena. Každá technologická operace zanechává pro ni charakteristické stopy, například u frézování a soustružení můžeme očekávat stopy v relativně periodické vzdálenosti (obrázek 2), zatímco u broušení, vzhledem k charakteru brusného kotouče, jsou stopy neperiodické a náhodné [8].



Obrázek 2: Modely soustruženého (vlevo) a frézovaného povrchu (vpravo) [8]

Požadavek na stopy, resp. povrchové nerovnosti výrobního procesu, musí být označen ve výrobním výkresu v souladu s ČSN EN ISO 21920-1 značkou znázorněnou v pozici [t] (obrázek 8 v kapitole 2.3.1). Existují dva případy vztahu povrchových nerovností vůči prvku – prvním případem je, že povrchové nerovnosti nemají definovaný vztah k prvku (tabulka 1), ve druhém případě existuje požadavek na jejich směr vzhledem k prvku součásti (tabulka 2). Pokud takový požadavek existuje, potom musí být uveden indikátor průsečné roviny a indikátor základního prvku [4].

Tabulka 1: Značky, interpretace a příklady pro indikaci povrchových nerovností [4]

Grafická značka	Interpretace	Příklad indikace
M	Vícesměrová orientace	
C	Přibližně kruhový směr vztažený ke středu povrchu, kterého se značka týká	
R	Přibližně radiální směr vztažený ke středu povrchu, kterého se značka týká	
P	Povrchové nerovnosti jsou nespojité, nemají směr nebo vyčnívají	

Tabulka 2: Značky, příklady, indikace a interpretace povrchových nerovností a jejich směru [4]

Grafická značka	Interpretace	Požadovaný směr povrchových nerovností (značen: 1)	Příklad indikace
=	Rovnoběžně se směrem daným indikátorem průsečné roviny a indikátorem základního prvku		
⊥	Kolmo ke směru danému indikátorem průsečné roviny a indikátorem základního prvku		
X	Zkříženo ve dvou šikmých směrech vzhledem ke směru danému indikátorem průsečné roviny a indikátorem základního prvku		

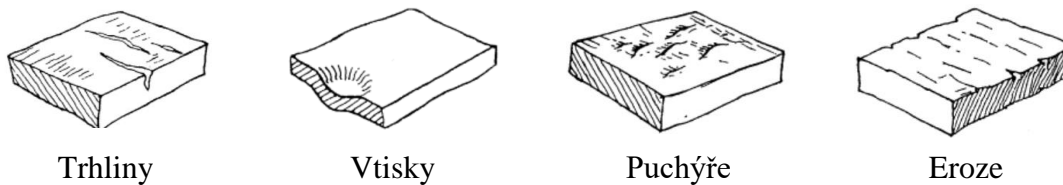
2.1.2 Odchytky tvaru a nedokonalosti povrchu

Pokud uvažujeme jediný tvarový prvek, potom je možné hodnotit odchylku tvaru od ideálního geometrického tvaru.

U odchylky tvaru je toleranční pole v souladu s normou ČSN EN ISO 1101 podle způsobu kótování a tolerované charakteristiky tvořeno: kruhem, mezikružím, válcem, prostorem mezi dvěma souosými válci atd. V praxi jsou odchylky tvaru vyhodnocovány jako charakteristiky přímosti, rovinnosti, kruhovitosti, válcovitosti, tvaru profilu libovolné čáry a tvaru profilu libovolné plochy [8].

Nedokonalostmi povrchu (z anglického „*surface imperfections*“, SIM) dle ČSN EN ISO 8785 rozumíme prvek, nepravidelnost nebo skupinu prvků, které jsou vytvořeny neúmyslně nebo náhodně během výroby, skladováním a používáním (funkcí) povrchu, nemusí však určovat funkční nezpůsobilost [8].

Mezi typy nedokonalostí dle ČSN EN ISO 8785 řadíme například: prohlubeniny, rýhy, trhliny, vtisky, puchýře, důlkovou korozi, erozi, skvrny atd. Některé z vybraných příkladů nedokonalostí jsou vyobrazeny na obrázku 3 [9].



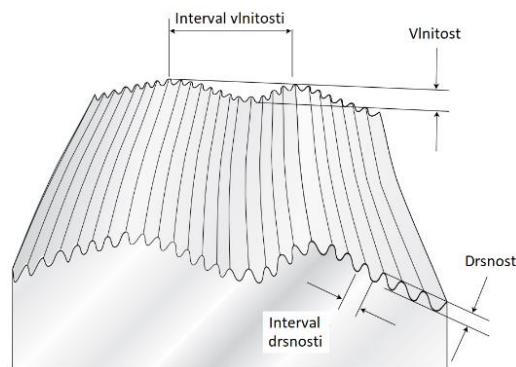
Obrázek 3: Příklady nedokonalostí povrchu [9]

2.1.3 Vlnitost a drsnost

Vlnitost a drsnost jsou úzce související vlastnosti povrchu. Žádná z nich není přímo měřitelná na daném povrchu a hodnoty jejich parametrů je možné získat až smluveným způsobem filtrování a výpočtem z naměřených dat. Obě tyto specifické vlastnosti jsou superponované na základním tvaru zkoumaného funkčního povrchu [8].

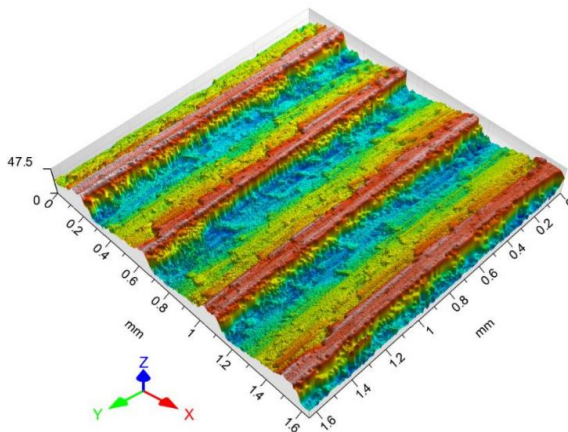
Vlnitost je specifická vlastnost textury povrchu, na kterou je superponovaná drsnost (jak je možné si všimnout na obrázku 4). Vzniká převážně vlivem stroje, např. při nevyváženosti brusného kotouče nebo malou tuhostí saní stroje, což způsobuje chvění a vibrace, které dále mohou způsobit periodicky se opakující stopy na povrchu, připomínající vlny [5].

Drsnost povrchu je vyčíslitelné měřítko stop výrobního procesu nového povrchu. Uspořádání těchto stop má náhodný či periodický charakter. Můžeme ji tedy chápat jako nejmenší nerovnosti, které vznikají v průběhu výroby povrchu součásti [10]. Příkladem je operace broušení, při které jsou jednotlivá zrna brusného kotouče v nepravidelném kontaktu s povrchem obráběného materiálu. Tento nepravidelný kontakt vede k náhodnému odtržení broušeného materiálu v různých výškách a hloubkách. Výsledné odchylky od teoreticky hladkého povrchu nebo periodicky vlnitého povrchu určují drsnost povrchu [5].

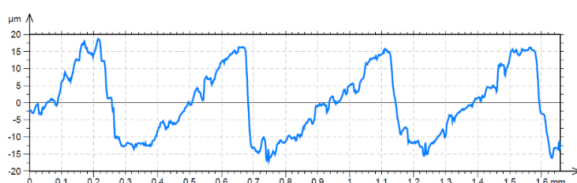


Obrázek 4: Schéma drsnosti a vlnitosti (upraveno) [7]

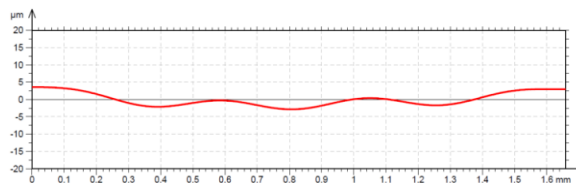
Jak bylo zmíněno výše, drsnost je superponovaná neboli nanesená specifická vlastnost textury povrchu na vlnitosti. Tohoto si můžeme všimnout na ukázce frézovaného povrchu na obrázku 5, kde na grafu 1 je zobrazen skutečný profil povrchu. Tento skutečný profil povrchu se skládá z profilu drsnosti (graf 3), který je nanesen na profil vlnitosti (graf 2). Tyto profily jsou superponované na profilu základního tvaru (graf 4) [8].



Obrázek 5: Textura frézovaného povrchu [8]



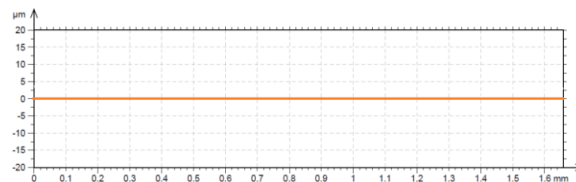
Graf 1: Skutečný profil povrchu u ve směru osy x [8]



Graf 2: Profil vlnitosti [8]



Graf 3: Profil drsnosti [8]



Graf 4: Profil základního tvaru [8]

2.2 Metody měření

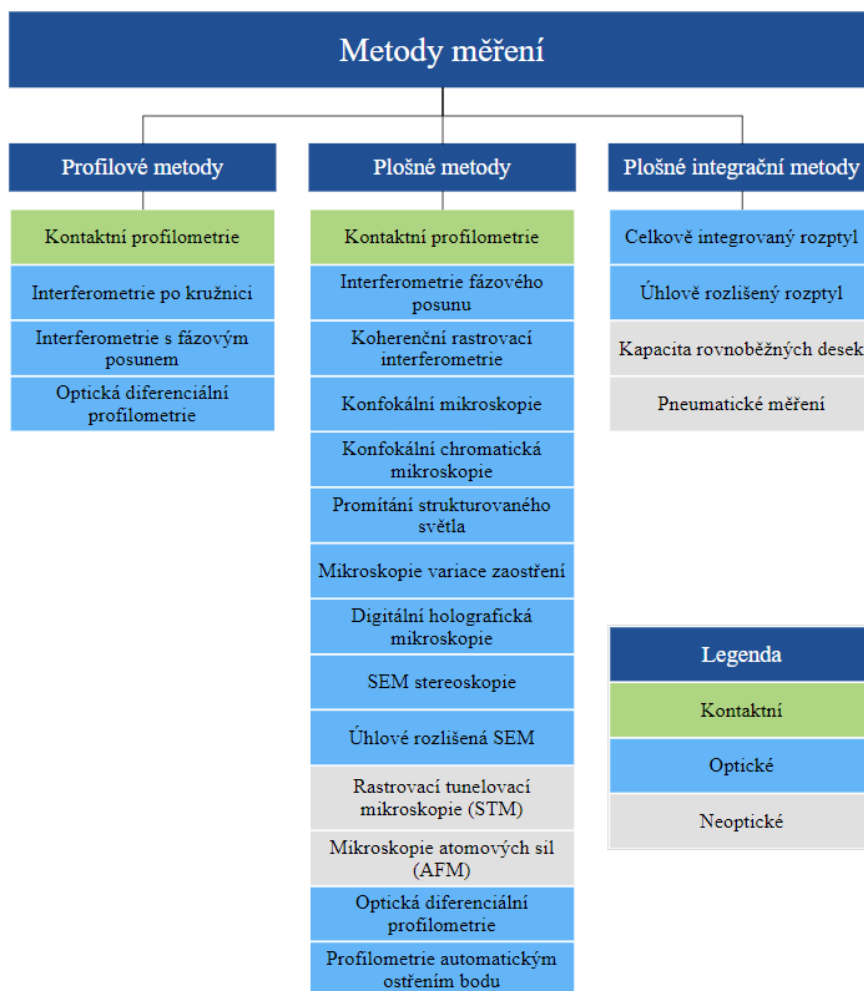
Mezi nejstarší metody měření patří vizuálně-srovnávací metoda, kdy byl povrch poměrně úspěšně, ačkoliv subjektivně, otestován a ohodnocen pomocí oka a nehtu hodnotitele a sady vzorků. Tato metoda je nenáročná a rychlá, avšak vyžaduje zkušenosti osoby, která měření provádí, a přesností se nevyrovná přístrojovým měřením. Ve skutečnosti je textura povrchu složená z miniaturních nerovností, které jsou pro lidské oko téměř neviditelné [11].

Pro její změření je tedy zapotřebí zvětšovacího zařízení. Jako zvětšovací přístroj se nabízí mikroskop. Mikroskopem sice lze změřit horizontální vzdálenosti mezi nerovnostmi, ale už není možné změřit jejich vrcholy a údolí (viz kapitola 2.3.22.3) [7]. Tato bezkontaktní metoda je tedy vhodná pouze pro obecné hodnocení textury povrchu [11].

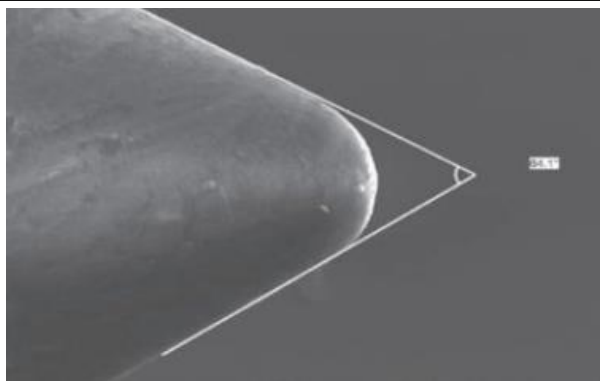
V dnešní době se používají tři základní metody měření – profilové, plošné a plošné integrační (viz obrázek 6) [7]. Tyto metody se dají rozdělit do dvou kategorií, a to kontaktní a bezkontaktní [12].

Mezi nejrozšířenější metody patří profilová kontaktní metoda pomocí stylusu, která je sice rychlá a levnější než jiné metody, ale na druhou stranu vyžaduje správné provedení měření a jeho správné vyhodnocení. V případě, že by byla zvolena např. neadekvátní rychlost stylusu je celý proces hodnocení textury povrchu znehodnocen [12]. To stejné platí pro případ, kdy je špatně zvolen mezní filtr cut-off (frekvenční filtr rozdělující profil na dlouhovlnné a krátkovlnné složky [28]).

Při profilové kontaktní metodě je používán stylus s hrotem, který bývá kuželovitého tvaru s kulovou špičkou (obrázek 7), která je dána poloměrem a vrcholovým úhlem [13]. Tento stylus je umístěn na měřený povrch v lokaci a orientaci, které jsou považovány za spolehlivou reprezentaci textury tohoto povrchu [5]. Hrot stylusu se táhne podél měřeného povrchu konstantní rychlostí po stanovené vzdálenosti [7]. Snímač, na který je připojen stylus, je udržován v jedné rovině, avšak stále umožňuje, aby stylus mohl těsně sledovat měřený povrch. Změny povrchu způsobují vychýlení stylusu z referenční polohy vůči snímači. Tyto mechanické výchylky jsou snímány a převáděny snímačem na elektrické signály. Tyto signály odrážejí buď frekvenci výchylek stylusu, nebo v častějších případech vytvářejí proud či napětí, které jsou úměrné amplitudě výchylek. Takto získané elektrické signály jsou elektronicky zesíleny a představují tak vertikálně zvětšený povrch. Zesílené signály jsou poté zobrazeny jako průměrná hodnota na měřidle nebo zapsány v zapisovači (např. dále používaný program TalyProfile Lite), kde se vytvoří zvětšený graf snímaného povrchu [5].



Obrázek 6: Metody měření textury povrchu (upraveno) [8]



Obrázek 7: Hrot stylusu [14]

2.3 ČSN EN ISO 21920

Aktuální normy ČSN EN ISO 21920 jsou platné od roku 2022 a jejich český překlad byl vydán v roce 2023. Jejich cílem bylo sjednocení norem pro texturu povrchu, jejich zestručnění a opravení nedostatků. Dalším důvodem pro jejich vydání byl fakt, že některé normy, které nahrazují, byly už přes 20 let staré. Nové normy se skládají ze tří částí a nahrazují tak celkem šest norem (viz tabulka 3).

Tabulka 3: Nové normy

Nová norma	Nahrazená norma
ČSN EN ISO 21920-1	ČSN EN ISO 1302:2002
ČSN EN ISO 21920-2	ČSN EN ISO 4287:1997, ČSN EN ISO 12058:1996, ČSN EN ISO 13565-2:1996, ČSN EN ISO 13565-2:1996
ČSN EN ISO 21920-3	ČSN EN ISO 4288:1996

2.3.1 První část: ČSN EN ISO 21920-1

Tato norma nese název: „*Textura povrchu: Profil – Část 1: Indikace textury povrchu*“ a specifikuje pravidla pro značení textury povrchu profilovými metodami v technické dokumentaci pomocí grafických značek. Norma takto udává např. jaké parametry lze předepsat a jejich umístění v indikaci textury povrchu. Jako příklad je uvedena indikace parametrů drsnosti na obrázku 8, ke které je v tabulce 4 uvedena legenda elementů indikace. Dále specifikuje toleranční přejímací pravidla, která jsou uvedena níže v kapitole 2.3.4, a jejich značení. Zároveň určuje pravidla pro rozměrové proporce grafického značení, grafické značení obsahující požadavky na výrobní proces (zobrazené na obrázku 9), způsoby indikace povrchových nerovností (viz kapitola 2.1.1) a jejich umístění v technické dokumentaci produktu [4].

$$\sqrt[\frac{[s][t]}{[a]\langle b \rangle\langle c \rangle[d]/[e][f]-[g][h]([m])[n][p]/[q][r]}]{[u]}$$

Obrázek 8: Indikace parametru drsnosti povrchu [4]

Tabulka 4: Legenda volitelných elementů indikace [4]

a	typ tolerance
b	značka pro R-parametr
c	hodnota toleranční meze parametru povrchové textury profilu
d	toleranční přejímací pravidlo
e	typ profilového S-filtru
f	index vložení profilového S-filtru
g	typ profilového L-filtru
h	index vložení profilového L-filtru
m	hodnocená délka
n	metoda přiřazení a element přiřazení profilového F-operátoru
p	index vložení profilového F-operátoru
q	metoda extrakce profilu
r	vyhrazené pole pro značku OR(<i>n</i>) indikující další požadavky
s	výrobní proces
t	povrchové nerovnosti a jejich směr
u	směr profilu vůči povrchové nerovnosti
< >	vyhrazené pole, které se musí specifikovat
[]	vyhrazené pole, které se specifikuje, je-li odlišnost od výchozí hodnoty nebo je další požadavek



a) Dovoleno jakýkoliv výrobní proces



b) Odebrání materiálu je požadováno



c) Odebrání materiálu není dovoleno

Obrázek 9: Grafické značky textury povrchu [4]

2.3.2 Druhá část: ČSN EN ISO 21920-2

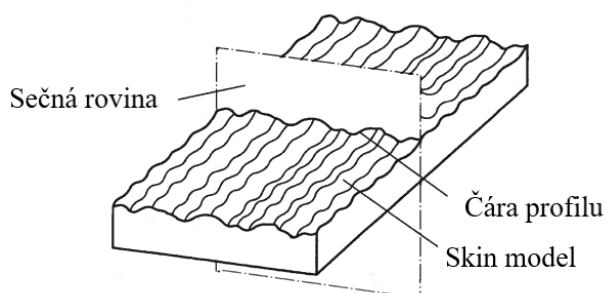
Předmětem této normy je specifikace termínů, definic a parametrů pro texturu povrchu pomocí profilových metod, jak napovídá její název: „*Textura povrchu: Profil – Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu*“. Můžeme v ní tedy najít definice obecných

termínů (popsaných níže podle [6]), definice a způsoby výpočtu parametrů pole a prvků (podrobněji v kapitole 2.3.5).

