



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

David Kupský

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vendula Sámelová, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Student: **David Kupský**

Studijní program: Strojírenství

Studijní obor: Kvalita, spolehlivost a bezpečnost

Vedoucí práce: **Ing. Vendula Sámelová, Ph.D.**

Akademický rok: 2022/23

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

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:

Popis současného stavu poznání v oblasti hodnocení textury povrchu profilovou metodou. Systémový rozbor uvedené problematiky, návrh metodiky hodnocení parametrů textury povrchu se zohledněním nejistot při měření, v souladu se systémem ISO GPS a zdůvodnění návrhu. Popis funkce a procesu výroby zadané součásti a rozbor související problematiky ovlivňující výslednou kvalitu součásti. Plánování postupu měření součásti a vlastní realizace měření kontaktním profilometrem. Statistické zpracování a vyhodnocení výsledků měření. Diskuse výsledků, vyvození vlastních závěrů a doporučení.

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.

Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně / Technická 2896/2 / 616 69 / Brno

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 2022/23

V Brně, dne

L. S.

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

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

Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně / Technická 2896/2 / 616 69 / Brno

ABSTRAKT

První část práce je věnována vypracování současného stavu poznání v oblasti hodnocení textury povrchu profilovou metodou. Další částí je analýza problému a návrh řešení pro vyhodnocování textury povrchu s uvažováním nejistot měření v souladu se systémem ISO GPS. Pro návrh bylo provedeno demonstrační měření a vyhodnocení daného vzorku. Měření bylo realizováno za pomoci kontaktního profilometru a následně byly vypočítány profilové parametry v softwaru TalyProfile Lite. Pro vypočítané geometrické parametry byly zvoleny tři různé specifikace pro nastínění všech možností, které mohou při určování shody se specifikací nastat. Návrh s uvažováním nejistot byl dále porovnán s metodikou vyhodnocování podle ČSN EN 4288 a byly vyvozeny závěry a doporučení.

ABSTRACT

The first part of the thesis is devoted to the development of the current state of knowledge in the field of surface texture assessment using the profile method. The next part is the analysis of the problem and the proposal of a solution for the evaluation of surface texture with the consideration of measurement uncertainties in accordance with the ISO GPS system. Proposal of measurement and evaluation of the given sample was carried out for the demonstration. The measurement was started using a contact profilometer and then the profile parameters were calculated in the TalyProfile Lite software. Three different specifications were chosen for the calculated geometric parameters to outline all the possibilities that can arise when determining compliance with the specification. The proposal with consideration of uncertainties was compared with the evaluation method according to ČSN EN 4288 and from that were deduced conclusions and recommendations.

KLÍČOVÁ SLOVA

ISO GPS, posouzení shody se specifikací, textura povrchu, nejistoty měření

KEYWORDS

ISO GPS, assessment of compliance with specification, surface texture, measurement uncertain

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUPSKÝ, David. *Hodnocení profilových parametrů textury povrchu a posouzení shody se specifikací na výkrese* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-04-28]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149530>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Ing. Vendula Sámelová, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat vedoucí práce Ing. Vendule Sámelové, Ph.D. za její odbornou pomoc, cenné rady, rychlou a pohotovou komunikaci, vedení během bakalářské práce, také za poskytnutí demonstračních vzorků a poskytnutí přístrojů k provádění měření. Dále bych chtěl poděkovat své rodině, která mě podporuje po celou dobu studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 28. 4. 2023

.....

David Kupský

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	POPIS SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Vymezení v ISO GPS a překlad	14
2.2	Definice textury povrchu	15
2.2.1	Stopy po obrábění	16
2.2.2	Odchyšky tvaru	17
2.2.3	Nedokonalosti povrchu	18
2.2.4	Drsnost a vlnitost	18
2.3	Metody měření textury povrchu	19
2.4	Hodnocení textury povrchu dle ČSN EN ISO 4287, 4288	19
2.4.1	Základní pojmy	20
2.4.2	Profilové parametry	21
2.4.3	Metody vyhodnocování	24
2.4.4	Postup při měření	25
2.5	Změny v nových normách ČSN EN ISO 21920	26
2.5.1	ČSN EN ISO 21920-1	26
2.5.2	ČSN EN ISO 21920-2	27
2.5.3	ČSN EN ISO 21920-3	28
2.6	Nejistoty měření	28
2.6.1	Výpočet nejistoty měření	28
3	ANALÝZA PROBLÉMU A NÁVRH ŘEŠENÍ	31
3.1	Metoda 16 %	32
3.2	Metoda maxima	32
4	MĚŘENÍ DANÉHO VZORKU	33
4.1	Použitý měřicí přístroj a pomůcky	33
4.2	Popis měřeného vzorku	34
4.3	Metodika měření	36
4.4	Získávání naměřených hodnot z TalyProfile Lite	38
5	VYHODNOCOVÁNÍ DANÉHO VZORKU	42
5.1	Vyhodnocení pro USL = 4,5	42
5.1.1	Metoda 16 %	42
5.1.2	Metoda maxima	43
5.2	Vyhodnocení pro USL = 4,9	44
5.2.1	Metoda 16 %	44
5.2.2	Metoda maxima	44
5.3	Vyhodnocení pro USL = 5,5	45
5.3.1	Metoda 16 %	45
5.3.2	Metoda maxima	46
6	DISKUSE VÝSLEDKŮ	47
7	ZÁVĚR	48
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	49
9	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK	51
9.1	Seznam zkratk	51
9.2	Seznam tabulek	52

9.3	Seznam obrázků.....	52
10	SEZNAM PŘÍLOH.....	54

1 ÚVOD

Práce je zaměřena na texturu povrchu, nejprve na shrnutí současného stavu poznání a poté analýzu a řešení problému. Dále je věnována profilové metodě určování parametrů textury povrchu. Konkrétně na návrh metodiky hodnocení profilových parametrů textury povrchu se zohledněním nejistot. Nejistoty měření jsou řešeny u všech vlastností ISO GPS kromě textury povrchu, což je nepochopitelné. Tento problém je zapříčiněn nejspíš zanedbáváním textury povrchu a podceňováním její důležitosti ve strojírenství. Textura povrchu je nedílnou součástí vyhodnocování v přesném strojírenství, hraje důležitou roli z hlediska funkčnosti povrchu a také ekonomiky výroby.

Dále je v práci provedeno měření za pomoci kontaktního profilometru a následné vyhodnocování na demonstračním vzorku za využití softwaru TalyProfile Lite. Měřením byl určován pouze parametr Ra , což je průměrná aritmetická odchylka profilu drsnosti. Vyhodnocování je prováděno podle normy ČSN EN 4288 a podle návrhu s uvažováním nejistot měření, a to pro celkem tři specifikace. Specifikace byly zvoleny za účelem demonstrace všech možných případů, které mohou při vyhodnocování nastat.

Nejistoty měření je nutné uvažovat při každém měření, pokud chceme přesněji určit naměřenou hodnotu a určovat shodu s předepsanou specifikací. Pokud neuvažujeme nejistoty měření, může s větší dojit pravděpodobností k problému, kdy vzorek sice vyhovuje specifikaci podle normy ČSN EN 4288, ale ve skutečnosti se jedná o zmetek. Schválení zmetkovité součásti pak může zapříčinit špatnou funkčnost součásti, případně i vést k rychlému opotřebení součásti nebo špatnému zachycování nátěrů či maziv na povrchu součásti. Schvalování zmetkovitých součástí hraje důležitou roli hlavně ve velkosériové výrobě přesných strojních součástí, které hledí na vysokou kvalitu, spolehlivost a funkčnost součástí. Při uvažování nejistot je pravděpodobnost schválení zmetkovité součásti výrazně nižší, což je pro firmu velmi důležité z ekonomického hlediska.

Tato problematika mě zaujala již ve druhém ročníku bakalářského studia, textura povrchu na mě působila velmi zajímavě a významně, ale na druhou stranu také velmi složitě. Z této problematiky jsem cítil, že má své nedostatky, kterými bych se chtěl zabývat. Další motivací pro toto téma pro mě byla neznalost textury povrchu u lidí v mém okolí. Hodně zkušených lidí, co se strojírenství týče, vědělo o textuře povrchu jen základy, které by jim na vyhodnocování této vlastnosti ISO GPS určitě nestačily.

2 POPIS SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Vymezení v ISO GPS a překlad

ISO GPS je systém, který určuje vymezení rozsahů různých norem a znázornění jejich vzájemných vztahů. Většinou bývá zobrazen jako matice ISO GPS. Používá se pro specifikaci daných charakteristik součástí během různých etap jejího životního cyklu. Například při návrhu, výrobě nebo kontrole. [1]

Od roku 2015 došlo k přechodu v normě ISO 14638:2015 z původních 18 geometrických vlastností pouze na 9, ale v budoucnu mohou být přidány další. Přehled geometrických vlastností:

- a) rozměr,
- b) vzdálenost,
- c) tvar,
- d) orientace,
- e) umístění,
- f) házení,
- g) textura povrchu profilu (profil textury povrchu),**
- h) textura povrchu plochy (plocha textury povrchu),
- i) nedokonalosti povrchu. [1]

U všech geometrických vlastností kromě textury povrchu jsou při vyhodnocování uvažovány nejistoty měření, což je nepochopitelné, neboť textura povrchu hraje důležitou roli ve strojírenském průmyslu, který klade důraz na preciznost vyrobených součástí.

V maticovém modelu profilu textury povrchu, viz Tab. 1), jsou uváděny pouze specifické normy pro profil textury povrchu, proto v práci nejsou uvedeny všeobecné normy, které jsou stejné pro všechny sloupce matice, a normy ISO 25178, ty jsou primárně označeny jako normy pro plochu textury povrchu.