Obecné termíny

Skin model (*skin model*) je model hranice součásti s okolím.

Čára profilu (*profile trace*) vzniká průnikem do skin modelu sečnou rovinou (obrázek 10), která je kolmá na skin model. Častěji je čára profilu však nazývána profilem povrchu (*surface profile*), který byl podobně definován v normě ČSN EN ISO 4287.



Obrázek 10: Čára profilu (upraveno) [6]

Profilový filtr (*profile filter*) je operátor filtrace, který je aplikován na profil. Existují tři operátory filtrace:

- profilový S-filtr – odstraňuje postranní složky krátké vlnové délky z profilu (pomocí vlnové délky cut-off λ_s),
- profilový L-filtr – odstraňuje postranní složky dlouhé vlnové délky z profilu (pomocí vlnové délky cut-off λ_c),
- F-operace – operace, při které dojde k vyloučení vlivu tvaru z profilu.

Primární profil (*primary profile*) je základem pro hodnocení parametrů primárního profilu, je značen písmenem P a lze jej získat z profilu povrchu pomocí F-operace.

Profil vlnitosti (*waviness profile*) je značen písmenem W a je odvozen z primárního profilu potlačením krátkovlnných složek profilu pomocí S-filtru.

Profil drsnosti (*roughness profile*) získáme z primárního profilu potlačením dlouhovlnných složek s pomocí L-filtru a značíme jej písmenem R.

Hodnocená délka (*evaluation length*) je délka ve směru osy x, použita pro posouzení vyhodnocovaného profilu. Značena jako l_e .

Úseková délka (*section length*) je délka ve směru osy x, ze které se získávají parametry vztažené k úsekové délce. Značena l_{sc} .

Počet úseků (*number of sections*) je údaj, který určuje počet úseků použitých k získání parametrů vztažených k úsekové délce. Počet úseků n_{sc} je celé číslo.

Vrch (*hill*) je část posuzovaného profilu, která směřuje ven z povrchu do okolí. Nejvyšší bod vrcholu je označován jako výstupek.

Údolí (*dale*) je část okolního prostředí směřující do posuzovaného profilu. Prohlubeň je potom nejnižším bodem údolí.

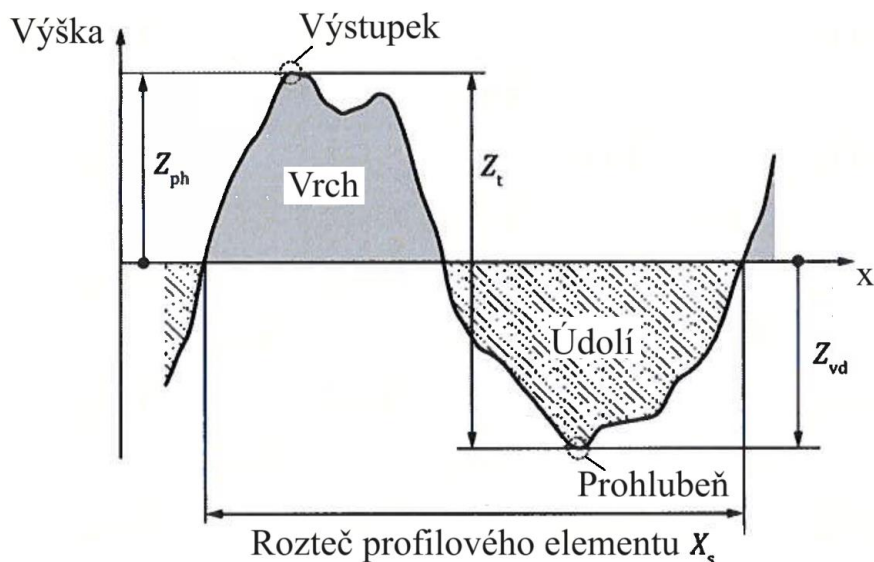
Profilový element (*profile element*) je vrch následovaný údolím nebo údolí následované vrchem.

Výška profilového elementu (*profile element height*) je rovna součtu výšky výstupku a hloubky prohlubně, dle vztahu (1) a jak je zobrazeno na obrázku 11.

$$Z_t = Z_{ph} + Z_{vd} \quad (1)$$

kde Z_{ph} výška výstupku profilového elementu,

Z_{vd} hloubka prohlubně profilového elementu.



Obrázek 11: Profilový element (upraveno) [6]

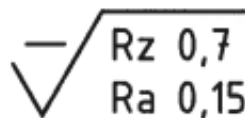
2.3.3 Třetí část: ČSN EN ISO 21920-3

Norma ČSN EN ISO 21920-3 nese název „*Textura povrchu: Profil – Část 3: Operátory specifikací*“ a definuje operátor úplné specifikace, který pro texturu povrchu určuje všechny elementy nastavení. Norma tedy udává obecná výchozí nastavení, která nejsou závislá na typu parametru, a navíc k nim uvádí pravidla pro výchozí nastavení na základě indikace v technické dokumentaci – např. výchozí nastavení na základě horní toleranční meze (tabulka 5), dolní toleranční meze nebo oboustranných tolerančních mezí. Díky tomuto je možné určit hodnotu mezní vlnové délky cut-off rovnou ze specifikace na výkrese – jako příklad je uvedena specifikace na obrázku 12 a jí odpovídající výchozí nastavení je uvedeno v tabulce 6 [15].

Tabulka 5: Výchozí nastavení parametru na základě horní toleranční meze [15]

Specifikovaný parametr	S_{c1}	S_{c2}	S_{c3}	S_{c4}	S_{c5}
	Horní toleranční mez (U) specifikovaného parametru				
Rz [μm]	$U \leq 0,16$	$0,16 < U \leq 0,8$	$0,8 < U \leq 16$	$16 < U \leq 80$	$U > 80$
Ra [μm]	$U \leq 0,02$	$0,02 < U \leq 0,1$	$0,1 < U \leq 2$	$2 < U \leq 10$	$U > 10$
Rp [μm]	$U \leq 0,06$	$0,06 < U \leq 0,3$	$0,3 < U \leq 6$	$6 < U \leq 30$	$U > 30$
Rv [μm]	$U \leq 0,10$	$0,10 < U \leq 0,5$	$0,5 < U \leq 10$	$10 < U \leq 50$	$U > 50$
Rq [μm]	$U \leq 0,032$	$0,032 < U \leq 0,16$	$0,16 < U \leq 3,2$	$3,2 < U \leq 16$	$U > 16$
Rzx [μm]	$U \leq 0,23$	$0,23 < U \leq 1,15$	$1,15 < U \leq 23$	$23 < U \leq 115$	$U > 115$
Rt [μm]	$U \leq 0,26$	$0,26 < U \leq 1,3$	$1,3 < U \leq 26$	$26 < U \leq 130$	$U > 130$
cut-off λ_c [mm]	0,08	0,25	0,8	2,5	8
l_e [mm]	0,4	1,25	4	12,5	40
cut-off λ_s [μm]	2,5	2,5	2,5	8	25
d_x [μm]	0,5	0,5	0,5	1,5	5

kde d_x maximální vzorkovací rozteč
 S_{cn} třída nastavení



Obrázek 12: Specifikace parametru Rz a Ra [15]

Tabulka 6: Výchozí nastavení podle specifikace [15]

Výchozí nastavení	
Pokud je specifikováno více parametrů v jedné grafické značce, tak se použije pro výběr výchozího nastavení parametr v prvním řádku – v tomto případě parametr Rz.	
Vlnová délka cut-off λ_c	0,25 mm
Hodnocená délka l_e	1,25 mm
Vlnová délka cut-off λ_s	2,5 μm
Maximální vzorkovací rozteč d_x	0,5 μm

2.3.4 Metody vyhodnocování

Toleranční pravidla jsou zmíněna v souladu s normou ČSN EN ISO 21920-1 a obecně určují způsob porovnání toleranční meze s měřenou hodnotou parametru. V případě textury povrchu existují dále uvedená tři pravidla, která stanovují limit přípustnosti [4].

Toleranční přejímací pravidlo maxima

Toto pravidlo nedovoluje žádné měřené hodnotě překročit toleranční mez, definuje tak způsob porovnání toleranční meze a měřené hodnoty se stanoveným kritériem přípustnosti. Jedná se o výchozí pravidlo, které platí i bez uvedení značení – přípony „max“ (viz obrázek 13).

Určuje tedy maximální přípustnou měřenou hodnotu [4]. Vyhodnocovaný vzorek je měřen minimálně třikrát na části povrchu, kde můžeme očekávat největší hodnoty [16].

Tmax

Obrázek 13: Značení tolerančního přejímacího pravidla maxima [4]

Toleranční přejímací pravidlo 16 %

Dané pravidlo v normě ČSN EN ISO 21920-1 dovoluje, aby maximálně 16 % všech naměřených hodnot parametru překročilo toleranční mez. Toto pravidlo je platné pouze pro parametr, u kterého je na řádku uvedena značka (obrázek 14). V případě, že je na řádku uvedena oboustranná tolerance, potom 16 % všech naměřených hodnot může překročit horní a dolní toleranční mez [4].

T16%

Obrázek 14: Značení tolerančního přejímacího pravidla 16 % [4]

Toleranční přejímací pravidlo medián

Nejedná se o výchozí pravidlo, ale pokud je specifikované, pak musí medián všech naměřených hodnot parametru splňovat toleranční meze. Platí, stejně jako u tolerančního přejímacího pravidla 16 %, pouze pro parametr, u kterého je uvedeno značení (viz obrázek 15) na řádku. Pro uplatnění tohoto pravidla se použijí alespoň tři naměřené hodnoty parametru, případně, pokud je specifikováno, se použije více hodnot. Pokud leží medián naměřených hodnot parametru v toleranční mezi, potom přesahuje toleranční mez maximálně polovina měřených hodnot [4].

Tmed

Obrázek 15: Značení tolerančního přejímacího pravidla medián [4]

2.3.5 Profilové parametry

V normě ČSN EN ISO 21920-2 došlo k nárůstu počtu základních parametrů pro hodnocení textury povrchu z původních 16 parametrů dle normy ČSN EN ISO 4287. Dále byly upraveny názvy, definice a jednotky jednotlivých parametrů. Aktuální základní parametry jsou znázorněny v tabulkách 7 a 8 [8].

Tabulka 7: Parametry pole dle ČSN EN 21920-2 [6]

Značení	Název	Jednotky	
Parametry pole			
<u>Výškové parametry</u>			
1	Ra	střední aritmetická výška	$[\mu\text{m}]$
2	Rq	efektivní výška	$[\mu\text{m}]$
3	Rsk	šikmost	$[-]$
4	Rku	špičatost	$[-]$
5	Rt	celková výška	$[\mu\text{m}]$
6	Rzx	maximální výška úseku	$[\mu\text{m}]$
<u>Prostorové parametry</u>			
7	Ral	autokorelační délka	$[\mu\text{m}]$
8	Rsw	dominantní prostorová vlnová délka	$[\mu\text{m}]$
<u>Hybridní parametry</u>			
9	Rdq	Efektivní sklon	$[-]$
10	Rda	střední aritmetický absolutní sklon	$[-]$
11	Rdt	maximální absolutní sklon	$[-]$
12	Rdl	rozvinutá délka	$[\text{mm}]$
13	Rdr	poměr rozvinuté délky	$[-]$ příp. [%]
<u>Funkce materiálového poměru a souvisící parametry</u>			
14	$Rml(c)$	materiálová délka	$[\text{mm}]$
15	$Rmc(c)$	materiálový poměr	$[-]$ příp. [%]
16	$Rcm(p)$	inverzní materiálový poměr	$[\mu\text{m}]$
17	–	křivka materiálového poměru	–
18	$Rhd(c)$	hustota výšky	$\left[\frac{1}{\mu\text{m}}\right]$
19	$Rvm(p)$	materiálový objem	$\left[\frac{\text{ml}}{\text{m}^2}\right]$
20	$Rvv(p)$	prázdný objem	$\left[\frac{\text{ml}}{\text{m}^2}\right]$
21	$Rmr(p, d_c)$	vztažný materiálový poměr	$[-]$ příp. [%]
22	$Rdc(p, q)$	výškový rozdíl materiálového poměru	$[\mu\text{m}]$

Tabulka 8: Parametry prvku dle ČSN EN 21920-2 [6]

Značení	Název	Jednotky	
Parametry prvku			
<u>Parametry založené na výškách výstupků a hloubkách prohlubní</u>			
23	<i>R_{pt}</i>	maximální výška výstupku	[μm]
24	<i>R_p</i>	střední výška výstupku	[μm]
25	<i>R_{vt}</i>	maximální hloubka prohlubně	[μm]
26	<i>R_v</i>	střední hloubka prohlubně	[μm]
27	<i>R_z</i>	maximální výška	[μm]
<u>Parametry založené na profilových elementech</u>			
28	<i>R_{sm}</i>	střední rozteč profilového elementu	[mm]
29	<i>R_{smx}</i>	maximální rozteč profilového elementu	[mm]
30	<i>R_{smq}</i>	směrodatná odchylka roztečí profilových elementů	[mm]
31	<i>R_c</i>	střední výška profilového elementu	[μm]
32	<i>R_{cx}</i>	maximální výška profilového elementu	[μm]
33	<i>R_{cq}</i>	směrodatná odchylka výšek profilových elementů	[μm]
34	<i>R_{pc}</i>	parametr počtu výstupků	$\left[\frac{1}{\text{cm}} \right]$
<u>Parametry založené na charakterizaci prvků</u>			
35	<i>R_{pd}</i>	hustota výstupků	$\left[\frac{1}{\text{cm}} \right]$
36	<i>R_{vd}</i>	hustota prohlubní	$\left[\frac{1}{\text{cm}} \right]$
37	<i>R_{mpc}</i>	střední aritmetické zakřivení výstupku	$\left[\frac{1}{\mu\text{m}} \right]$
38	<i>R_{mvc}</i>	střední aritmetické zakřivení prohlubně	$\left[\frac{1}{\mu\text{m}} \right]$
39	<i>R_{5p}</i>	pětibodová výška výstupku	[μm]
40	<i>R_{5v}</i>	pětibodová hloubka prohlubně	[μm]
41	<i>R_{10z}</i>	desetibodová výška	[μm]

Způsoby výpočtu a definice profilových parametrů

V [6] jsou definovány následující vztahy:

Střední aritmetická výška

Jedná se o aritmetický průměr absolutních hodnot souřadnic profilu drsnosti $z(x)$, změřených na hodnocené délce l_e , vypočítaný dle vztahu (2).

$$Ra = \frac{1}{l_e} \cdot \int_0^{l_e} |z(x)| \cdot dx \quad (2)$$

Efektivní výška

Efektivní výška se vypočítá dle vztahu (3) a jedná se o kvadratický průměr hodnot souřadnic $z(x)$ na hodnocené délce.

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l_e} \cdot \int_0^{l_e} z^2(x) \cdot dx} \quad (3)$$

Šikmost

Dle vztahu (4), ve kterém figuruje podíl střední kubické hodnoty souřadnic profilu drsnosti $z(x)$ a hodnoty třetí mocniny efektivní výšky Rq , je možné vypočítat šikmost Rsk z celé hodnocené délky.

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \cdot \frac{1}{l_e} \cdot \int_0^{l_e} z^3(x) \cdot dx \quad (4)$$

Špičatost

Špičatost je možné podle vztahu (5) vypočítat jako podíl čtvrté mocniny střední hodnoty souřadnic $z(x)$ a čtvrté mocniny hodnoty efektivní výšky Rq na hodnocené délce l_e .

$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \cdot \frac{1}{l_e} \cdot \int_0^{l_e} z^4(x) \cdot dx \quad (5)$$

Celková výška

Celkovou výšku získáme dle vztahu (6) součtem největší výšky a největší hloubky na hodnocené délce l_e .

$$Rt = \max_{x \in X} (z(x)) - \min_{x \in X} (z(x)), \quad (6)$$

kde $X = \{x \in R | 0 \leq x \leq l_e\}$.

Efektivní sklon

Tento parametr lze spočítat dle vztahu (7) jako kvadratický průměr místního sklonu pro jednotlivé souřadnice $z(x)$.

$$Rdq = \sqrt{\frac{1}{l_e} \cdot \int_0^{l_e} \left(\frac{dz(x)}{dx} \right)^2 \cdot dx} \quad (7)$$

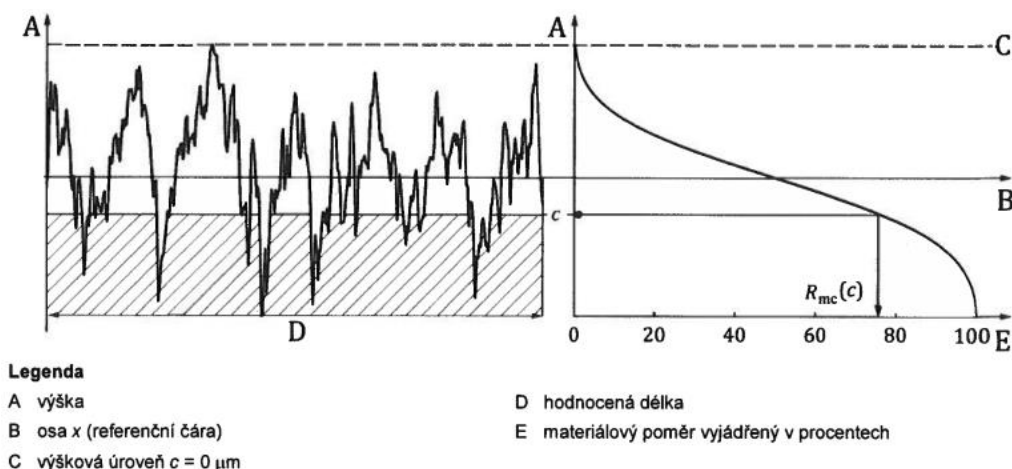
Materiálový poměr

Materiálový poměr lze vypočítat dle vztahu (8), jako poměr materiálové délky Rml v dané výškové úrovni protnutí c k hodnocené délce l_e . Materiálovou délkou rozumíme kumulovanou délku částí profilu protnutých čarou ve výškové úrovni c . V případě že $c = 0 \mu\text{m}$, potom je v rámci hodnocené délky referenční výška maximální výškou vymezeného profilu.

$$Rmc(c) = \frac{Rml(c)}{l_e} \quad (8)$$

Křivka materiálového poměru

Tuto křivku, zobrazenou na obrázku 16, občas najdeme pod názvem „Abbott-Firestoneova křivka“ a popisuje materiálový poměr $R_{mc}(c)$ (měřítkem vymezeného profilu) jako funkci výškové úrovně průtnutí c na hodnocené délce l_e .