Textura povrchu je velice zavádějící označení, proto se u některých norem liší český překlad. Nejspíš je to zapříčiněno tím, že normy překládají překladatelé, kteří nejsou odborníky v tomto oboru. Například geometrické vlastnosti textury povrchu profilu překládáme spíše jako profil textury povrchu a textura povrchu plochy jako plocha textury povrchu. [2]

Toto označení vychází z anglického termínu „surface texture“. Dle českých norem bývá překládán jako struktura povrchu. Pouze v normách ČSN EN ISO 25178 je překlad textura povrchu. Struktura je definována ve slovníku spisovného jazyka českého jako „*způsob složení, vnitřního uspořádání něj. látky (projevující se zpravidla její členitostí)*“. [3] Zatímco textura je „*vnitřní uspořádání; složení, přirozená kresba dřeva patrná zpravidla na tangenciálním řezu*“. [3] Pojem textura povrchu je pro tuto problematiku mnohem přesnější.

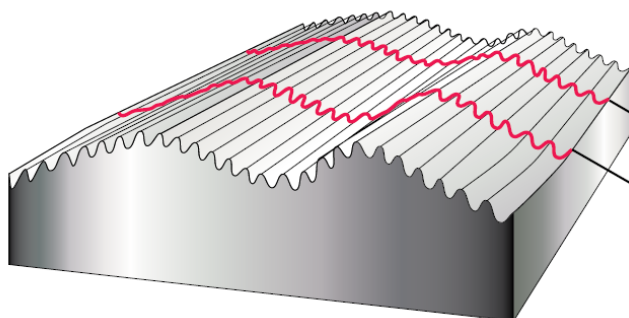
Tab. 1) Maticový model profilu textury povrchu podle norem ISO GPS [4]

Profil textury povrchu						
A	B	C	D	E	F	G
Označení a indikace	Požadavky prvku	Vlastnosti prvku	Shoda a neshoda	Měření	Měřicí zařízení	Kalibrace
ISO 1302	ISO 4287	ISO 4288	ISO 4288	ISO 4288	ISO 3274	ISO 5436-1
ISO 21920-1	ISO 12085	ISO 21920-3	ISO 21920-3	ISO 21920-3	ISO 14253-6	ISO 5436-2
	ISO 13565-1	ISO 12085	ISO 14253-1	ISO 12085	ISO 14406	ISO 12179
	ISO 13565-2	ISO 21920-2	ISO 14253-2	ISO 21920-2	ISO 14978	ISO 14978
	ISO 13565-3	ISO 14253-4	ISO 14253-3	ISO 16015	ISO 16015	ISO 16015
	ISO 21920-2	ISO 16610-1	ISO 14253-4	ISO 14253-6	ISO 16610-1	
		ISO 16610-20	ISO 14253-6		ISO 16610-20	
		ISO 16610-21			ISO 16610-21	
		ISO 16610-22				
		ISO 13565-1				
Legenda	Nahrazená norma	Nahrazující norma	Stálá norma			

2.2 Definice textury povrchu

„Jedná se o náhodné, opakující se odchylky od ideálního geometrického tvaru, jež představují trojrozměrnou topografii součásti. Skládá se z drsnosti, vlnitosti, stop po obrábění, nedokonalostí povrchu a odchylek tvaru na vymezené ploše povrchu.“ [5]

Textura povrchu je důležitá ze dvou důvodů. Prvním je kontrola výrobního procesu. Zde jsou kontrolovány hlavně vlastnosti obráběcího stroje a samotný proces výroby. Druhým důvodem je odhad funkčnosti povrchu součásti. Funkčnost povrchu je velice problematická záležitost. Ideálně ji lze otestovat přímým způsobem. Jinak řečeno zkouškou, která by měla napodobovat funkci součásti z hlediska zatížení, rychlosti a použitého materiálu. Pokud se testuje například opotřebení součásti, je nutné co nejpřesnějším způsobem nasimulovat jeho funkci pomocí ořetrového stroje, případně třecího stroje pro testování tření a tak dále. Avšak tyto zkoušky by byly velice složité a nákladné na realizaci, proto se místo tohoto přímého přístupu aplikuje metrologie textury povrchu, z níž je možné na základě teorie uvedené v normách nebo zkušenosti odhadnout funkčnost povrchu. [6]



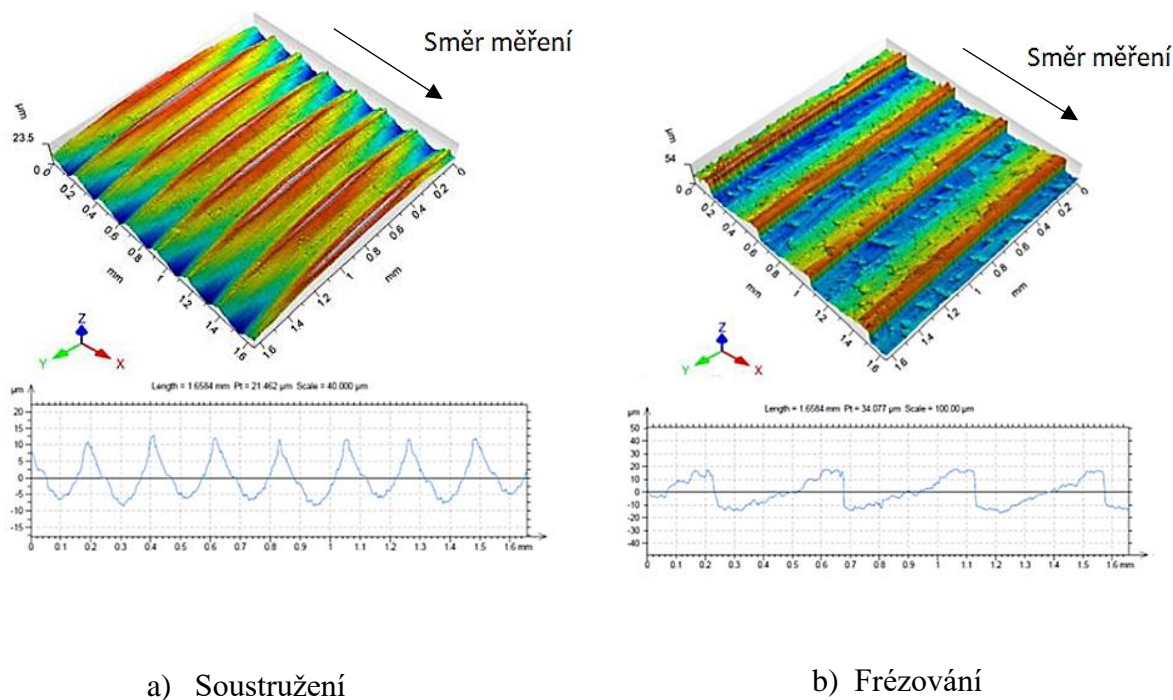
Obr. 1) Povrch vzorku [7]

„Základní vlastnosti povrchu, viz Obr. 1), určuje:

- různorodost a nedokonalost mikrostruktury materiálu,
- princip působení řezného nástroje a nestabilita řezného nástroje na materiálu,
- chyby vedení obráběcích strojů a vibrace,
- deformace v důsledku vnitřního napětí v materiálu.“ [2]

2.2.1 Stopy po obrábění

Stopy po obrábění vznikají vzájemným dynamickým působením obráběcího nástroje na povrch výrobku při obrábění. Na výrobním výkrese stanovujeme směr stop po obrábění. Při soustružení i frézování je nutno měřit kolmo na stopy po obrábění podle Obr. 2).

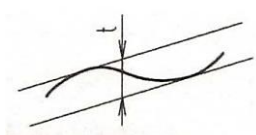
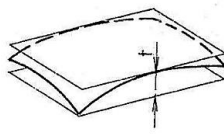
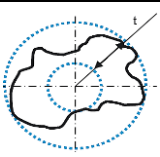
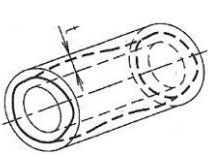

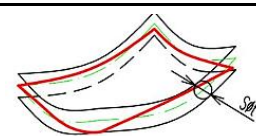


Obr. 2) Stopy po obrábění [2]

2.2.2 Odchyly tvaru

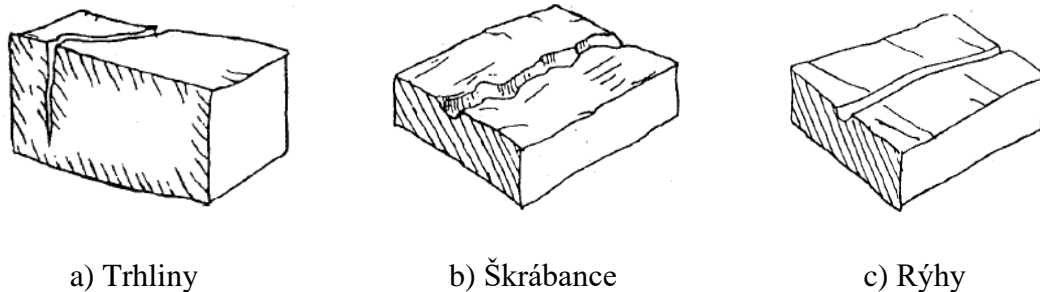
Definují odchylku skutečného tvaru od ideálního geometrického tvaru součásti. Tyto odchylky dělíme na šest druhů, znázorněných v Tab. 2). Toleranční zóna určuje rozmezí, ve kterém se může odchylka tvaru součásti pohybovat vzhledem k ideálnímu geometrickému tvaru součásti.

Tab. 2) Odchyly tvaru [8]

Odchyly tvaru	
Druh	Znázornění toleranční zóny
Přímost	 <p>[9]</p>
Rovinnost	 <p>[10]</p>
Kruhovitost	 <p>[11]</p>
Válcovitost	 <p>[12]</p>
Tvar profilu libovolné čáry	 <p>[13]</p>
Tvar profilu libovolné plochy	 <p>[13]</p>

2.2.3 Nedokonalosti povrchu

Soubor jednoho nebo více prvků a nepravidelností na povrchu součásti. Vznikají náhodně a neúmyslně během výroby, skladování nebo při používání. Mezi nedokonalosti povrchu se řadí například prohlubeniny, rýhy, škrábance, trhliny a póry. [5] Zobrazeno na Obr. 3).