Obrázek 16: Křivka materiálového poměru [6]

Střední výška výstupku

Jedná se o střední hodnotu z největších výšek výstupků dle vztahu (9), kdy pro každou úsekovou délku je stanovena jedna největší výška výstupku Z_{ph_j} .

$$Rp = \frac{1}{n_{sc}} \cdot \sum_{i=1}^{n_{sc}} \max_{j \in N_i} (Z_{ph_j}) \quad (9)$$

Střední hloubka prohlubně

Pro výpočet tohoto parametru je pro každou úsekovou délku l_{sc} stanovena největší hloubka prohlubně Z_{vd} . Z těchto hodnot největších hloubek prohlubní je potom stanovena střední hodnota dle vztahu (10).

$$Rv = \frac{1}{n_{sc}} \cdot \sum_{i=1}^{n_{sc}} \max_{j \in N_i} (Z_{vd_j}), \quad (10)$$

kde $N_i = \{j = 1, 2, \dots, n_v \mid (i-1)l_{sc} \leq x_j \leq l_{sc}\}$

x_j poloha j -té prohlubně na ose x

n_{sc} počet úsekových délek

Maximální výška

Dle vztahu (11) je maximální výška průměrnou hodnotou součtu nejvyššího výstupku Z_{ph} a největší hloubky Z_{vd} každé úsekové délky. Zjednodušeně se jedná o součet střední výšky výstupku Rp a střední hloubky prohlubně Rv .

$$Rz = \frac{1}{n_{sc}} \cdot \sum_{i=1}^{n_{sc}} \left(\max_{j \in N_{p_j}} (Z_{ph_j}) + \max_{k \in N_{v_k}} (Z_{vd_k}) \right) = Rp + Rv \quad (11)$$

Střední rozteč profilového elementu

Podle vztahu (12) je možné vypočítat hodnotu střední rozteče profilového elementu jako střední hodnotu roztečí profilových elementů X_s vypočtených ve všech úsekových délkách.

$$Rsm = \frac{1}{n_{pe}} \cdot \sum_{i=1}^{n_{pe}} X_{s,i} \quad (12)$$

Střední výška profilového elementu

Střední výšku profilového elementu je možné vypočítat, dle vztahu (13), jako střední hodnotu výšek profilových elementů profilu drsnosti Z_t , kde n_{pe} je rovno počtu profilových elementů na vyhodnocované délce l_e .

$$Rc = \frac{1}{n_{pe}} \cdot \sum_{i=1}^{n_{pe}} Z_{t,i} \quad (13)$$

Výškový rozdíl materiálového poměru

Výškový rozdíl materiálového poměru představuje rozdíl dvou výškových úrovní protnutí pro daný materiálový poměr p a q , jak je uvedeno ve vztahu (14), přičemž platí podmínka $p \leq q$.

$$Rdc(p, q) = Rcm(q) - Rcm(p) \quad (14)$$

Vztažný materiálový poměr

Vztažný materiálový poměr představuje materiálový poměr Rmc , který je určený ve výškové úrovni protnutí $c_p + d_c$. Výšková úroveň protnutí je tedy rovna součtu inverzního materiálového poměru c_p (při materiálovém poměru p) a vztažné výškové úrovni protnutí d_c . Pro výpočet vztažného materiálového poměru, podle vztahu (15), není požadována specifikace materiálového poměru p , použije-li se výchozí hodnota $p = 0 \%$.

$$\begin{aligned} Rmr(p, d_c) &= Rmc(c_p + d_c) \\ c_p &= Rmc(c) \end{aligned} \quad (15)$$

Parametr počtu výstupků

Tento parametr popisuje, kolik existuje středních roztečí profilových elementů Rsm na jednotkovou délku L , jak je uvedeno ve vztahu (16). Jednotková délka L je podle normy ČSN EN ISO 21920-3 rovna 10 mm pro výpočet parametru počtu výstupků.

$$Rpc = \frac{L}{Rsm} \quad (16)$$

2.3.6 Srovnání změn proti starým normám

Tato kapitola obsahuje přehled změn, které byly zavedeny současnými normami ve srovnání se starými normami.

ČSN EN ISO 21920-1 a ČSN EN ISO 1302

Stará norma ČSN EN ISO 1302 popisovala pouze dvě přijímací pravidla, aktuální norma zná již pravidla tři: pravidlo 16 %, pravidlo maxima a nové pravidlo medián. Mezi

změny patří i způsob vyhodnocování, který se týká tolerančních přejímacích pravidel. Nově je metoda maxima platná i bez značení a metoda 16 % již není výchozím pravidlem. Zároveň došlo k úpravám značení tolerančních přejímacích pravidel v technické dokumentaci (viz obrázky 17 a 18).

Další změnou je způsob značení, kde došlo k doplnění úsečky u grafické značky (obrázek 19), oproti starému způsobu značení (obrázek 20). Zároveň dříve existovalo několik grafických značek (obrázek 21), nyní je stanovena jedna základní značka obsahující pouze požadavky na výrobní proces.

V neposlední řadě musí být aktuálně oboustranné tolerance uvedeny na jednom řádku, nikoliv na dvou řádcích, a jsou stanoveny např. grafické značky pro indikaci směru profilu, značka pro přejímací pravidlo medián atd., specifikace přídatku na obrábění se již neuvádí [4].



a) Značení dle ČSN EN ISO 21920-1 b) Značení dle ČSN EN ISO 1302

Obrázek 17: Nový a starý způsob značení pravidla maxima [4]



a) Značení dle ČSN EN ISO 21920-1 b) Značení dle ČSN EN ISO 1302

Obrázek 18: Nový a starý způsob značení metody 16 % [4]



Obrázek 19: Grafická značka dle ČSN EN ISO 21920-1 [4]

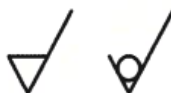


Obrázek 20: Grafická značka dle ČSN EN ISO 1302 [4]

Základní:



Rozšířená:



Úplná:



Obrázek 21: Grafické značky v souladu s ČSN EN ISO 1302 [4]

ČSN EN ISO 21920-2

Mezi zásadní změny patří změna délky, se kterou souvisí parametry pole. Nově jsou definovány na hodnocené délce l_e , která byla dříve nazývána „vyhodnocovanou délkou“, značenou jako l_n . V normě ČSN EN ISO 4287 byly parametry pole definovány na základní délce, kterou v aktuální normě najdeme pod názvem „úseková délka“ a je značena l_{sc} . Na úsekové délce jsou nyní definovány pouze parametry prvků.

Bylo zavedeno také jednoznačné hodnocení profilových elementů, které se vyhodnocují na hodnocené délce. Na této délce jsou vyhodnocovány od začátku do konce hodnocené délky, poté opačným směrem, a nakonec následuje zprůměrování naměřených hodnot. Poslední, hlavní změnou je definice nových parametrů a úprava definic starých parametrů, jejich způsobu výpočtu nebo změna jejich názvu, případně značení [6].

ČSN EN ISO 21920-3 a ČSN EN ISO 4288

Dříve byly rozlišovány dva typy profilů – periodický a neperiodický, nově tyto dva profily ve vztahu k postupu vyhodnocování textury povrchu nejsou rozlišovány. Podle staré normy existovala různá výchozí nastavení pro profil periodický a neperiodický a o charakteristice profilu bylo rozhodnuto. Vzhledem k tomu, že se charakteristika profilu může měnit (během výroby), tak byl zaveden jeden jedinečný postup pro všechny typy profilů.

Další změna se týká nedokonalostí a vad povrchu, kdy ve staré normě docházelo ke konfliktu pravidel. Povrchové vady sice nebyly brány v úvahu, avšak měření muselo být provedeno na části povrchu, u které byly očekávány kritické hodnoty. Problém nejednoznačnosti tedy byl v nové normě vyřešen tím, že povrchové nedokonalosti a vady jsou brány jako součást povrchu a musí být zohledněny při určování umístění profilu (pokud není zaveden jiný požadavek).

Poslední změnou je nastavení výchozího prostředí. Dříve byla základem pro výchozí nastavení efektivní výška měřené součásti, kdy pro jednotlivé typy profilů byla určena doporučená hodnota mezní vlnové délky cut-off odhadem z tabulek. Nyní je výchozí nastavení nezávislé na výšce a charakteristice profilu [15].

2.4 Chyby a nejistoty měření

Při měření může dojít k chybám, které vzniknou vlivem různých faktorů (např. v důsledku podmínek při měření a jejich změn, chyb při odečítání hodnot, špatné kalibrace stroje atd.), proto při měření nemůžeme s jistotou zjistit skutečnou hodnotu měřené veličiny. Pokud tedy při měření chceme určit, jak moc se naměřené hodnoty odchylují od skutečnosti, je nutné stanovit chybu měření dle vztahu (17). V případě, že naměřená hodnota je větší než pravá, je chyba kladná a od měřené hodnoty je odečtena. Chyby v průběhu měření lze dělit dle způsobu výskytu do tří kategorií: hrubé chyby, systematické chyby a náhodné chyby [17].

$$\varepsilon = y - x_0 \quad (17)$$

kde	ε	absolutní chyba
	y	naměřená hodnota
	x_0	pravá hodnota

Hrubé chyby

Hrubou chybu je možné odhalit. Může být způsobena nesprávně nastaveným měřidlem, špatně zvoleným měřidlem nebo nedostatečnou zkušeností osoby provádějící měření, která může s měřidlem špatně manipulovat a tím provést nesprávné měření. V případě odhalení příčiny této chyby jsou naměřené hodnoty ovlivněné hrubou chybou vyloučeny ze souboru naměřených hodnot a měření nesmí pokračovat, dokud není příčina chyby odstraněna [17].

Systematické chyby

Systematická chyba je složkou chyby měření stejně jako náhodná chyba. Tato chyba je při opakovaném měření konstantní a lze předvídat její změnu. Je možné ji odhalit změnou podmínek měření, např. provedení měření na jiném přístroji nebo za jiných podmínek. Může se tedy jednat např. o chybu způsobenou měřicí metodou, která mohla být pro dané měření nevhodná [17].

Náhodné chyby

Tato chyba se v průběhu opakovaného měření mění a nemůžeme předvídat její změnu. Je způsobena příčinami náhodného charakteru (může se jednat např. o změnu teploty v místnosti) a ovlivňuje každou naměřenou hodnotu, kvůli čemuž soubor naměřených hodnot vykazuje rozptyl, jehož velikost je úměrná vlivu náhodných chyb [17].

2.4.1 Nejistota měření

Vlivem souhrnu chyb při měření dochází ke zmíněné odchylce od skutečné měřené hodnoty. Z tohoto důvodu zavádíme kvantitativní údaj o kvalitě měřených hodnot – nejistotu měření. Nejistota měření stanovuje interval, který obsahuje naměřenou hodnotu, ale také s určitou pravděpodobností skutečnou hodnotu [17].

Standartní nejistota měření

Tento druh nejistoty měření je vyjádřen pomocí hodnoty směrodatné odchylky $s(\bar{x})$. Při jejím vyhodnocování se nejprve vypočítá standartní nejistota typu A a nejistota typu B. Z těchto dvou nejistot se poté vypočítá kombinovaná standartní nejistota a z kombinované nejistoty je potom možné získat výpočtem rozšířenou nejistotu U [17].

Standardní nejistota typu A

Tato nejistota je způsobena náhodnými faktory, u kterých neznáme příčinu a její hodnotu lze získat opakovaným měřením, kdy její hodnota s počtem měření klesá. Pro její výpočet je nejdříve nutné určit aritmetický průměr měřených hodnot, jehož výpočet je uveden ve vztahu (18). Po získání hodnoty aritmetického průměru je možné, dle vztahu (19), stanovit nejistotu typu A [18].

Uvedený způsob výpočtu je však možné realizovat pouze v případě, že počet naměřených hodnot n je větší než 10. V opačném případě klesá věrohodnost výsledku a je nutné provést korekci pomocí koeficientu k . Korekce se provede, dle uvedeného vztahu (20), vynásobením směrodatné odchylky koeficientem k , který odpovídá příslušnému počtu měření n , podle tabulky 9 [19].

$$x_{bar} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (18)$$

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{bar})^2}{n \cdot (n - 1)}} \quad (19)$$

$$u_A = k \cdot s(x_{bar}) \quad (20)$$

- kde n počet měření
 u_A nejistota typu A
 x_i i-tá naměřená hodnota
 x_{bar} aritmetický průměr naměřených hodnot

Tabulka 9: Koficienty k pro $n < 10$ [19]

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
k	7,0	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1,0

Standartní nejistota typu B

Nejistota typu B nezávisí na počtu měření, jelikož je způsobena známými vlivy, často je tak označována jako „chyba měřícího přístroje“. Mezi známé vlivy můžou ale patřit i jiné, nám známé nejistoty, které nesouvisí s opakovaným měřením. Její hodnota je stanovena geometrickým součtem jednotlivých zdrojů nejistot, které nezávisí na počtu opakovaných měření [18].

Výpočet nejistoty typu B se skládá z následujících kroků:

- 1) Odhad možných zdrojů nejistot Z_j měřené veličiny X . Takovými zdroji mohou být konstanty použité při vyhodnocování, měřící přístroje, podmínky při měření atd.
- 2) Určení nejistoty typu B u každého zdroje např. převzetím hodnot nejistot z technické dokumentace nebo odhadem, kdy je aproximován rozsah odchylek $\pm \Delta z_{max}$ od skutečné hodnoty veličiny tak, aby bylo málo pravděpodobné, že bude překročen.
- 3) Dále je zváženo, které pravděpodobnostní rozdělení nejlépe popisuje frekvenci výskytu hodnot v odhadnutém rozsahu. Podle zvoleného odhadu rozdělení pravděpodobnosti je stanoven z tabulky 10 koeficient k přepočtu mezní hodnoty χ . Poté je možné podle vztahu (21) určit standartní nejistotu typu B od jednotlivých zdrojů u_{z_j} , kde hlavním faktorem ovlivňující nejistotu typu B je rozsah odchylek, resp. maximální dovolená chyba.
- 4) V posledním kroku je pomocí Gaussova zákona šíření nejistot určena výsledná nejistota typu B u_B ze vztahu (22) jako geometrický průměr nejistot jednotlivých zdrojů [19].

$$u_{zj} = \frac{\Delta z_{\max}}{\chi} \quad (21)$$

$$u_B = \sqrt{\sum_{j=1}^m u_{zj}^2} \quad (22)$$

Tabulka 10: Hodnoty koeficientu k přepočtu mezní hodnoty [19]

Koeficient χ	Rozdělení pravděpodobnosti
$\chi = 3$ (2)	Gaussovo (normální) rozdělení
$\chi = \sqrt{3}$	Rovnoměrné (pravoúhlé) rozdělení
$\chi = \sqrt{6}$	Simpsonovo (trojúhelníkové) rozdělení
$\chi = 1$	Diracovo rozdělení (bimodální)
$\chi = \sqrt{2}$	Trojúhelníkové rozdělení (bimodální)
$\chi = 2,04; 2,19; 2,32$	Lichoběžníkové rozdělení

Kombinovaná standartní nejistota

Kombinovanou nejistotu lze získat sloučením standartních nejistot typu A a B, a to pomocí odmocniny součtu kvadrátů u_A a u_B , podle vztahu (23) [18].

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (23)$$

kde u_A standartní nejistota typu A
 u_B standartní nejistota typu B
 u_C kombinovaná standartní nejistota

Rozšířená nejistota

Standartní nejistota vytváří interval pokrývající skutečnou hodnotu měřené veličiny pouze s pravděpodobností $P = 68,27 \%$ [19]. Proto se pro praxi zavádí rozšířená nejistota, která vytváří interval blížící se 100 % pokrytí skutečné hodnoty měřené veličiny. Její výpočet je uveden ve vztahu (24), kde je kombinovaná standartní nejistota vynásobena koeficientem rozšíření, jehož hodnoty jsou uvedeny v tabulce 11. Výslednou rozšířenou nejistotu vždy zaokrouhlujeme směrem nahoru [17]. Výsledek poté bývá zapsán jako $\bar{x} \pm U$ [19].

$$U = k \cdot u_C \quad (24)$$

kde k koeficient rozšíření
 U rozšířená nejistota
 u_C kombinovaná standartní nejistota

Tabulka 11: Hodnoty koeficientu rozšíření [19]

Koeficient rozšíření k	Pravděpodobnost pokrytí [%], za předpokladu normálního rozdělení
1	68,27
2	95,45
3	99,73

3 SYSTÉMOVÝ ROZBOR

3.1 Problémová situace

Součástí výroby technických dílů, na něž je kladen požadavek na texturu povrchu, je kontrola vzorků reprezentujících vyrobený povrch. Tato kontrola probíhá v souladu s normou definující metodiku vyhodnocení textury povrchu. Předpokladem pro přijatelný povrch je splnění požadavků normy. Existují dvě platné normy pro posouzení shody se specifikací, avšak každá z nich vyhodnocuje charakteristiku součásti jinak. Norma ČSN EN 21920-1 stanovuje tři pravidla pro posouzení parametru textury povrchu, tato pravidla však nezohledňují nejistoty měření. To může zapříčinit situaci, kdy textura povrchu bude po vyhodnocení (v souladu s normou) odpovídat specifikaci, avšak nebude vyhovovat požadavkům zákazníka. Druhá norma ČSN EN ISO 14253-1 definuje rozhodovací pravidla pro ověření shody či neshody s tolerančními mezemi s přihlédnutím k nejistotám měření. V případě uvažování nejistot je větší šance pro zajištění spolehlivosti výsledků, které budou odpovídat požadavkům specifikace.

3.2 Vymezení problému

Problémem je tedy návrh vhodné kombinace obou norem tak, aby posuzovaný parametr textury povrchu byl vyhodnocen dle normy ČSN EN ISO 4288 s přihlédnutím k pravidlům podle normy ČSN EN ISO 14253-1. Takto je možné docílit toho, že vyhodnocený povrch bude splňovat požadavky obou norem a nemůže tak dojít k tomu, že by neodpovídal dané specifikaci.

3.3 Formulace cílů a řešení

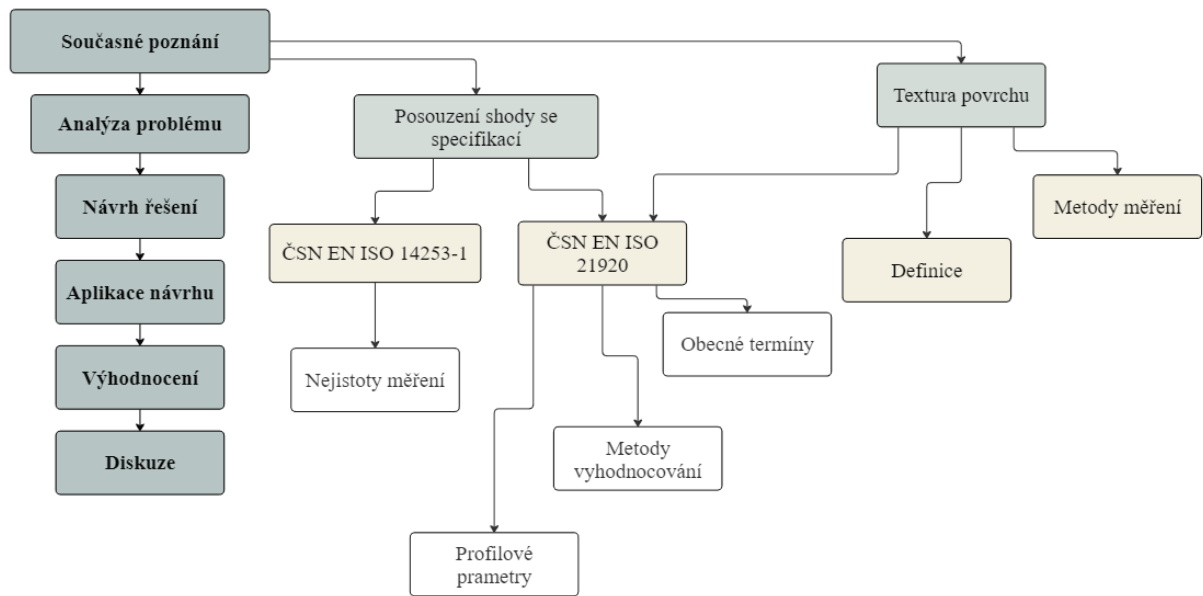
Cíle této BP práce jsou:

- Rešerše současného stavu poznání v oblasti textury povrchu
- Návrh řešení problému
- Realizace návrhu
- Vyhodnocení výsledků
- Doporučení pro další rozvoj

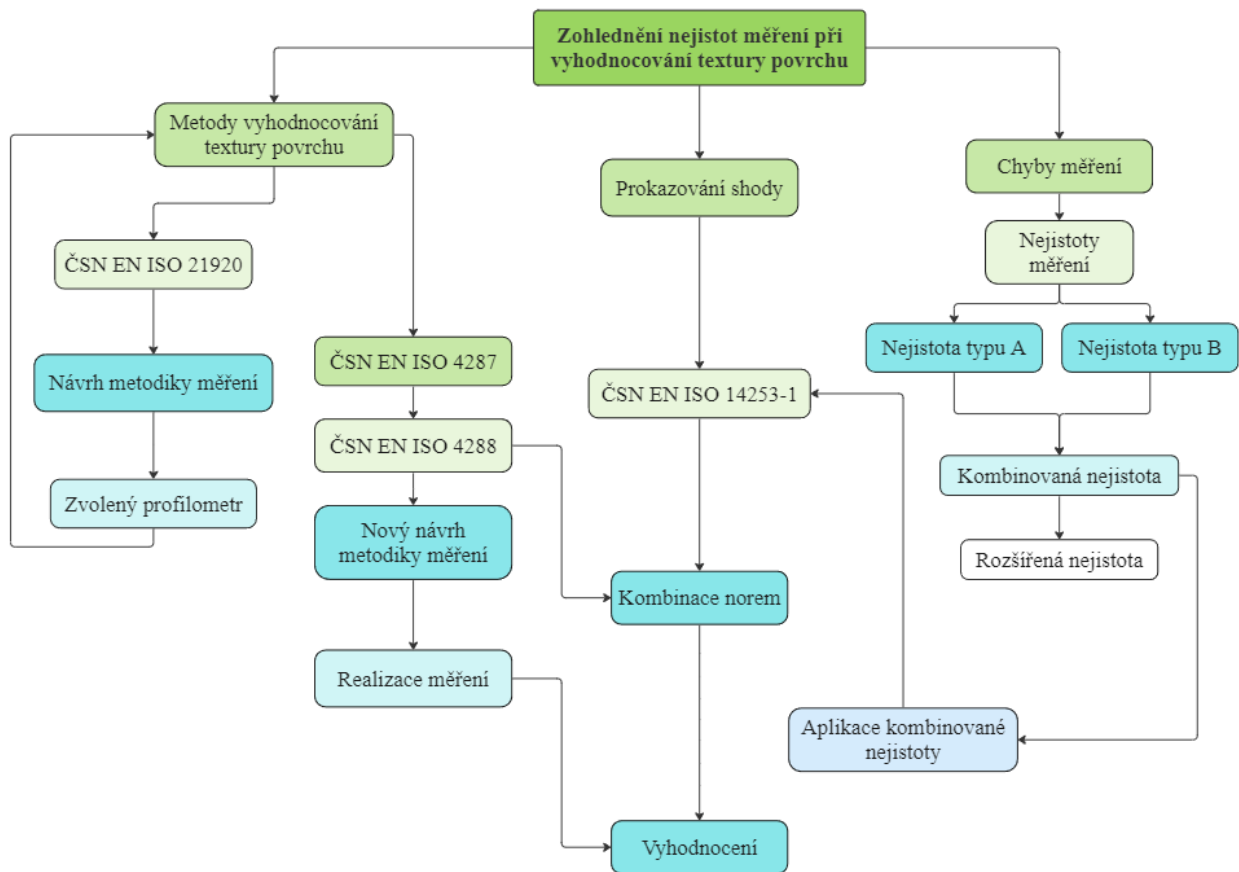
Hlavním cílem této bakalářské práce je návrh možnosti hodnocení parametrů textury povrchu se zohledněním nejistot měření. Nejistoty měření jsou zohledněny běžně u všech vlastností ISO GPS až na texturu povrchu, u které nejsou ani v nových normách (ČSN EN ISO 21920) stále zohledněny. Proto se pro řešení problému nabízí norma ČSN EN ISO 14253-1, ve které jsou určena pravidla pro ověření shody nebo neshody s danou tolerancí pro charakteristiku součásti se zohledněním nejistoty měření.

3.4 Myšlenková mapa

Myšlenková mapa, která je uvedena níže na obrázku 22, mapuje postup při řešení této bakalářské práce. Prvním krokem byla rešerše zadaného tématu, poté bylo možné přistoupit k analýze problému a návrhu jeho řešení s aplikací informací zjištěných v rešeršní části práce. Pro usnadnění práce s návrhem řešení byla vytvořena myšlenková mapa (obrázek 23).



Obrázek 22: Myšlenková mapa při řešení zadání práce



Obrázek 23: Myšlenková mapa při návrhu řešení

4 NÁVRH ŘEŠENÍ

V první řadě je nutné získat hodnoty parametru Ra . K tomu, aby bylo možné vyhodnotit střední aritmetickou výšku podle nové normy, je nutné zajistit program, který to dokáže. V dnešní době takový software sice existuje, ale jeho licence je nákladná nebo časově omezená. Můžeme usoudit, že pro firmy a instituce bude přechod na nový způsob vyhodnocování během tak krátké doby velmi náročný, ať už co se týká pořízení licence, nebo např. zaškolování pracovníků na práci s novým softwarem. Nová norma sice přinesla v některých oblastech problematiky textury povrchu přehlednost a ucelenost, ale přechod na vyhodnocování podle ní bude ještě trvat. Příkladem obtížnosti přechodu na novější požadavky může být i grafické značení textury povrchu na výkresech, kdy se dodnes můžeme setkat se starým značením, které už dávno neplatí, ale mnoho firem jej dodnes používá.

Na Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky FSI, VUT v Brně je dostupný software TalyProfile Lite, který vyhodnocuje parametry podle starší normy ČSN EN ISO 4288, kde se v souladu s normou ČSN EN ISO 4287 parametr Ra počítal dle vztahu uvedeného v tabulce 12. Rozdíl mezi starou a novou normou je v definici a přístupu k výpočtu parametru. U nové normy je měřen tento parametr na hodnocené délce l_e a mluvíme o „*střední aritmetické výšce*“, zatímco u staré normy je měřen tento parametr na základní délce l_r a jednalo se o „*průměrnou aritmetickou odchylku*“ posuzovaného profilu drsnosti. Jelikož ale v obou vztazích pracujeme s určitým integrálem a hodnotami souřadnic, které jsou nespojitými veličinami, je možné pro naše potřeby vyhodnocovat parametr podle starších norem a pokusit se aplikovat na naměřené hodnoty rozhodovací pravidla pro posouzení shody nebo neshody se specifikací podle normy ČSN EN 14253-1, aniž by tento postup měl vliv na výsledek.

Tabulka 12: Rozdíl v definici parametru Ra [2, 6]

	ČSN EN ISO 4287	ČSN EN ISO 21920-2
Název parametru	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu	Střední aritmetická výška
Definice	Aritmetický průměr absolutních hodnot souřadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky l_r .	Aritmetický průměr absolutních hodnot souřadnic $z(x)$ v rozsahu hodnocené délky l_e .
Vztah pro výpočet	$Ra = \frac{1}{l_r} \cdot \int_0^{l_r} Z(x) \cdot dx$	$Ra = \frac{1}{l_e} \cdot \int_0^{l_e} z(x) \cdot dx$

Dále je nutné naměřené hodnoty statisticky zpracovat a pokusit se zohlednit nejistotu měření při vyhodnocování. Toho můžeme dosáhnout kombinací horního a dolního limitu specifikace (USL a LSL) a kombinované standartní nejistoty u_C , která již zahrnuje nejistotu typu A a B (viz kapitola 2.4.1). V dalším kroku potřebujeme zjistit faktor ochranného pásma g_A pro určení pole přijetí. Tento faktor je možné určit pomocí tabelovaných hodnot a parametru $(USL - LSL)/u_C$. V případě pole přijetí je určován horní mezní rozměr a dolní mezní rozměr. Pokud není specifikován dolní mezní rozměr, je jeho hodnota pokládána za nulovou. Horní mezní rozměr pole přijetí je potom určen ze vztahu: $USL - g_A \cdot u_C$.

V případě výpočtu kombinované nejistoty je zapotřebí nejprve vypočítat nejistoty typu A a B. Hodnoty nejistoty typu B budou vypočítány zjednodušeně, jak je uvedeno ve

vztahu (25), kde předpokládáme maximální rozsah odchylek rovný MPE (maximální dovolená chyba měřidla). MPE lze vypočítat jako procentuální podíl z hodnoty měřeného parametru. Pro profilometr použitý dále v práci byla stanovena hodnota $MPE = 3 \%$ z konkrétní hodnoty parametru textury povrchu [20].

$$u_B = \frac{MPE}{\sqrt{3}} \quad (25)$$

Norma ČSN EN ISO 4288 a ČSN 14253-1

V této kapitole je uveden přístup ke kombinaci těchto dvou norem. Nejprve jsou uvedeny metody vyhodnocování podle ČSN EN ISO 4288. Poté jsou popsána pravidla pro posouzení shody se specifikací dle ČSN 14253-1 a následky aplikace těchto pravidel na normu ČSN 4288.

Metody vyhodnocování

Norma ČSN EN 4288 uvádí dvě pravidla pro porovnání měřených hodnot s tolerančními mezemi:

- Pravidlo 16 %: V případě specifikace horní meze parametru, nesmí více než 16 % všech naměřených hodnot daného parametru na vyhodnocované délce překročit tuto hodnotu. Pro požadavky, které jsou specifikovány dolní mezí parametru, nesmí být více než 16 % všech naměřených hodnot parametru na vyhodnocované délce pod touto hodnotou [21]. Mez parametru je přitom dána součtem aritmetického průměru a směrodatné odchylky naměřených hodnot. Takto toto pravidlo stanovuje aplikaci tolerančních mezí na naměřené hodnoty [3].
- Pravidlo maxima: Pokud je specifikována maximální hodnota parametru, tak v průběhu měření vzorku nesmí žádná z naměřených hodnot parametru překročit tuto hodnotu [21].

Posouzení shody se specifikací

Pro posouzení shody nebo neshody se specifikací musí být měřené hodnoty parametru porovnány, podle pravidel ČSN EN ISO 14253-1, se specifikovanými mezními hodnotami se zohledněním nejistot měření. V takovém případě mohou podle [22] nastat tři situace podle:

- měřený parametr bude vyhovovat specifikaci a bude spadat do pole přijetí (viz obrázek 24),
- nebude jí vyhovovat a bude spadat do pole zamítnutí (obrázek 25),
- bude spadat pole nejistoty (obrázek 26), kdy nejsme schopni rozhodnout o výsledku.

Ochranná pásma $g_{LA}, g_{UA}, g_{LR}, g_{UR}$ mají stejnou šířku, jelikož ve většině případů je hustota pravděpodobnosti hodnot měřené veličiny Y považována za symetrickou [23]. Tudíž hodnotu ochranného pásma lze vypočítat dle vztahu (26) jako:

$$g_{LA} = g_{UA} = g_{LR} = g_{UR} = g_A \cdot u_c \quad (26)$$

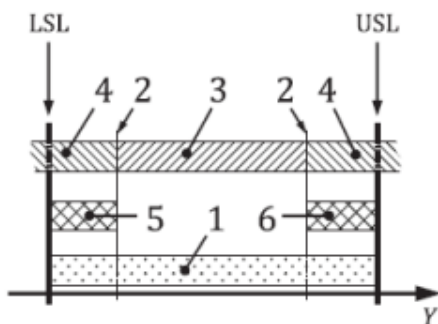
Vzhledem k normě ČSN EN ISO 4288 budou tři zmíněné situace vypadat následovně:

1) Metoda 16 %:

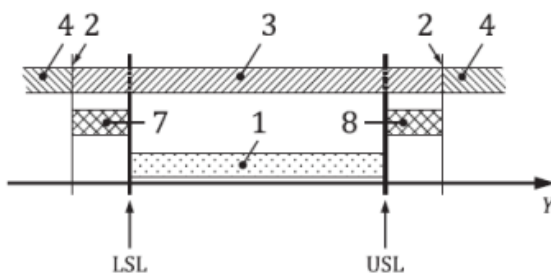
- povrch vyhovuje, pokud platí: $LSL + g_A \cdot u_C < x_{bar} + s_x < USL - g_A \cdot u_C$, kde x_{bar} je aritmetický průměr a s_x směrodatnou odchylkou.
- povrch nevyhovuje, pokud platí:
 $x_{bar} + s_x > USL$, nebo $x_{bar} + s_x < LSL$,
- nejsme schopni rozhodnout, zdali povrch vyhovuje či ne, pokud:
 $USL - g_A \cdot u_C < x_{bar} + s_x < USL$, nebo
 $LSL < x_{bar} + s_x < LSL - g_A \cdot u_C$,

2) Metoda maxima

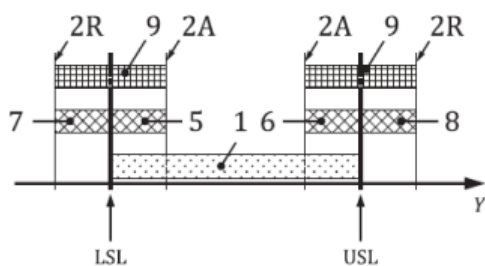
- povrch vyhovuje, pokud platí: $LSL + g_A \cdot u_C < x_{max} < USL - g_A \cdot u_C$,
- povrch nevyhovuje, pokud platí:
 $x_{max} > USL - g_A \cdot u_C$, nebo $x_{max} < LSL + g_A \cdot u_C$.



Obrázek 24: Pole přijetí a zamítnutí při shodě [22]



Obrázek 25: Pole přijetí a zamítnutí při neshodě [22]



Obrázek 26: Pole nejistoty [22]

- 1 Pole specifikace
- 2 Hranice přijetí
- 3 Pole přijetí
- 4 Pole zamítnutí
- 5 Ochranné pásmo LSL g_{LA}
- 6 Ochranné pásmo USL g_{UA}
- Y Hodnota charakteristiky
- LSL Dolní mez specifikace
- USL Horní mez specifikace

- 1 Pole specifikace
- 2 Hranice přijetí
- 3 Pole přijetí
- 4 Pole zamítnutí
- 5 Ochranné pásmo LSL g_{LR}
- 6 Ochranné pásmo USL g_{UR}

- 1 Pole specifikace
- 2A Hranice přijetí
- 2R Hranice zamítnutí
- 5 Ochranné pásmo LSL pro shodu
- 6 Ochranné pásmo USL pro shodu
- 7 Ochranné pásmo LSL pro neshodu
- 8 Ochranné pásmo USL pro neshodu
- 9 Pole nejistoty

5 MĚŘENÍ

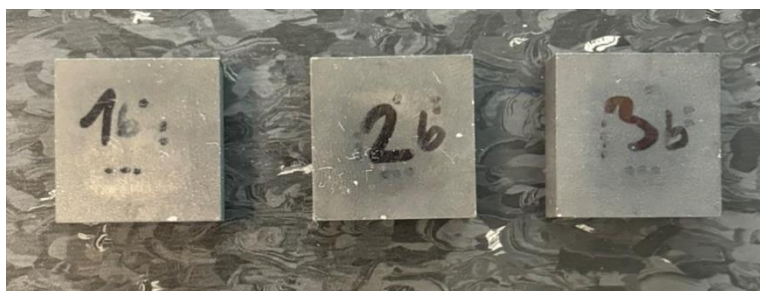
Cílem měření bylo stanovení hodnot Ra pro dále uvedené vzorky. Měření proběhlo, za podmínek uvedených v tabulce 13, na Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky FSI, VUT v Brně pod odborným dozorem Ing. Venduly Sámelové, Ph.D.

Tabulka 13: Podmínky při měření

Teplota	26,2 °C
Tlak	969,1 hPa
Vlhkost	21,7 %

5.1 Měření vzorky

Tři měřené vzorky (viz obrázek 27) byly poskytnuty vedoucí práce Ing. Vendulou Sámelovou, Ph.D. a jsou vyrobeny z infiltrovaného karbidu křemíku SiSiC. Tyto vzorky byly obrobena elektrojiskrovým drátovým řezáním, kde nástrojem byl nepovlakovaný drát z mosazi [24]. Při tomto nekonvenčním způsobu obrábění je materiál odebírán opakujícími se elektrickými výboji mezi obrobkem a elektrodou (drátem), které jsou ponořeny v dielektriku. Jelikož při každém výboji vznikne v místě narušení materiálu kráter, je profil takového obrobku neperiodický [25]. Rozměry vzorků jsou 20x20x7 mm a každý byl vyroben za jiných podmínek, které jsou uvedeny v tabulce 14 [24].