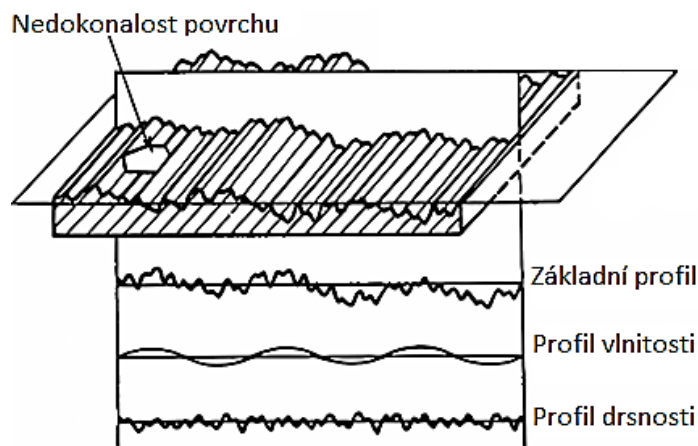
Obr. 3) Nedokonalosti povrchu [5]

2.2.4 Drsnost a vlnitost

Obecná drsnost a vlnitost není doposud specifikována normou. Jedná se o spolu související vymyšlené geometrické vlastnosti textury povrchu. Nejsou přímo měřitelné, pro jejich určení je nutné použít smluvní způsob filtrování a následovně je vypočítat z naměřených dat. Profil drsnosti a vlnitosti vzniká ze základního profilu, viz Obr. 4). [14]

Vlnitost je vnímána jako vlastnost textury povrchu, která bývá tvořena nestabilitou při obrábění způsobenou především vibracemi u obráběcího stroje. S vlnitostí často roste i hlučnost dané součásti za provozu. [7]

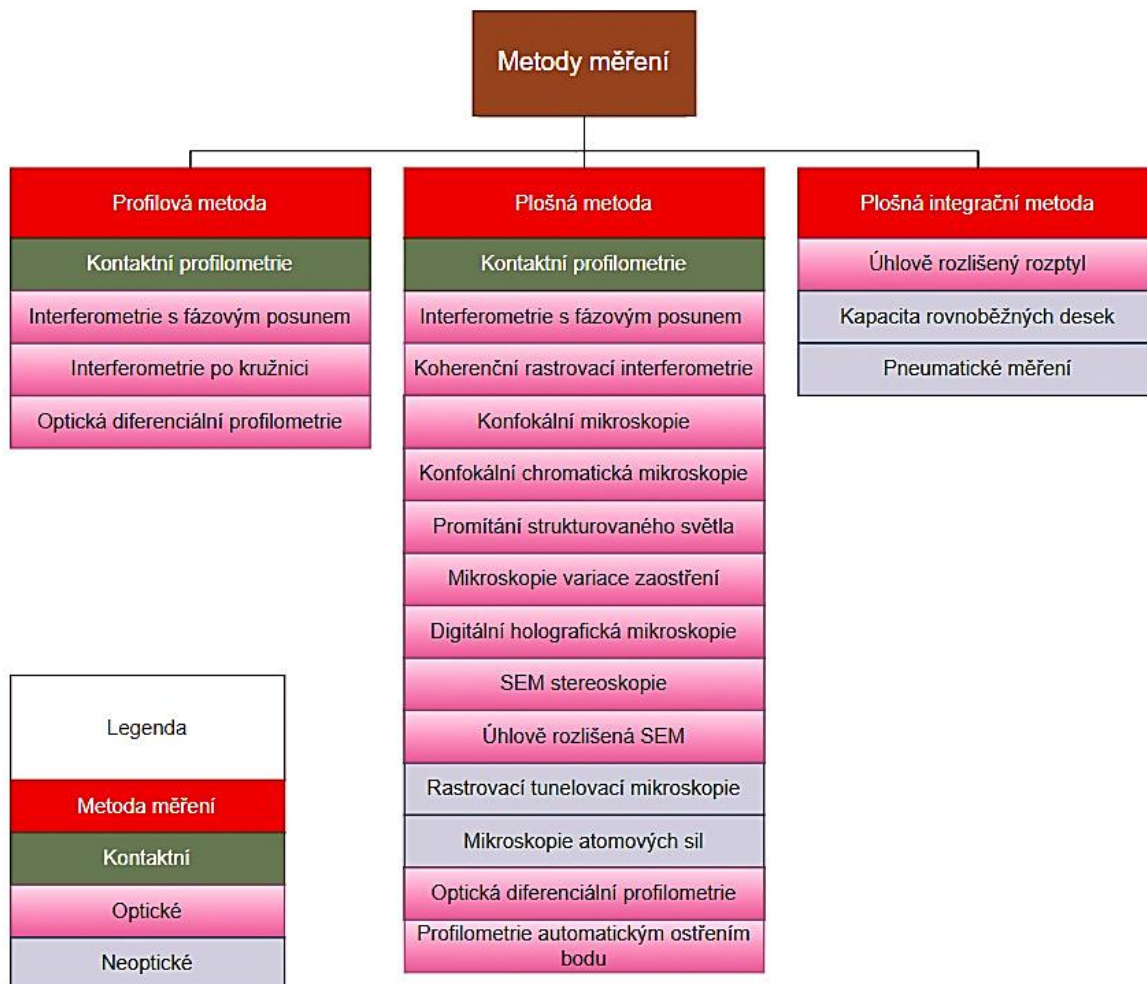
Drsnost je charakterizována jako vlastnost textury, jež je vlastní dané technologii. Souvisí hlavně s působením nástroje na povrch součásti, ale částečně ji může ovlivnit i struktura materiálu. [7] Drsnost hraje důležitou roli z hlediska tribologie. Pokud je na výkresu předepsána malá hodnota, výroba bude velmi nákladná z ekonomického hlediska a může vzniknout problém s mazivem, lepidlem či nátěrem, jelikož se nebude moci zachytit do prohlubní na povrchu součásti. Pokud je naopak zvolena příliš velká drsnost, bude docházet k rychlému opotřebení funkčních ploch jak výrobku, tak i interagující součásti. Další negativní vlastností velké drsnosti povrchu je zvýšení pravděpodobnosti šíření trhliny, tudíž je třeba zvolit kompromis vhodný pro všechny vlastnosti materiálu.