Obrázek 27: Měřené vzorky

Tabulka 14: Podmínky obrábění [24]

	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3
Režim řezání	hrubování	dokončení I	dokončení II
Dielektrikum	deionizovaná voda		
Polarita elektrody	(-)		
Napětí naprázdno U [V]	80	120	80
Pracovní proud výboje I [A]	8	16	16
Doba trvání pulsu t_e [μ s]	1,0	0,2	0,4
Doba pauzy t_o [μ s]	22,0	3,8	3,6
Rychlost posuvu drátu	10,000	4,099	4,000
Rychlost odvíjení drátu	6		
Mechanické napětí drátu [kg]	1,0	1,4	1,4

5.2 Použité měřidlo a pomůcky

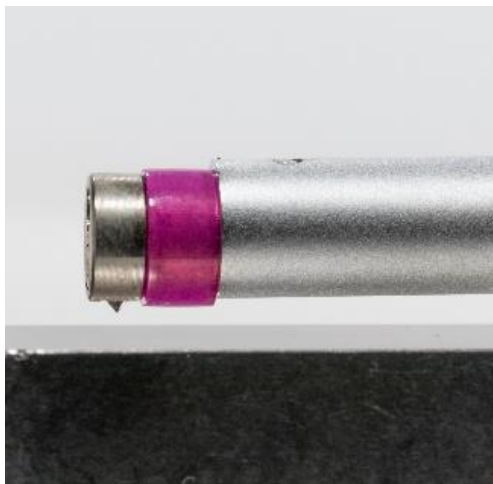
Měření bylo vykonáno pomocí kontaktního profilometru Taylor-Hobson Surtronic 25 na výše uvedených vzorcích, které byly upnuty do malého svěráku pro zamezení jejich pohybu. Dále byla určena hodnota Ra pro každé měření pomocí softwaru TalyProfile Lite.

Taylor-Hobson Surtronic 25

Jedná se o přenosné kompaktní zařízení, které slouží k měření struktury povrchu profilovou metodou. Jeho technické specifikace jsou shrnuty v tabulce 15. Výsledky měření je možné zobrazit rovnou na LCD displeji nebo je možné je převést do počítače. Posuvová jednotka přístroje obsahuje motor, elektroniku pro zpracování naměřených dat, displej a ovládací panel. Motor posouvá snímač po měřeném povrchu a po dokončení měření je snímač vrácen do výchozí polohy. Snímač je vybaven snímacím hrotem (obrázek 28), který v průběhu vertikálního pohybu snímače kopíruje povrch měřené součásti pomocí vodící patky, resp. opěrky. V průběhu vertikálního pohybu je zaznamenáván horizontální pohyb hrotu (vzhledem k vodící patce) jako elektrický signál, který je následně převeden na signál digitální. Horizontální pohyb je v tomto případě vyvolán texturou měřeného povrchu. Vodící patka musí mít dostatečný poloměr zaoblení, aby nedocházelo ke kopírování profilu drsnosti, a vytvořila se tak základna vystihující obecný tvar měřeného povrchu. Dále vodící patka filtruje vlnitost povrchu, která je větší než poloměr patky. Snímací hrot je vyroben z diamantu a v případě měření s hrotem z tohoto materiálu je nutné klást důraz na to, aby poloměr hrotu byl dostatečně malý. V případě, že není poloměr dostatečně malý, může docházet k vynechávání míst s úzkými prohlubněmi na povrchu měřené součásti a následné mechanické filtraci některých dat [20].

Tabulka 15: Technické specifikace Taylor-Hobson Surtronic 25 [20]

Parametr	Hodnota
Pojezdová rychlost	1 mm/s
Hodnoty cut-off	0,25 mm; 0,8 mm; 2,5 mm
Vyhodnocované délky	0,25 mm; 0,8 mm; 2,5 mm; 4 mm; 8 mm; 12,5 mm; 25 mm
Volitelný rozsah	10 μm ; 100 μm ; 300 μm
Rozlišení horizontální	0,5 μm pro délky < 8 mm; 1 μm pro délky > 8 mm
Rozlišení vertikální	10 nm
Vyhodnocované parametry drsnosti	$Ra, Rz, Rt, Rp, Rmr, Rpc, RSm, Rz1max, Rsk, Rda$
Poloměr měřicího doteku	5 μm



Obrázek 28: Snímač s hrotem a vodící patkou [20]

5.3 Metodika měření

V prvním kroku byla provedena kalibrace přístroje (obrázek 29) podle doporučení výrobce na referenčním vzorku (obrázek 30). V dalším kroku byl zkušební vzorek upevněn do svěráku a na profilometru byl zapnut přenos dat do počítače pomocí dumping módu. Dále byla zvolena měřená délka ve shodě s postupem podle normy ČSN EN ISO 4288, kdy byl odhadnut mezní filtr cut-off pro nastavení měřené délky (dále v kapitole 5.3.1).

V případě, že je základní délka specifikována na výkrese, je možné mezní vlnovou délku cut-off λ_c zvolit rovnu dané základní délce. V opačném případě je nutné ji určit pomocí následujícího postupu. Parametry drsnosti jsou měřeny vždy ve směru, kde jsou předpokládány největší hodnoty výškových parametrů, pokud není specifikován směr měření. Zároveň je měření prováděno na části povrchu, kde jsou očekávány kritické hodnoty. Takovou část povrchu může někdo zkušený odhadnout pouhým okem [21].



Obrázek 29: Kalibrace profilometru



Obrázek 30: Referenční vzorek

5.3.1 Postup při volbě filtru

Filtrace povrchu je v metrologii povrchu velmi důležitá, bez ní by nebylo možné získat z naměřených dat potřebné vlastnosti povrchu [26]. V případě, že není na výkrese specifikována základní délka, je nutné dělit povrchy na periodické (např. povrch který byl frézován) a neperiodické (např. broušený povrch). V případě, že by povrchy nebyly takto nerozlišovány, by mohlo dojít k volbě špatného filtru a tím i k naměření špatných hodnot velikosti zjišťovaných parametrů [21]. V našem případě je povrch vzorku neperiodický, tudíž byl zvolen postup pro neperiodický profil drsnosti:

- 1) Nejprve byl přibližně stanoven (pouhým okem nebo srovnáním pomocí srovnávacích vzorků) neznámý parametr Ra , Rz , případně RSm .
- 2) Dále podle odhadnutého parametru byla z tabulky 16 odhadnuta základní délka l_r a filtr cut-off. V případě našeho vzorku byla základní délka zvolena:

$$l_r = 2,5 \text{ mm.}$$

- 3) Na základě odhadnuté základní délky z předchozího kroku byly naměřeny reprezentativní hodnoty pro parametr Ra . Tyto naměřené hodnoty byly srovnány s hodnotami v tabulce 16. Kdyby naměřené hodnoty nespádaly do rozsahu hodnot přiřazených k dané základní délce, byla by zvolena kratší nebo delší základní délka a celé měření by bylo zopakováno a naměřené hodnoty by byly znovu porovnány. V případě, že existují dvě možnosti volby základní délky a filtru cut-off, je doporučováno zvolit kratší základní délku pro přesnější výsledky měření [21].

V případě periodického profilu drsnosti by postup vypadal následovně:

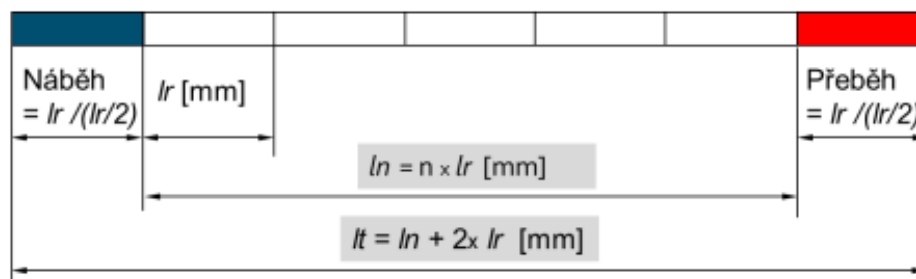
- 1) Odhadnutí hodnoty RSm .
- 2) Určení mezní vlnové délky cut-off z tabulky 16 podle odhadnutého parametru RSm .
- 3) Ve sporném případě naměření hodnoty RSm pomocí zvolené mezní vlnové délky.
- 4) V případě, že by naměřená hodnota RSm odpovídala jiné mezní vlnové délce cut-off, by byla uvažována nová naměřená hodnota za správnou.

5) Vyhodnocení žádaných parametrů podle mezního filtru určeného v předchozích krocích [21].

Jelikož základní délka byla zvolena $l_r = 2,5$ mm, potom vyhodnocovaná délka l_n je rovna 12,5 mm a celková délka snímání $l_t = 15$ mm, podle obrázku 31. Měřená délka na profilometru byla zvolena 16 mm, přičemž v softwaru z ní byla vyříznuta celková délka snímání. Měření bylo uskutečněno celkem třicetkrát, z toho desetkrát pro každý vzorek. Po celou dobu měření byl vzorek vždy upnut do svěráku a nastaven tak, aby vodící patka snímače byla podepřena o vzorek a hrot byl na kraji vzorku (obrázek 32). Na konci každého měření byl daný vzorek lehce posunut, aby byl naměřen přesný obraz celého povrchu.

Tabulka 16: Volba základní délky [21]

Průměrná aritmetická úchylka profilu R_a	Největší výška profilu R_z	Průměrná šířka prvků profilu R_{Sm}	Základní délka drsnosti l_r	Vyhodnocovaná délka drsnosti l_n	Cut-off λ_c
[μm]	[μm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
(0,006; 0,02)	(0,025; 0,1)	(0,013; 0,04)	0,08	0,4	0,08
(0,02; 0,1)	(0,1; 0,5)	(0,04; 0,13)	0,25	1,25	0,25
(0,1; 0,2)	(0,5; 10)	(0,13; 0,4)	0,8	4	0,8
(2; 10)	(10; 50)	(0,4; 1,3)	2,5	12,5	2,5
(10; 80)	(50; 200)	(1,3; 4)	8	40	8



l_r [mm] - základní délka profilu drsnosti
 l_n [mm] - vyhodnocovaná délka profilu ($l_n = n \times l_r$)
 l_t [mm] - celková délka snímání ($l_t = l_n + 2 \times l_r$) – Mahr, Mitutoyo
 $l_t = l_n + l_r$ – Taylor Hobson
 n [mm] - počet základních délek 5 (1,2,3,4)

Přeběh = l_r [mm]
 Náběh = l_r [mm]

Obrázek 31: Celková délka snímání [20]

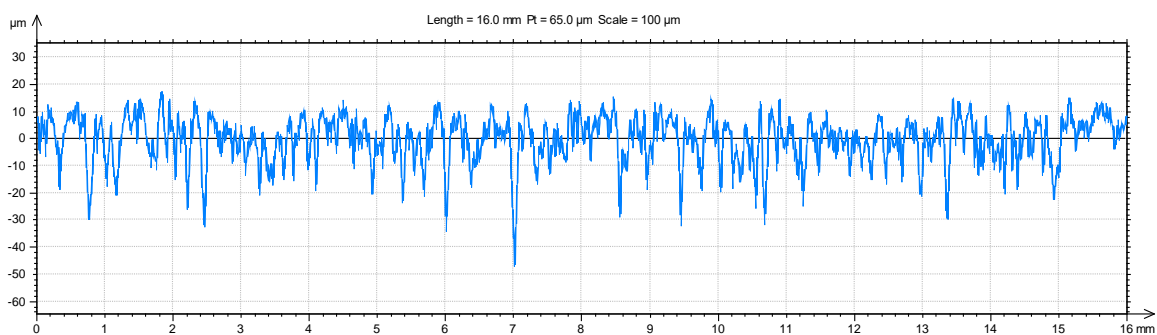


Obrázek 32: Nastavení snímače na povrchu vzorku

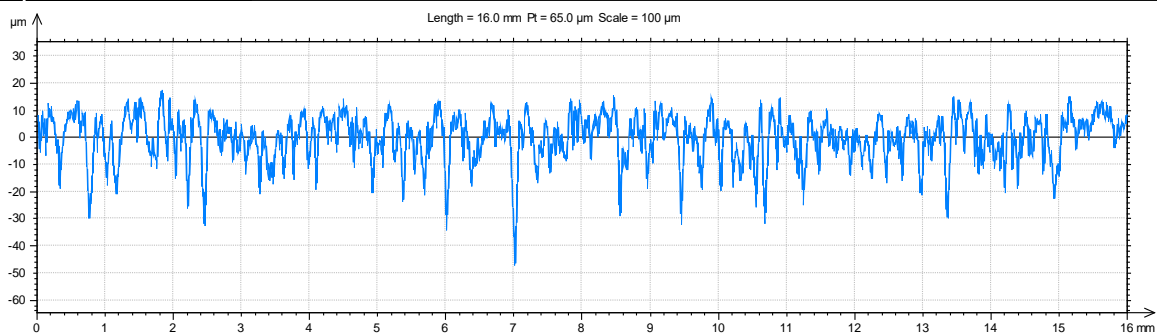
5.3.2 Naměřené hodnoty

Další postup vyhodnocování probíhal v softwaru TalyProfile Lite:

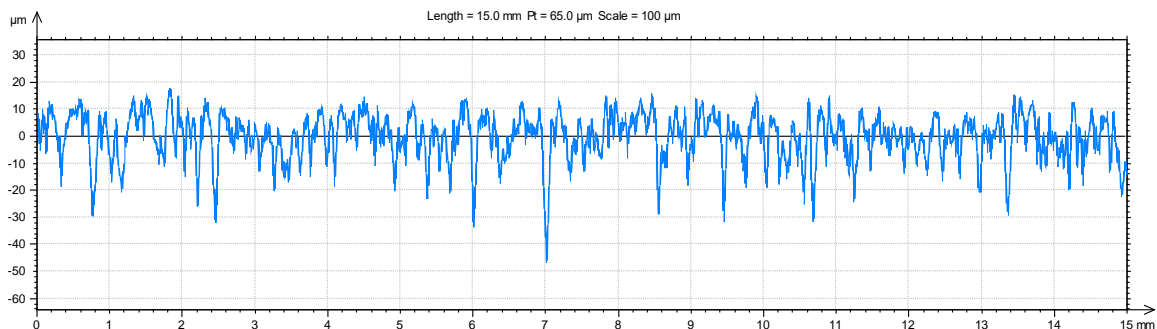
- 1) Na naměřený povrch, který je zobrazen na obrázku 33, byla použita funkce vyrovnání „levelling“ (viz obrázek 34).
- 2) Pomocí funkce přiblížení, tzv. „zooming“, byla vyříznuta celková délka snímání $l_t = 15$ mm, zobrazeno na obrázku 35.
- 3) V předposledním kroku byly zobrazeny profily drsnosti a vlnitosti pro zvolený **filtr cut-off 2,5 mm**, zobrazeny na obrázku 36.
- 4) V neposlední řadě byly určeny, funkcí programu pro vygenerování tabulky parametrů (obrázek 37), hodnoty parametrů drsnosti. Pro informaci o tom, jak povrch skutečně vypadá, byly ponechány v tabulce parametry základního profilu, jelikož parametry drsnosti nezahrnují vlnitost povrchu. Naměřené hodnoty pro parametr Ra jsou uvedeny v tabulce 17.



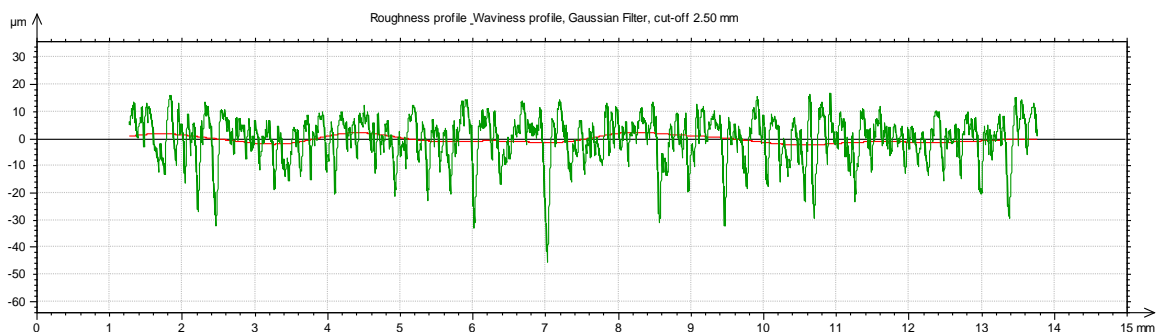
Obrázek 33: Naměřený povrch



Obrázek 34: Vyrovnání naměřeného povrchu



Obrázek 35: Vyřiznutí celkové délky snímání



Obrázek 36: Zobrazení profilu drsnosti a vlnitosti

ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rp	15.5	µm	Gaussian filter, 2.5 mm
Rv	34.7	µm	Gaussian filter, 2.5 mm
Rz	50.2	µm	Gaussian filter, 2.5 mm
Rt	62.8	µm	Gaussian filter, 2.5 mm
Ra	6.51	µm	Gaussian filter, 2.5 mm
Amplitude parameters - Primary profile			
Pt	65.0	µm	
Pa	6.82	µm	
Pz	65.0	µm	
Pv	46.7	µm	
Pp	18.3	µm	

Obrázek 37: Tabulka naměřených parametrů

Tabulka 17: Naměřené hodnoty

První vzorek		Druhý vzorek		Třetí vzorek	
Číslo měření	Ra [μm]	Číslo měření	Ra [μm]	Číslo měření	Ra [μm]
1	6,51	1	4,23	1	4,21
2	7,23	2	3,97	2	3,99
3	7,35	3	4,38	3	3,81
4	7,09	4	4,79	4	3,7
5	7,07	5	5,22	5	4,13
6	7,78	6	4,4	6	3,54
7	6,86	7	4,26	7	4,14
8	8,41	8	4,76	8	3,79
9	6,85	9	4,6	9	4,23
10	6,19	10	4,74	10	3,89

6 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

V případě měřených vzorků nebyla předepsána specifikace. Aby nastaly všechny možné situace, které mohou v průběhu vyhodnocování parametru nastat, byla zvolena horní mez specifikace $USL = 5 \mu\text{m}$. V průběhu vyhodnocování byly podstoupeny tyto kroky:

- 1) statistické zpracování dat,
- 2) vyhodnocení dle ČSN EN ISO 4288,
- 3) výpočet nejistot měření,
- 4) vyhodnocení v souladu s ČSN EN ISO 14253-1.

Pro ukázkou jednotlivých kroků v průběhu vyhodnocování jsou uvedeny výpočty pro vzorek 1 v kapitole 6.1.