Obr. 4) Profily textury povrchu [2]

2.3 Metody měření textury povrchu

Využívají se tři základní metody, uvedené na Obr. 5). Práce je věnována profilové metodě a hodnocení profilových parametrů textury povrchu. Plošné a plošné integrační metody jsou obsahem navazujícího magisterského studia na naší fakultě.



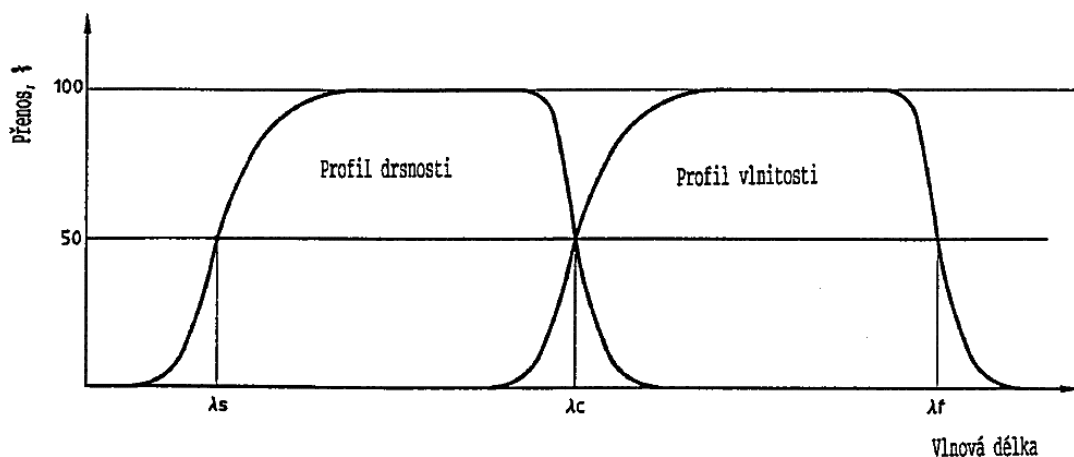
Obr. 5) Metody měření textury povrchu [2]

2.4 Hodnocení textury povrchu dle ČSN EN ISO 4287, 4288

Tyto normy se zabývaly vyhodnocováním textury povrchu profilovou metodou. Platily od roku 1999. Na konci roku 2022 vyšly již nové normy ČSN EN ISO 21920, které tyto normy nahrazují.