6.1 Vzorek 1

6.1.1 Statistické zpracování dat

Za účelem další analýzy je nezbytné provést statistické zpracování naměřených dat. V první řadě byla určena maximální a minimální hodnota souboru naměřených hodnot:

$$x_{max} = \max(x_1, x_2, \dots, x_n) = 8,41 \mu\text{m},$$

$$x_{min} = \min(x_1, x_2, \dots, x_n) = 6,19 \mu\text{m}.$$

Následně byl proveden výpočet aritmetického průměru, dle vztahu (18):

$$x_{bar} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{10} \cdot 71,34 = 7,13 \mu\text{m},$$

$$\text{kde } \sum_{i=1}^n x_i = 71,34 \mu\text{m}.$$

Pomocí aritmetického průměru je možné vypočítat výběrovou směrodatnou odchylku:

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{bar})^2}{(n-1)}} = \sqrt{\frac{3,54}{(10-1)}} = 0,63 \mu\text{m},$$

$$\text{kde } \sum_{i=1}^n (x_i - x_{bar})^2 = 3,54 \mu\text{m}.$$

6.1.2 Vyhodnocení dle ČSN EN ISO 4288

Metoda 16 %

V případě vyhodnocení naměřených hodnot podle metody 16 % nesmí více než 16 % všech naměřených hodnot parametru na vyhodnocované délce překročit hodnotu specifikace, aby byl splněn požadavek normy ČSN EN ISO 4288: $x_{bar} + s_x < USL$, kde $x_{bar} + s_x$ určuje rozptyl měřených dat od průměrné hodnoty:

$$x_{bar} + s_x = 7,76 \mu\text{m},$$

$$7,76 \not< 5.$$

Z důvodu, že $x_{bar} + s_x$ není menší než horní mez specifikace, je možné prohlásit, že vzorek 1 **nevyhovuje** dané specifikaci podle této metody. Tohoto je si možné všimnout i na grafu 5, kde $x_{bar} + s_x$ a všechny naměřené hodnoty leží nad USL .

Metoda maxima

V případě porovnání naměřených dat s metodou maxima se porovná maximální hodnota souboru dat x_{max} s horní mezí specifikace USL . Aby kritérium normy bylo splněno musí být maximální hodnota menší:

$$x_{max} < USL, \\ 8,41 < 5,$$

což není splněno, dokonce ani jedna naměřená hodnota parametru nespĺňuje specifikaci, a proto vzorek podle této metody **nevyhovuje**.

6.1.3 Výpočet nejistot měření

Nejprve byla vypočítána nejistota typu A, která se počítá dle vztahu (19):

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{bar})^2}{n \cdot (n-1)}} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} = \frac{0,63}{\sqrt{10}} = 0,20 \mu\text{m}.$$

Dále je pro výpočet nejistoty typu B, podle vztahu (25), nutné určit maximální možnou odchylku MPE , která je rovna 3 % z průměrné hodnoty měřeného parametru x_{bar} :

$$MPE = x_{bar} \cdot \frac{3}{100} = 7,13 \cdot \frac{3}{100} = 0,21 \mu\text{m}, \\ u_B = u_{MPE} = \frac{MPE}{\sqrt{3}} = \frac{0,21}{\sqrt{3}} = 0,12 \mu\text{m}.$$

Po výpočtu obou nejistot typu A a B je možné vypočítat ze vztahu (23) kombinovanou nejistotu:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0,20^2 + 0,12^2} = 0,233 \mu\text{m} \cong 0,23 \mu\text{m}.$$

Z kombinované nejistoty se v posledním kroku vypočítá rozšířená nejistota, podle vztahu (24), kde byl koeficient rozšíření zvolen $k = 2$ (z tabulky 11), pro výpočet intervalu s pravděpodobností 95,45 % pokrytí skutečné hodnoty:

$$U (k = 2) = k \cdot u_C = 2 \cdot 0,233 \cong 0,47 \mu\text{m}.$$

Výsledek je poté možné zapsat jako: $x_{bar} \pm U = (7,13 \pm 0,47) \mu\text{m}$.

6.1.4 Vyhodnocení dle ČSN EN ISO 14253-1

Pro vyhodnocení měřeného povrchu dle normy ČSN EN ISO 14253-1 je nezbytné stanovit faktor ochranného pásma g_A pomocí hodnot $(USL - LSL)/u_C$ z tabelovaných údajů, které jsou uvedeny v příloze B (tabulka B1). V případě tohoto povrchu dolní mez specifikace je rovna 0 a faktor ochranného pásma je roven 1,65. Pro pole přijetí postačuje v tomto případě (kdy $LSL = 0$) vypočítat pouze horní mezní rozměr jako:

$$USL - g_A \cdot u_C = 4,61 \mu\text{m}.$$

Po těchto výpočtech je možné vyhodnotit naměřená data dle navrhovaného řešení (uvedeného v kapitole 4) podle normy ČSN EN ISO 14253-1 s přihlédnutím k pravidlům daným v normě ČSN EN ISO 4288.

Metoda 16 %

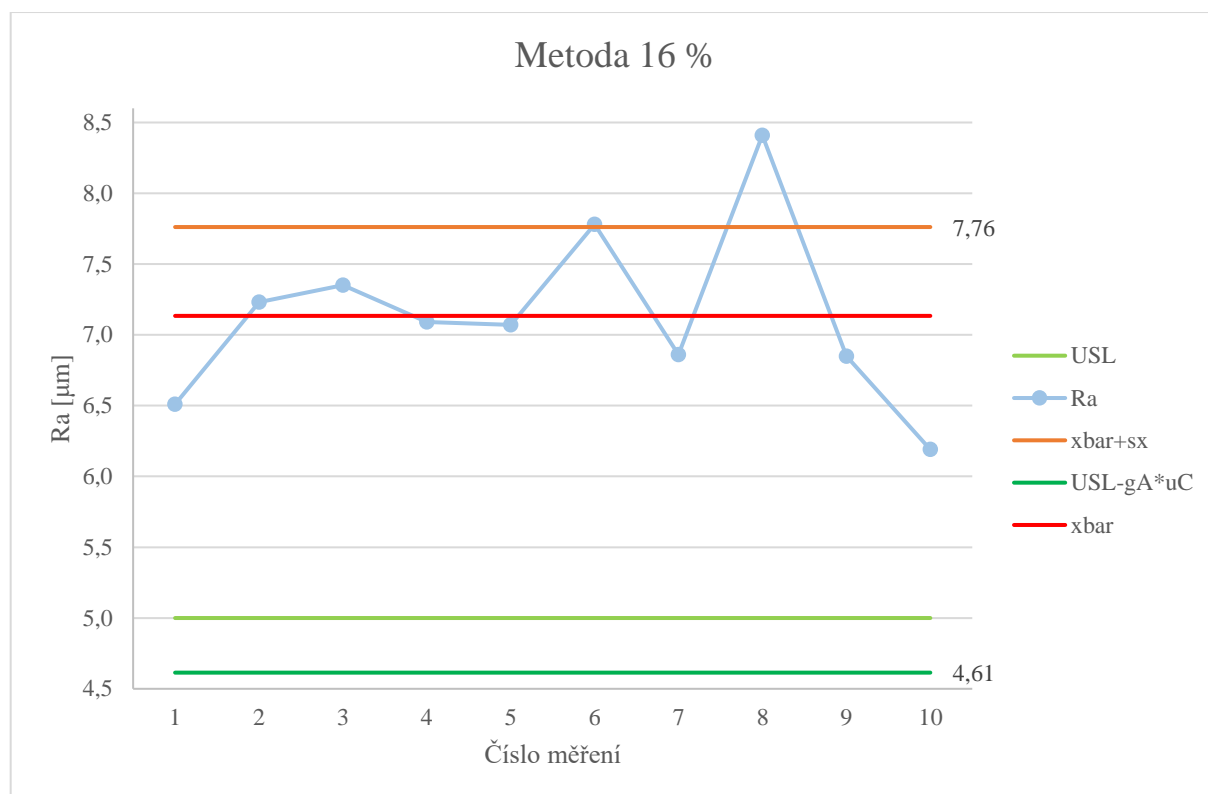
Podle metody 16 % povrch vyhovuje v případě že:

$$x_{bar} + s_x < USL - g_A \cdot u_C,$$

avšak v případě vzorku 1 toto neplatí:

$$7,76 < 4,61.$$

Vzorek 1 tedy **nevyhovuje** této metodě, jak si můžeme všimnout na grafu 5, hodnota $x_{bar} + s_x$ leží výrazně nad hranicí pole přijetí – přesněji o 3,15 μm .



Graf 5: Vyhodnocení vzorku 1 pro metodu 16 %

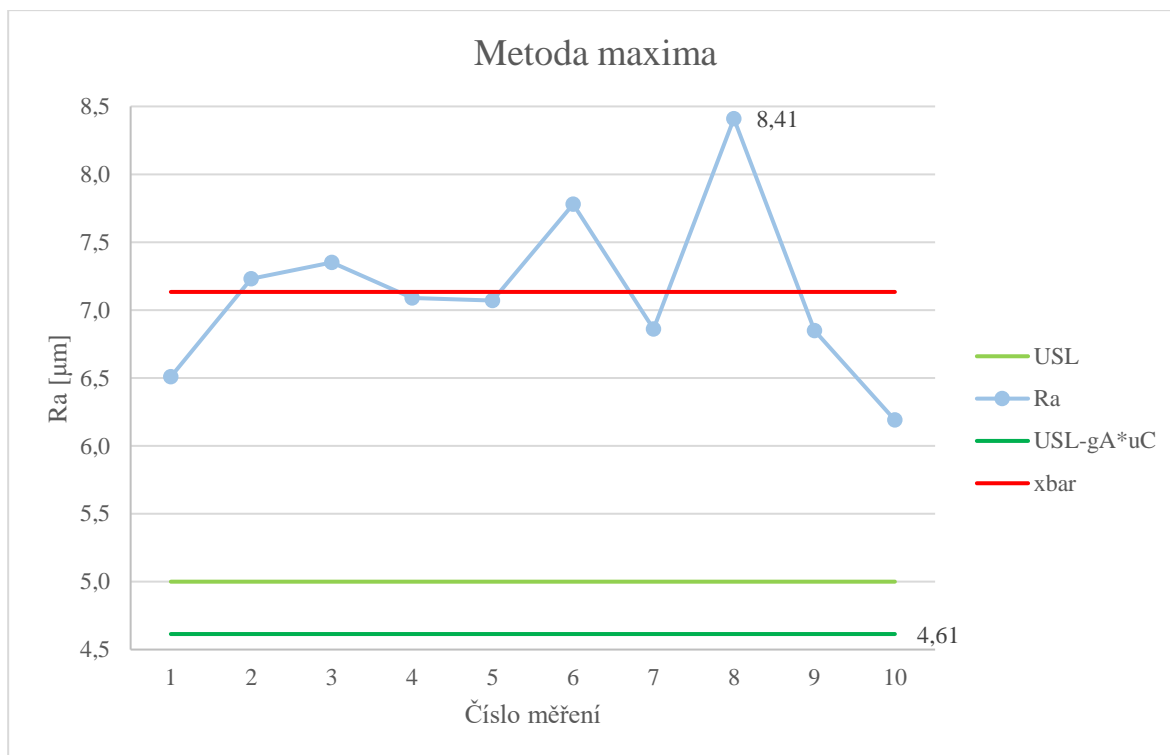
Metoda maxima

V případě této metody by vzorek vyhovoval pouze v případě, že by maximální hodnota z naměřených hodnot parametru ležela pod polem přijetí: $x_{max} < USL - g_A \cdot u_C$.

Jak je možné si všimnout z grafu 6, toto kritérium **není splněno** a tato hodnota leží nad polem přijetí:

$$\begin{aligned}
 x_{max} &> USL - g_A \cdot u_C, \\
 8,41 &> 4,61.
 \end{aligned}$$

Vzorek 1 tedy **nevyhovuje** metodě maxima, jelikož x_{max} je o 3,8 μm větší, než je hranice pole přijetí.



Graf 6: Vyhodnocení vzorku 1 pro metodu maxima

6.2 Vzorek 2

6.2.1 Vyhodnocení dle ČSN EN ISO 4288

Metoda 16 %

Jelikož hodnota $x_{bar} + s_x$ je menší, než hodnota předepsané specifikace USL :

$$4,89 < 5.$$

Je možné dospět k závěru, že vzorek 2 splňuje podmínky metody 16 % a **vyhovuje** specifikaci.

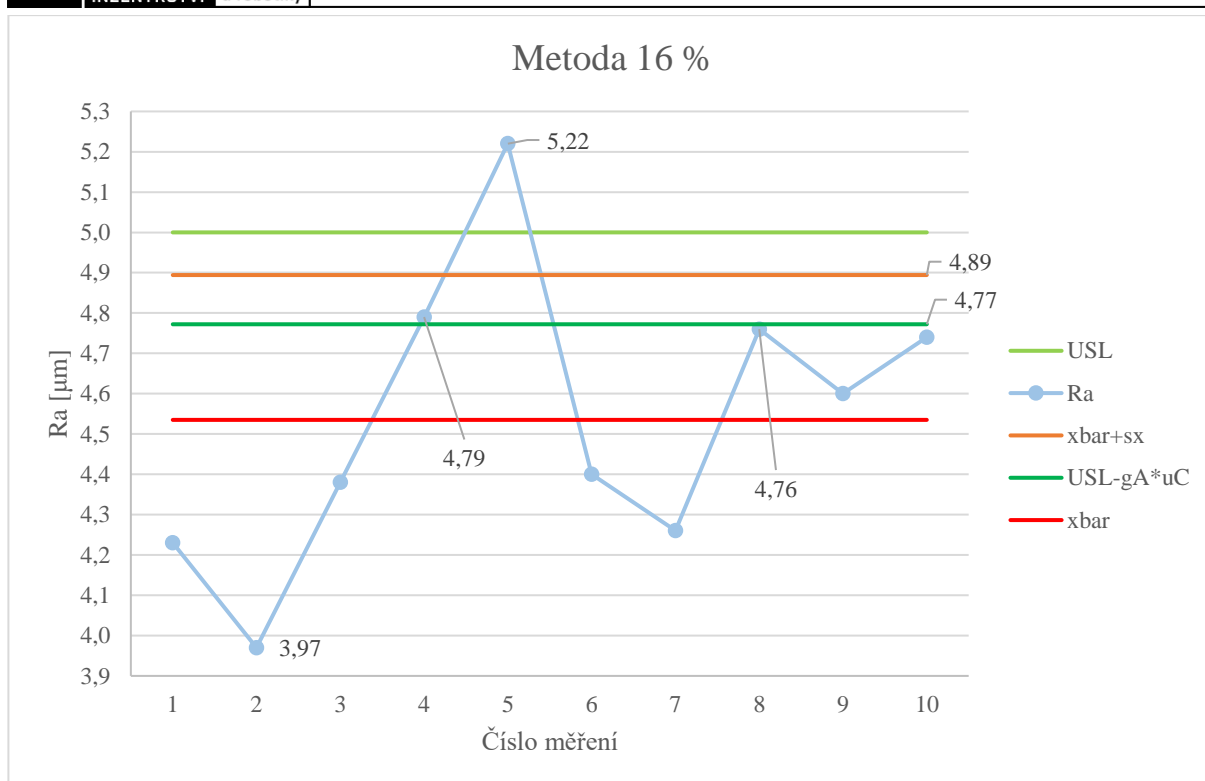
Metoda maxima

Při aplikaci metody maxima lze konstatovat, že vzorek **nevyhovuje** specifikaci, jelikož jedna z naměřených hodnot převyšuje specifikaci o 0,22 µm, všechny ostatní naměřené hodnoty leží vždy pod hodnotou specifikace, jak je možné si všimnout v grafu 8.

6.2.2 Vyhodnocení dle ČSN EN ISO 14253-1

Metoda 16 %

Při aplikaci metody 16 % zkombinovanou s kritérii hodnocení parametru dle ČSN EN ISO 14253-1 měřený vzorek by nevyhovoval specifikaci, jelikož hodnota $x_{bar} + s_x$ (zobrazena v grafu 7) leží 0,12 µm nad horní hranicí pole přijetí – $USL - g_A \cdot u_C$. Nicméně $x_{bar} + s_x$ je zároveň menší než předepsaná horní mez specifikace o 0,11 µm. Jak bylo uvedeno v kapitole 4, v takovém případě **nejme schopni rozhodnout**, zdali povrch vyhovuje nebo nevyhovuje specifikaci.



Graf 7: Vyhodnocení vzorku 2 pro metodu 16 %

Metoda maxima

Jak lze pozorovat na grafu 8, maximální naměřená hodnota povrchu vzorku leží nad polem přijetí, které má o 0,45 µm menší hodnotu, tudíž vzorek 2 **nevyhovuje** podle této metody specifikaci.



Graf 8: Vyhodnocení vzorku 2 pro metodu maxima

6.3 Vzorek 3

6.3.1 Vyhodnocení dle ČSN EN ISO 4288

Metoda 16 %

Podle této metody vzorek 3 **vyhovuje** specifikaci, protože hodnota $x_{bar} + s_x$ je menší (o 0,82 μm), než horní mez specifikace USL , jak je možné vidět na grafu 9.

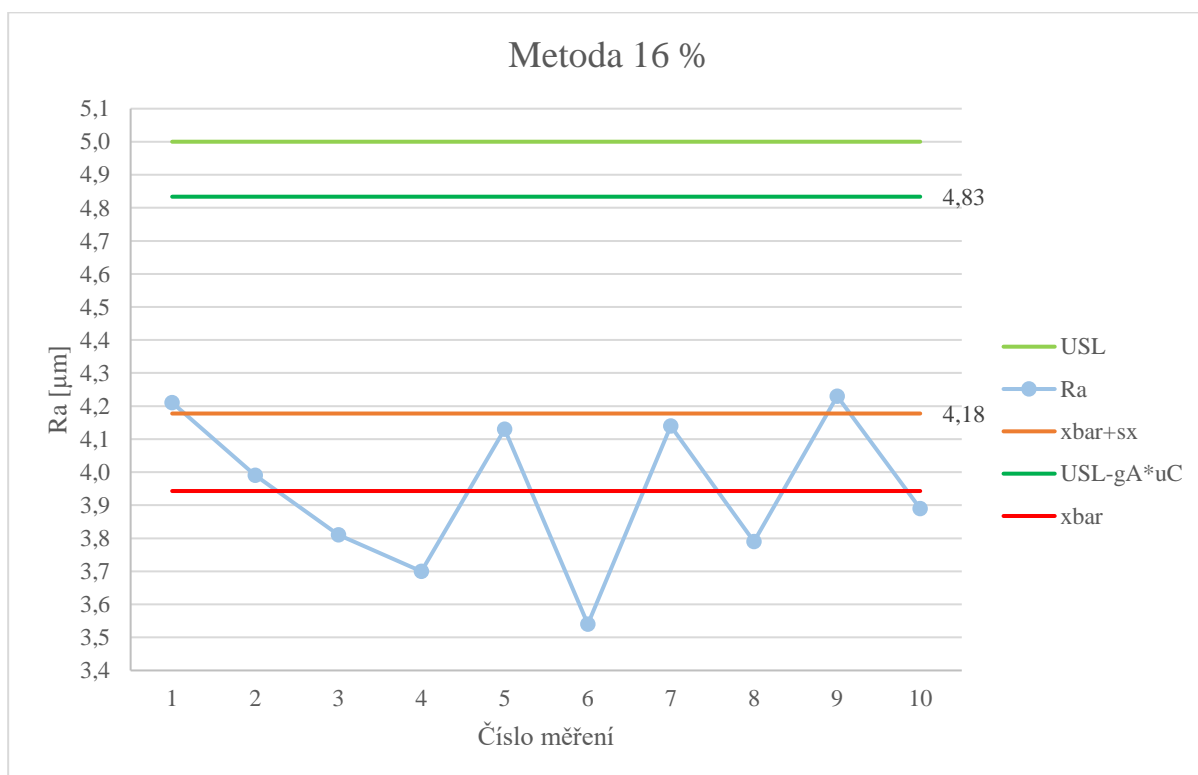
Metoda maxima

Pro případ metody maxima **vyhovuje** vzorek 3 specifikaci, jelikož hodnota USL je o 0,77 μm větší než x_{max} z naměřených dat pro tento vzorek, jak je vidět na grafu 10.

6.3.2 Vyhodnocení dle ČSN EN ISO 14253-1

Metoda 16 %

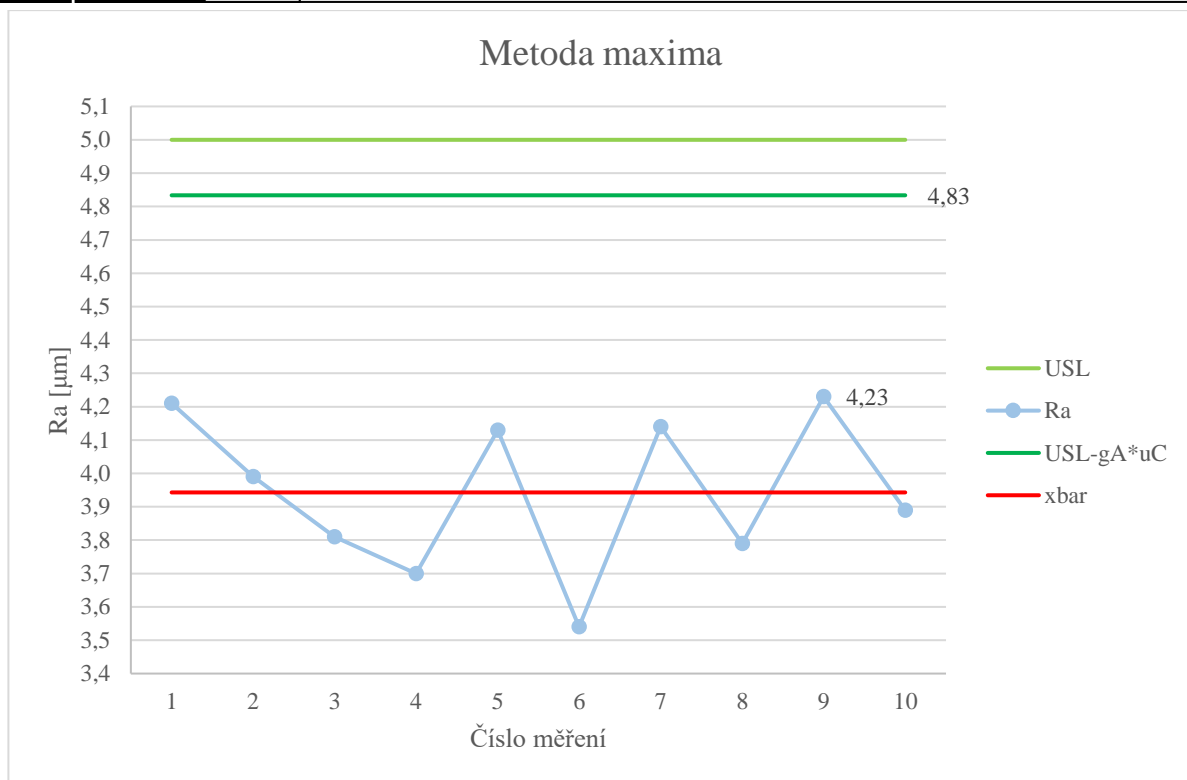
Vzorek 3 při metodě 16 % se zahrnutím pravidel podle ČSN EN ISO 14253-1 **vyhovuje** specifikaci, jak je možné vidět na grafu 9, neboť hodnota $x_{bar} + s_x$ je o 0,65 μm menší než hodnota $USL - g_A \cdot u_C$, která je rovna 4,83 μm .



Graf 9: Vyhodnocení vzorku 3 pro metodu 16 %

Metoda maxima

Na grafu 10 je možné vidět, že horní hranice pole přijetí je rovna 4,83 μm a maximální naměřená hodnota odpovídá 4,23 μm . Z toho lze konstatovat, že vzorek 3 **vyhovuje** specifikaci, jelikož splňuje podmínky normy ČSN EN ISO 4288 i ČSN EN ISO 14253-1.



Graf 10: Vyhodnocení vzorku 3 pro metodu maxima

7 DISKUZE

Z údajů uvedených v tabulce 18 je zřejmé, že metoda hodnocení dle ČSN EN ISO 4288 je tolerantnější, jak si můžeme povšimnout u vzorku 2. V tomto případě vzorek vyhovuje specifikaci dle ČSN EN ISO 4288 pro metodu 16 %, ale v případě vyhodnocování podle pravidel ČSN EN ISO 14253-1 nejsme schopni rozhodnout, jestli specifikaci vyhovuje nebo nevyhovuje. Tento jev je způsoben tím, že při použití normy ČSN EN ISO 4288 je limitní hodnotou, se kterou jsou porovnány hodnoty $x_{bar} + s_x$ a x_{max} , pouze horní mez specifikace. V případě kombinace metod z normy ČSN EN ISO 4288 a pravidel vyhodnocování z ČSN EN ISO 14253-1 ale dochází k tomu, že hodnota, se kterou vybrané hodnoty porovnáváme, je horní mezní rozměr pole přijetí, který má menší hodnotu než hodnota specifikace, tudíž je tato metoda přísnější.

Stejně téma práce bylo řešeno v bakalářské práci „*Hodnocení profilových parametrů textury povrchu a posouzení shody se specifikací na výkrese.*“ od D. Kupského [27]. V případě minulé práce byl měřen pouze jeden vzorek pro tři různé specifikace. V této práci jsou měřeny vzorky tři a byl vyvozen závěr, že v případě uvažování nejistot měření jsou výsledky přesnější a zamezí se tvorbě zmetků [27]. S tímto závěrem částečně nesouhlasím. V případě uvažování nejistot měření pouze získáme představu o nepřesnosti měření a ano, jsme schopni získat přesnější výsledky, než kdybychom nejistoty měření nezahrnovali do měření. Ale nejistoty měření nám přímo neudávají, jestli textura povrchu vyhovuje nebo ne. Postup pro určení shody se specifikací udávají normy – ČSN EN ISO 14253-1 a ČSN EN ISO 21920 (v našem případě nahrazená normou ČSN EN ISO 4288 a ČSN EN ISO 4287). V případě, kdy uvažujeme pouze normu ČSN EN ISO 4288 existuje možnost, že vzorek, který nemusí odpovídat specifikaci, projde kontrolou. To se v této práci i potvrdilo ve výše zmíněném případě u vzorku 2. Pokud tuto normu zkombinujeme s pravidly pro vyhodnocování podle normy ČSN EN ISO 14253-1, která zohledňuje nejistoty měření (při určování hranice pole přijetí), toto riziko snižujeme. Proto je spíše přesnější uvést, že v případě uvažování více přístupů k vyhodnocování povrchu může být předejito schválení součásti, která neodpovídají specifikaci.

Vzorek 2 byl měřen i v práci D. Kupského. V případě tohoto vzorku byly naměřené hodnoty a hodnota specifikace odlišné. Jediné metodě, které vyhověl tento vzorek (v případě specifikace $USL = 4,9 \mu\text{m}$), byla metoda 16 % v souladu s ČSN EN ISO 4288, pro případ metody 16 % se zohledněním pravidel dle ČSN EN ISO 14253-1 bylo rozhodnuto, že metodě nevyhověl [27]. V našem případě nejsme schopni rozhodnout, jestli vzorek vyhovuje nebo nevyhovuje specifikaci. V takové situaci je vhodné se podívat na naměřené hodnoty: aritmetický průměr těchto hodnot je roven $4,54 \mu\text{m}$ a dvě hodnoty překročily hranici pole přijetí, z toho čtvrtá hodnota o $0,07 \mu\text{m}$ a pátá hodnota, která je i maximální naměřenou hodnotou, ji překročila o $0,45 \mu\text{m}$, což odpovídá 9 % z předepsané hodnoty specifikace. Vzhledem k tomu, že tyto dvě hodnoty byly měřeny hned po sobě, je vhodné vzorek znovu přeměřit a ujistit se, že se nejedná o nedokonalost povrchu, která byla v průběhu měření přehlédnuta a až poté rozhodnout, jestli specifikaci splňuje nebo ne.

V případě metody maxima pro tento vzorek autor D. Kupský doporučuje sledovat aritmetický průměr naměřených hodnot. Pro případ, kdy je pouze jedna hodnota větší než stanovená hodnota specifikace a aritmetický průměr naměřených hodnot leží pod horní mezí specifikace, doporučuje překontrolování vzorku. V našem případě naměřené hodnoty tohoto

vzorku pouze v jednom případě překročily horní mez specifikace a aritmetický průměr je o 0,11 μm menší než hodnota specifikace. V práci pana Kupského byla hodnota USL pro tento vzorek stanovena v jednom případě na 4,9 μm , kdy specifikace podle metody maxima nebyla splněna, a v druhém případě byla hodnota $USL = 5,5 \mu\text{m}$, kdy vzorek vyhovoval specifikaci. Proto je možné říci, že vzorek nespĺňuje naši specifikaci, ale jeho překontrolování je vhodné, a je tak možné, že by poté splňoval specifikaci [27].

Z výsledků si lze také povšimnout, jaký vliv má zvolená metoda obrábění na výslednou texturu povrchu. V případě vzorku 1, který nespĺnil ani jednu podmínku, se jednalo o hrubování. Vzorek 2, který splnil pouze metodu 16 % pro normu ČSN EN ISO 4288, šlo o dokončování s delší dobou pauzy t_0 a rychlejším posuvem drátu, než jak tomu bylo u vzorku 3 (tabulka 14 v kapitole 5.1), který splnil všechny metody i v případě kombinace norem ČSN EN ISO 4288 a ČSN EN ISO 14253-1. Je možné tedy usoudit, že s vyšší rychlostí posuvu drátu, delší dobou pauzy t_0 získáme vyšší drsnost povrchu v případě elektrojiskrového řezání.

Tabulka 18: Shrnutí výsledků

	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3
x_{max} [μm]	8,41	5,22	4,23
x_{bar} [μm]	7,13	4,54	3,94
$(x_{bar} + s_x)$ [μm]	7,76	4,89	4,18
$U (k = 2)$ [μm]	0,47	0,28	0,20
Výsledek [μm]	7,13±0,47	4,54±0,28	3,94±0,20
USL [μm]	5,00	5,00	5,00
$(USL - g_A \cdot u_C)$ [μm]	4,61	4,77	4,83
ČSN EN ISO 4288			
Metoda 16 %	Nevyhovuje: 7,76>5	Vyhovuje: 4,89<5	Vyhovuje: 4,18<5
Metoda maxima	Nevyhovuje: 8,41>5	Nevyhovuje: 5,22>5	Vyhovuje: 4,23<5
ČSN EN ISO 14253-2 + ČSN EN ISO 4288			
Metoda 16 %	Nevyhovuje: 7,76>4,61	Nevyhovuje: 4,89>4,77	Vyhovuje: 4,18<4,83
Metoda maxima	Nevyhovuje: 8,41>4,61	Nevyhovuje: 5,22>4,77	Vyhovuje: 4,23<4,83

8 ZÁVĚR

V rámci této práce se podařilo shrnout současný stav problematiky hodnocení textury povrchu, která sestává z faktu, že existují dvě normy pro porovnání měřené hodnoty parametru se specifikací. Jedna norma nezohledňuje nejistoty měření a porovnává naměřená data se specifikací pomocí vyhodnocovacích pravidel, která vychází buď z porovnání maximální naměřené hodnoty nebo z rozptylu dat kolem aritmetického průměru. Naopak druhá norma stanovuje hranici pole přijetí (příp. zamítnutí nebo nejistoty) a zohledňuje nejistoty měření. Z tohoto důvodu bylo navrženo možné řešení kombinace obou norem, avšak aktuální norma ČSN EN ISO 21920 byla z důvodu dostupného profilometru a softwaru pro vyhodnocování, nahrazena nyní neaktuálními normami ČSN EN ISO 4287 a ČSN EN ISO 4288. Navržené řešení bylo aplikováno při vyhodnocování textury povrchu na námi naměřená data parametru R_a kontaktním profilometrem. Záměna aktuální normy (ČSN EN ISO 21920) s neplatnými normami nemá v případě tohoto parametru vliv na výsledek vyhodnocování.

Předpokladem pro kombinaci obou norem pro vyhodnocení parametru bylo zpřísnění kritérií pro posuzování shody se specifikací. Tento předpoklad byl podle výsledků vyhodnocení splněn, proto je tato metodika vhodná v případě, že chceme zvýšit pravděpodobnost dodržení předepsané textury povrchu, a tím i zaručit funkci a kvalitu vyrobené součásti.

Možností dalšího výzkumu v oblasti textury povrchu a jejího hodnocení se specifikací na výkrese je otestování této metodiky s aktuální normou ČSN EN ISO 21920. Námi zvolený parametr sice nemá vliv na výsledek, avšak v nové normě jsou zavedeny nové postupy při měření textury povrchu jako je nerozlišování periodického a neperiodického profilu drsnosti. Dále je vhodné zkoumat, jak tato norma ovlivnila důraz na kvalitu vyráběných součástí. Došlo k upravení pravidel, nově je pravidlo maxima platné i bez předpisu na výkrese, zatímco u starých norem bylo bez předepsání platné pouze pravidlo 16 %. Takto by v souladu s normou ČSN EN ISO 4288 specifikaci splnili dva vzorky, avšak v případě normy ČSN EN ISO 21920 by specifikaci splnil pouze jeden vzorek. Vzhledem k výsledkům měření je vhodné se zaměřit i na otázku, zdali je metodika vyhodnocování parametrů textury povrchu v souladu s ČSN EN ISO 21920 (příp. ČSN EN ISO 4288) nezbytná a jestli není vhodnější posuzovat shodu specifikací rovnou dle normy ČSN EN ISO 14253-1. V souladu s touto normou je možné nastavit maximální a minimální přípustné meze, navíc tato norma zohledňuje nejistoty měření. Měřený parametr bude sice posuzován přísněji, ale může se takto předejít schválení vzorku, který nespĺňuje danou specifikaci. Je také vhodné věnovat pozornost metodice stanovení nejistoty typu B v případě měření textury povrchu.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] WHITEHOUSE, D. J., 1997. Surface metrology. Online. *Measurement Science and Technology*. Roč. 8, č. 9, s. 955-972. ISSN 0957-0233. Dostupné z: <https://doi.org/10.1088/0957-0233/8/9/002>. [cit. 2024-03-12].
- [2] ČSN EN ISO 4287. *Geometrická specifikace produktu (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda: Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999, 22 s. Třídící znak 014450.
- [3] ČSN EN ISO 1302. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Označování struktury povrchu v technické dokumentaci výrobků*. Praha: Český normalizační institut, 2002, 42 s. Třídící znak 014457.
- [4] ČSN EN ISO 21920-1. *Geometrická specifikace produktu (GPS) – Struktura povrchu: Profil – Část 1: Indikace struktury povrchu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2023, 56 s. Třídící znak 014450.
- [5] CURTIS, Mark A. a FARAGO, Francis T. Surface – Texture Measurements. In: *Handbook of dimensional measurement: Definition of concepts and terms*. Fifth edition. South Norwalk: Industrial Press, [2014]., s. 411-440. ISBN 978-0-83113-465-5.
- [6] ČSN EN ISO 21920-2. *Geometrická specifikace produktu (GPS) – Struktura povrchu: Profil – Část 2: Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2023, 80 s. Třídící znak 014450.
- [7] *Exploring Surface Texture: A fundamental guide to the measurement of surface finish*. Online. 7. England: Taylor Hobson Limited, 2011. Dostupné z: <https://www.southampton.ac.uk/~assets/doc/Engineering/exploring%20surface%20texture.pdf>. [cit. 2024-02-10].
- [8] JANKOVÝCH, Róbert. *Metrologie textury povrchu I* [online]. Brno, 2023 [cit. 2024-01-20]. Dostupné z: <https://moodle.vut.cz>. Výukový materiál. Fakulta strojního inženýrství – Vysoké učení technické v Brně.
- [9] ČSN EN ISO 8785. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Nedokonalosti povrchu – Termíny, definice a parametry*. Praha: Český normalizační institut, 2000, 24 s. Třídící znak 014456.
- [10] JURENA, Pavel, 2011. *Snímání a hodnocení jakosti broušeného povrchu kontaktním a bezkontaktním způsobem*. Online, Diplomová práce, vedoucí Vladimír Pata. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/16302/jurena_2011_dp.pdf?sequence. [cit. 2024-02-24].
- [11] JIANG, X; SCOTT, P.J; WHITEHOUSE, D.J a BLUNT, L. Paradigm shifts in surface metrology. Part I. Historical philosophy. Online. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2007, roč. 463, č. 2085, s. 2049-2070. ISSN 1364-5021. Dostupné z: <https://doi.org/10.1098/rspa.2007.1874>. [cit. 2024-02-10].