2.4.1 Základní pojmy

- „Skutečný povrch je povrch omezující těleso a oddělující ho od okolního prostředí.“ [15]
- **Profil povrchu** vzniká jako průsečnice skutečného povrchu a dané roviny. Obecně se volí rovina kolmá na směr pohybu funkčních ploch.
- **Filtr profilu** je smluvní filtr rozdělující zaznamenaný profil na dlouhovlnný a krátkovlnný. Používají se tři druhy filtru.
- **λ_s filtr profilu** rozděluje krátkovlnné složky od složek profilu drsnosti. Krátkovlnné složky jsou označovány jako šum. Je zaváděn pro minimalizaci nepřesností měřicího přístroje.
- **λ_c filtr profilu** definuje rozhraní mezi profilem drsnosti a profilem vlnitosti.
- **λ_f filtr profilu** určuje hranici mezi vlnitostí a delšími vlnami. Delší vlny jsou tvořeny tvarem součásti.
- **Základní profil** je odvozený z profilu povrchu pomocí filtru krátkovlnných složek λ_s a dlouhovlnných složek λ_f . Značí se písmenem P (primary) a je základem pro hodnocení parametrů základního profilu.
- **Profil drsnosti** vzniká potlačením dlouhovlnných složek λ_c a krátkovlnných složek λ_f ze základního profilu. Je označován R (roughness) a je základem pro hodnocení parametrů drsnosti profilu.
- **Profil vlnitosti** je získáván potlačením krátkovlnných složek λ_c a dlouhovlnných složek λ_f ze základního profilu. Značí se písmenem W (waviness).
- **Základní délka** je úsek, na kterém jsou rozpoznávány nerovnosti charakterizující vyhodnocovaný povrch. Značena jako l_p , l_r , l_w , podle toho, zda se jedná o základní profil, profil drsnosti nebo profil vlnitosti. Základní délka u l_r a l_w je rovna charakteristické vlnové délce λ_c nebo λ_f . Základní délka l_p je rovna vyhodnocované délce.
- **Vyhodnocovaná délka** je vzdálenost ve směru osy x , použitá pro posouzení vyhodnocovaného profilu. Označuje se l_n . Standardně se vyhodnocovaná délka rovná pětinašobku základní délky.
- **Prvek profilu** je výstupek profilu a k němu přilehlá prohlubeň. [15]



Obr. 6) Přenosová charakteristika profilu drsnosti a vlnitosti [15]

2.4.2 Profilové parametry

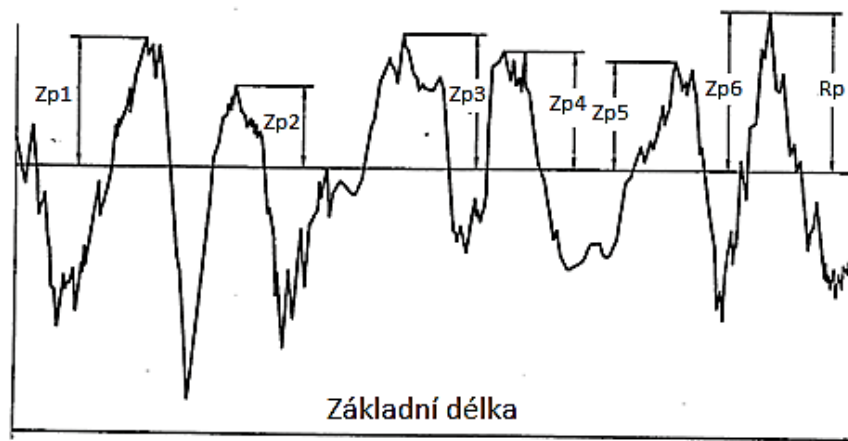
Dle normy ČSN EN ISO 4287 je definováno 16 základních parametrů pro vyhodnocování textury povrchu profilu. Rozdělení parametrů je znázorněno v Tab. 3).

Tab. 3) Profilové parametry podle ČSN EN 4287 [15]

Profilové parametry			
<i>Výškové parametry (výstupky a prohlubně)</i>			
1	Rp	Největší výška výstupku profilu drsnosti	[μm]
2	Rv	Největší hloubka prohlubně profilu drsnosti	[μm]
3	Rz	Největší výška profilu drsnosti	[μm]
4	Rc	Průměrná výška prvků profilu drsnosti	[μm]
5	Rt	Celková výška profilu drsnosti	[μm]
<i>Výškové parametry (průměrné hodnoty pořadnic)</i>			
6	Ra	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu drsnosti	[μm]
7	Rq	Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu drsnosti	[μm]
8	Rsk	Šikmost posuzovaného profilu drsnosti	[-]
9	Rku	Špičatost posuzovaného profilu drsnosti	[-]
<i>Délkové parametry</i>			
10	RSm	Průměrná šířka prvků profilu drsnosti	[mm]
<i>Tvarové parametry</i>			
11	RΔq	Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu drsnosti	[°]
<i>Křivky a odpovídající parametry</i>			
12	Rmr(c)	Materiálový poměr profilu drsnosti	[%]
13	–	Křivka materiálového poměru profilu drsnosti	-
14	Rδc	Rozdíl výšky úseku profilu drsnosti	[μm]
15	Rmr	Vzájemný materiálový poměr profilu drsnosti	[%]
16	–	Empirické rozdělení výšek profilu drsnosti	-

Rp

R_p definujeme jako největší výšku výstupku profilu drsnosti. Je vyhodnocována pouze na základní délce. [15] Je určována podle vztahu (1). Na Obr. 7) je celkem 6 výstupků (Z_p). Největší výška výstupku profilu drsnosti je u šestého výstupku. $R_p = Z_{p6}$.