- [12] PALOVÁ, Katarína; KELEMENOVÁ, Tatiana a KELEMEN, Michal. Measuring Procedures for Evaluating the Surface Roughness of Machined Parts. Online. *Applied Sciences*. 2023, roč. 13, č. 16. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app13169385>. [cit. 2024-04-1].
- [13] HRON, Tomáš, 2017. *Měření drsnosti povrchu pro průmyslové aplikace*. Online, Bakalářská práce, vedoucí Jan Hošek. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/70869/F2-BP-2017-Hron-Tomas-BP_Hron_final.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [cit. 2024-05-03].
- [14] ADAMCZAK, Stanisław; ŚWIDERSKI, Jacek a DOBROWOLSKI, Tomasz, 2017. Selected problems of contact measurements of surface texture. Online. *Mechanik*. Č. 4, s. 328-331. ISSN 0025-6552. Dostupné z: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.4.51>. [cit. 2024-05-24].
- [15] ČSN EN ISO 21920-3. *Geometrická specifikace produktu (GPS) – Struktura povrchu: Profil – Část 3: Operátory specifikace*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2023, 36 s. Třídící znak 014450.
- [16] JANKOVÝCH, Róbert. *Metrologie textury povrchu II* [online]. Brno, 2023 [cit. 2024-01-30]. Dostupné z: <https://moodle.vut.cz>. Výukový materiál. Fakulta strojního inženýrství – Vysoké učení technické v Brně.
- [17] TICHÁ, Šárka. *STROJÍRENSKÁ METROLOGIE část 1*. [online]. Ostrava, 2004 [cit. 2024-02-25]. Dostupné z: <http://books.fs.vsb.cz/StrojMetro/strojirenska-metrologie.pdf>. Výukový materiál. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [18] ROTTENBORN, Dennis, 2020. *Sledování stability měřidel v kalibrační laboratoři*. Online, Bakalářská práce, vedoucí Jan Podaný. Praha: Fakulta strojní České vysoké učení technické v Praze. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/90104/F2-BP-2020-Rottenborn-Dennis-sledovani_stability_meridel_rottenborn.pdf?sequence=-1&isAllowed=y.. [cit. 2024-02-26].
- [19] JANKOVÝCH, Róbert. *Statistické nástroje v metrologii* [online]. Brno, 2023 [cit. 2024-02-12]. Dostupné z: <https://moodle.vut.cz>. Výukový materiál. Fakulta strojního inženýrství – Vysoké učení technické v Brně.
- [20] *Metody vyhodnocování textury povrchu* [online]. Brno, 2021 [cit. 2024-04-19]. Výukový materiál. Fakulta strojního inženýrství – Vysoké učení technické v Brně.
- [21] ČSN EN ISO 4288. *Geometrická specifikace produktu (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda: Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999, 15 s. Třídící znak 014449.
- [22] 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*. 4. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018, 23 s. Třídící znak 014100.

- [23] JANKOVÝCH, Róbert. *Statistické nástroje v metrologii 3* [online]. Brno, 2023 [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: <https://moodle.vut.cz>. Výukový materiál. Fakulta strojního inženýrství – Vysoké učení technické v Brně.
- [24] SÁMELOVÁ, Vendula. *Popis obráběného materiálu*. Brno, 2023. Výukový materiál. Fakulta strojního inženýrství – Vysoké učení technické v Brně.
- [25] BURIAN, Martin, 2017. *Nekonvenční způsoby obrábění strojních součástí*. Online, Bakalářská práce, vedoucí Jiří Votava. Brno: Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta, Ústav techniky a automobilové dopravy. Dostupné z: https://theses.cz/id/dzwpps/zaverecna_prace.pdf. [cit. 2024-03-01].
- [26] JIANG, X. Jane a WHITEHOUSE, David J., 2012. Technological shifts in surface metrology. Online. *CIRP Annals*. Roč. 61, č. 2, s. 815-836. ISSN 00078506. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.009>. [cit. 2024-03-01].
- [27] KUPSKÝ, David, 2023. *Hodnocení profilových parametrů textury povrchu a posouzení shody se specifikací na výkrese*. Online, Bakalářská práce, vedoucí Vendula Sámelová. Brno: Fakulta strojního inženýrství – Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: <https://dspace.vut.cz/server/api/core/bitstreams/83b81a37-edc0-466c-9233-3eae73589fe3/content>. [cit. 2024-05-08].
- [28] POLZER, Aleš a JANKOVÝCH, Róbert, 2022. *Česko-anglická terminologie z oblasti metrologie I: Parametry textury povrchu*. Brno, 2022. Výukový materiál. Fakulta strojního inženýrství – Vysoké učení technické v Brně.

10 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

10.1 Seznam zkratek a symbolů

c_p	Inverzní materiálový poměr
ČSN	Česká technická norma
d_c	Vztažná výšková úroveň protnutí
d_x	Maximální vzorkovací rozteč
EN	Evropská norma
g_A	Faktor ochranného pásma
g_{LA}, g_{LR}	Faktory ochranného pásma dolní specifikační hranice
g_{UA}, g_{UR}	Faktory ochranného pásma horní specifikační hranice
GPS	Geometrická specifikace produktu
ISO	Mezinárodní organizace pro standardizaci
k	Koeficient rozšíření
l_e	Hodnocená délka
l_n	Vyhodnocovaná délka
l_r	Základní délka
l_{sc}	Úseková délka
l_t	Celková délka snímání
LSL	Dolní mez specifikace
MPE	Maximální dovolená chyba měřidla
n_{pe}	Počet profilových elementů na l_e
n_{sc}	Počet úsekových délek
P	Základní profil
p, q	Materiálový poměr
R	Profil drsnosti
R_a	Střední aritmetická výška
R_{al}	Autokorelační délka
R_c	Střední výška profilového elementu
$R_{cm}(p)$	Inverzní materiálový poměr
R_{cq}	Směrodatná odchylka výšek profilových elementů
R_{cx}	Maximální výška profilového elementu
R_{da}	Střední aritmetický absolutní sklon
$R_{dc}(p, q)$	Výškový rozdíl materiálového poměru
R_{dl}	Rozvinutá délka
R_{dq}	Efektivní sklon

Rdr	Poměr rozvinuté délky
Rdt	Maximální absolutní sklon
Rhd(c)	Hustota výšky
Rku	Špičatost
Rmc(c)	Materiálový poměr
Rml(c)	Materiálová délka
Rmpc	Střední aritmetické zakřivení výstupku
Rmr(p, d _c)	Vztažný materiálový poměr
Rmvc	Střední aritmetické zakřivení prohlubně
Rp	Střední výška výstupku
Rpc	Parametr počtu výstupků
Rpd	Hustota výstupků
Rpt	Maximální výška výstupku
Rq	Efektivní výška
Rsk	Šikmost
Rsm	Střední rozteč profilového elementu
Rsmq	Směrodatná odchylka roztečí profilových elementů
Rsmx	Maximální rozteč profilového elementu
Rsw	Dominantní prostorová vlnová délka
Rt	Celková výška
Rv	Střední hloubka prohlubně
Rvd	Hustota prohlubní
Rvm(p)	Materiálový objem
Rvt	Maximální hloubka prohlubně
Rvv(p)	Prázdný objem
Rz	Maximální výška
Rzx	Maximální výška úseku
R5p	Pětibodová výška výstupku
R5v	Pětibodová hloubka prohlubně
R10z	Desetibodová výška
S _{cn}	Třída nastavení
SiSiC	Infiltrovaný karbid křemíku
S _x	Výběrová směrodatná odchylka
U	Rozšířená nejistota
u _A	Nejistota typu A
u _B	Nejistota typu B
u _C	Kombinovaná standartní nejistota
u _{zj}	Standartní nejistota typu B od jednotlivých zdrojů

USL	Horní mez specifikace
W	Profil vlnitosti
X_s	Rozteč profilového elementu
x_{bar}	Aritmetický průměr
Z_{ph}	Výška výstupku profilového elementu
Z_t	Výška profilového elementu
Z_{vd}	Hloubka prohlubně profilového elementu
Δz_{max}	Rozsah odchylek
χ	Koeficient k přepočtu mezní hodnoty
ε	Absolutní chyba

10.2 Seznam tabulek

Tabulka 1: Značky, interpretace a příklady pro indikaci povrchových nerovností [4]	19
Tabulka 2: Značky, příklady, indikace a interpretace povrchových nerovností a jejich směru [4]	19
Tabulka 3: Nové normy	23
Tabulka 4: Legenda volitelných elementů indikace [4]	24
Tabulka 5: Výchozí nastavení parametru na základě horní toleranční meze [15]	27
Tabulka 6: Výchozí nastavení podle specifikace [15]	27
Tabulka 7: Parametry pole dle ČSN EN 21920-2 [6]	29
Tabulka 8: Parametry prvku dle ČSN EN 21920-2 [6]	30
Tabulka 9: Koeficienty k pro $n < 10$ [19]	37
Tabulka 10: Hodnoty koeficientu k přepočtu mezní hodnoty [19]	38
Tabulka 11: Hodnoty koeficientu rozšíření [19]	39
Tabulka 12: Rozdíl v definici parametru Ra [2, 6]	43
Tabulka 13: Podmínky při měření	47
Tabulka 14: Podmínky obrábění [24]	47
Tabulka 15: Technické specifikace Taylor-Hobson Surtronic 25 [20]	48
Tabulka 16: Volba základní délky [21]	51
Tabulka 17: Naměřené hodnoty	54
Tabulka 18: Shrnutí výsledků	64

10.3 Seznam obrázků

Obrázek 1: Povrchy s prohlubněmi lišícími se v jejich vzdálenosti (upraveno) [7]	18
Obrázek 2: Modely soustruženého (vlevo) a frézovaného povrchu (vpravo) [8]	18
Obrázek 3: Příklady nedokonalostí povrchu [9]	20
Obrázek 4: Schéma drsnosti a vlnitosti (upraveno) [7]	20
Obrázek 5: Textura frézovaného povrchu [8]	21
Obrázek 6: Metody měření textury povrchu (upraveno) [8]	22
Obrázek 7: Hrot stylusu [14]	23
Obrázek 8: Indikace parametru drsnosti povrchu [4]	23
Obrázek 9: Grafické značky textury povrchu [4]	24
Obrázek 10: Čára profilu (upraveno) [6]	25

Obrázek 11: Profilový element (upraveno) [6].....	26
Obrázek 12: Specifikace parametru Rz a Ra [15].....	27
Obrázek 13: Značení tolerančního přejímacího pravidla maxima [4]	28
Obrázek 14: Značení tolerančního přejímacího pravidla 16 % [4].....	28
Obrázek 15: Značení tolerančního přejímacího pravidla medián [4]	28
Obrázek 16: Křivka materiálového poměru [6]	32
Obrázek 17: Nový a starý způsob značení pravidla maxima [4]	34
Obrázek 18: Nový a starý způsob značení metody 16 % [4].....	34
Obrázek 19: Grafická značka dle ČSN EN ISO 21920-1 [4]	34
Obrázek 20: Grafická značka dle ČSN EN ISO 1302 [4].....	34
Obrázek 21: Grafické značky v souladu s ČSN EN ISO 1302 [4]	34
Obrázek 22: Myšlenková mapa při řešení zadání práce	42
Obrázek 23: Myšlenková mapa při návrhu řešení	42
Obrázek 24: Pole přijetí a zamítnutí při shodě [22].....	45
Obrázek 25: Pole přijetí a zamítnutí při neshodě [22]	45
Obrázek 26: Pole nejistoty [22]	45
Obrázek 27: Měřené vzorky	47
Obrázek 28: Snímač s hrotem a vodící patkou [20].....	49
Obrázek 29: Kalibrace profilometru	49
Obrázek 30: Referenční vzorek	50
Obrázek 31: Celková délka snímání [20]	51
Obrázek 32: Nastavení snímače na povrchu vzorku.....	52
Obrázek 33: Naměřený povrch	52
Obrázek 34: Vyrovnání naměřeného povrchu	53
Obrázek 35: Vyříznutí celkové délky snímání	53
Obrázek 36: Zobrazení profilu drsnosti a vlnitosti	53
Obrázek 37: Tabulka naměřených parametrů	53

11 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A Naměřené hodnoty parametru a jejich vyhodnocení

Příloha B Určení faktoru ochranného pásma g_A

PŘÍLOHA A

Tabulka A1: Naměřené hodnoty a jejich vyhodnocení pro vzorek 1

Vzorek 1	
Číslo měření	Ra [μm]
1	6,51
2	7,23
3	7,35
4	7,09
5	7,07
6	7,78
7	6,86
8	8,41
9	6,85
10	6,19
x_{max}	8,41
x_{min}	6,19
x_{bar}	7,13
s_x	0,63
$x_{bar} + s_x$	7,76
ISO 4287/4288	
Metoda 16 %	7,76 > 5
Metoda maxima	8,41 > 5
u_A	0,20
u_B	0,12
u_C	0,23
$U (k = 2)$	0,47
Výsledek	7,13 ± 0,47
USL	5,00
LSL	0,00
$(USL - LSL)/u_C$	21,39
g_A	1,65
$g_A \cdot u_C$	0,39
$USL - g_A \cdot u_C$	4,61
ISO 14235-1	
Metoda 16 %	7,76 > 4,61
Metoda maxima	8,41 > 4,61

Tabulka A2: Naměřené hodnoty a jejich vyhodnocení pro vzorek 2

Vzorek 2	
Číslo měření	Ra [μm]
1	4,23
2	3,97
3	4,38
4	4,79
5	5,22
6	4,40
7	4,26
8	4,76
9	4,60
10	4,74
x_{max}	5,22
x_{min}	3,97
x_{bar}	4,54
s_x	0,36
$x_{bar} + s_x$	4,89
ISO 4287/4288	
Metoda 16 %	4,89 < 5
Metoda maxima	5,22 > 5
u_A	0,11
u_B	0,08
u_C	0,14
$U (k = 2)$	0,28
Výsledek	4,54 ± 0,28
USL	5,00
LSL	0,00
$(USL - LSL)/u_C$	36,20
g_A	1,65
$g_A \cdot u_C$	0,23
$USL - g_A \cdot u_C$	4,77
ISO 14235-1	
Metoda 16 %	4,89 > 4,77
Metoda maxima	5,22 > 4,77

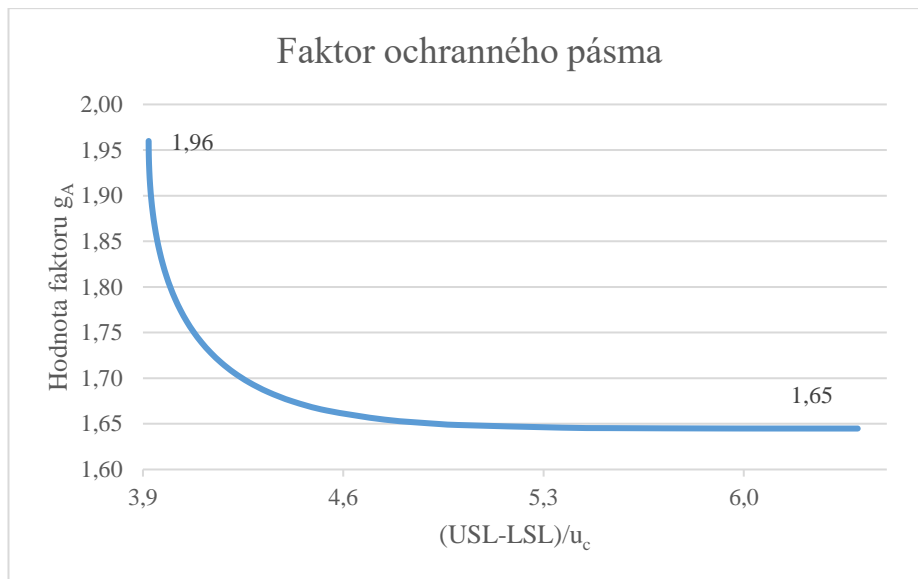
Tabulka A3: Naměřené hodnoty a jejich vyhodnocení pro vzorek 3

Vzorek 3	
Číslo měření	Ra [μm]
1	4,21
2	3,99
3	3,81
4	3,70
5	4,13
6	3,54
7	4,14
8	3,79
9	4,23
10	3,89
x_{max}	4,23
x_{min}	3,54
x_{bar}	3,94
s_x	0,23
$x_{bar} + s_x$	4,18
ISO 4287/4288	
Metoda 16 %	4,18<5
Metoda maxima	4,23<5
u_A	0,07
u_B	0,07
u_C	0,10
U ($k = 2$)	0,20
Výsledek	3,94±0,20
USL	5,00
LSL	0,00
$(USL - LSL)/u_C$	49,59
g_A	1,65
$g_A \cdot u_C$	0,17
$USL - g_A \cdot u_C$	4,83
ISO 14235-1	
Metoda 16 %	4,18<4,83
Metoda maxima	4,23<4,83

PŘÍLOHA B

Tabulka B1: Určení faktoru ochranného pásma [23]

epsilon	alfa	epsilon+alfa =0,05	Finv(alfa)	g_A=k₁	k ₂	Finv(1- epsilon)	(USL-LSL) /u _c
0,000001	0,049999	0,05	-1,64486	1,645	4,75342	4,75342	6,39829
0,000005	0,049995	0,05	-1,64490	1,645	4,41717	4,41717	6,06208
0,00001	0,04999	0,05	-1,64495	1,645	4,26489	4,26489	5,90984
0,00005	0,04995	0,05	-1,64534	1,645	3,89059	3,89059	5,53593
0,0001	0,04990	0,05	-1,64582	1,646	3,71902	3,71902	5,36484
0,0004	0,04960	0,05	-1,64874	1,649	3,35279	3,35279	5,00154
0,0005	0,04950	0,05	-1,64972	1,650	3,29053	3,29053	4,94025
0,001	0,049	0,05	-1,65463	1,655	3,09023	3,09023	4,74486
0,002	0,048	0,05	-1,66456	1,665	2,87816	2,87816	4,54272
0,003	0,047	0,05	-1,67466	1,675	2,74778	2,74778	4,42245
0,004	0,046	0,05	-1,68494	1,685	2,65207	2,65207	4,33701
0,005	0,045	0,05	-1,69540	1,695	2,57583	2,57583	4,27123
0,006	0,044	0,05	-1,70604	1,706	2,51214	2,51214	4,21819
0,007	0,043	0,05	-1,71689	1,717	2,45726	2,45726	4,17415
0,008	0,042	0,05	-1,72793	1,728	2,40892	2,40892	4,13685
0,009	0,041	0,05	-1,73920	1,739	2,36562	2,36562	4,10482
0,010	0,040	0,05	-1,75069	1,751	2,32635	2,32635	4,07703
0,011	0,039	0,05	-1,76241	1,762	2,29037	2,29037	4,05278
0,012	0,038	0,05	-1,77438	1,774	2,25713	2,25713	4,03151
0,013	0,037	0,05	-1,78661	1,787	2,22621	2,22621	4,01283
0,014	0,036	0,05	-1,79912	1,799	2,19729	2,19729	3,99640
0,015	0,035	0,05	-1,81191	1,812	2,17009	2,17009	3,98200
0,016	0,034	0,05	-1,82501	1,825	2,14441	2,14441	3,96942
0,017	0,033	0,05	-1,83842	1,838	2,12007	2,12007	3,95850
0,018	0,032	0,05	-1,85218	1,852	2,09693	2,09693	3,94911
0,019	0,031	0,05	-1,86630	1,866	2,07485	2,07485	3,94115
0,020	0,030	0,05	-1,88079	1,881	2,05375	2,05375	3,93454
0,021	0,029	0,05	-1,89570	1,896	2,03352	2,03352	3,92922
0,022	0,028	0,05	-1,91104	1,911	2,01409	2,01409	3,92513
0,023	0,027	0,05	-1,92684	1,927	1,99539	1,99539	3,92223
0,024	0,026	0,05	-1,94313	1,943	1,97737	1,97737	3,92050
0,025	0,025	0,05	-1,95996	1,960	1,95996	1,95996	3,91993



Graf B1: Faktor ochranného pásma