Obr. 7) Největší výška výstupku profilu drsnosti [15]

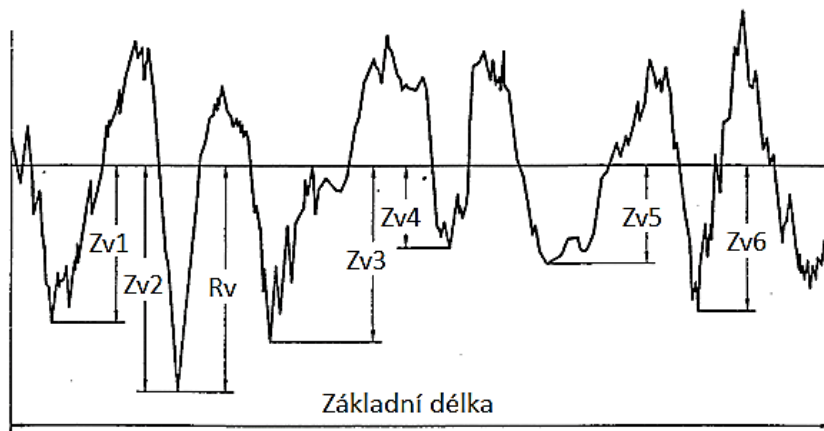
$$R_p = \max(Z_{pi}) [\mu\text{m}] \quad (1)$$

kde je

Z_{pi} i-tá výška výstupku.

R_v

R_v je největší hloubka prohlubně profilu drsnosti, je vyhodnocována na základní délce. [15] Obr. 8) ukazuje celkem 6 prohlubní (Z_v), největší hloubka prohlubně je u druhé prohlubně. U tohoto parametru nesmí být zanedbávána absolutní hodnota, viz rovnice (2).



Obr. 8) Největší hloubka prohlubně [15]

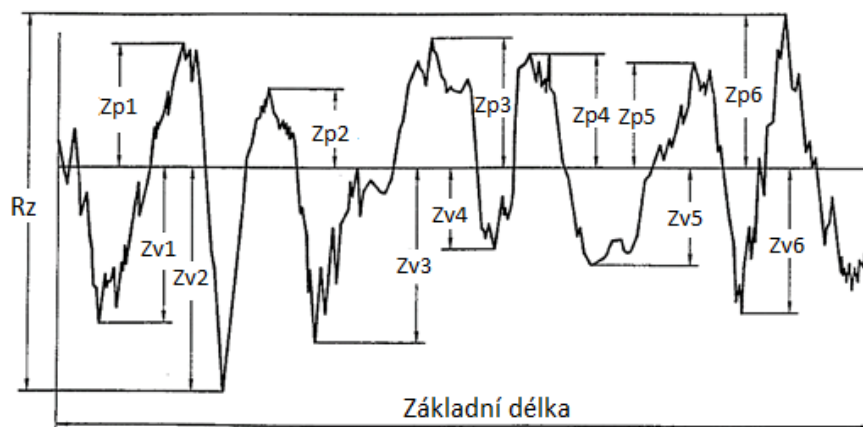
$$R_v = |\max(Z_{vi})| [\mu\text{m}] \quad (2)$$

kde je

Z_{vi} i-tá hloubka prohlubně.

R_z

R_z je označení pro největší výšku profilu drsnosti, graficky je znázorněna na Obr. 9). Lze také formulovat podle vztahu (3) jako součet největší výšky výstupku profilu drsnosti a největší hloubky prohlubně profilu drsnosti na základní délce. [15]

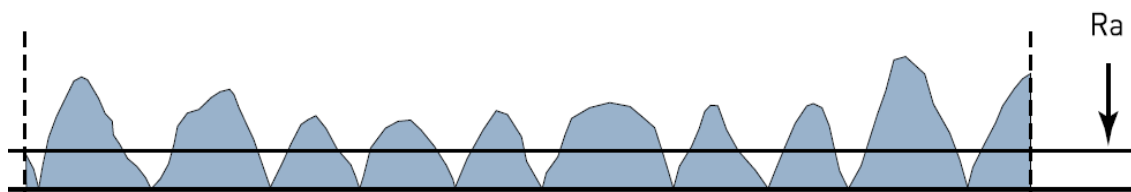


Obr. 9) Největší výška profilu drsnosti [15]

$$Rz = Rp + Rv \text{ [}\mu\text{m]} \quad (3)$$

Ra

Ra neboli průměrná aritmetická odchylka profilu drsnosti je vyhodnocována na základní délce l_r . [15] Absolutní hodnota přenesle všechny prohlubně drsnosti povrchu do kladných hodnot, podle Obr. 10). V praxi však podle vztahu (4) parametr textury povrchu nepočítáme. U měřicích přístrojů by bylo velmi složité přesně nasimulovat funkci, která by napodobovala naměřený profil drsnosti povrchu, tudíž měřicí přístroj funguje podle rovnice (5). Přístrojem je měřen velký počet hodnot drsnosti povrchu (např. 5000) v jednotlivých bodech. Tento počet se odlišuje podle přístrojů a velikosti základní délky. Poté je z absolutních hodnot těchto naměřených výšek softwarem vypočten aritmetický průměr.



Obr. 10) Průměrná aritmetická odchylka profilu drsnosti [7]

$$R_a = \frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} |Z(x)| dx \text{ [}\mu\text{m]} \quad (4)$$

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_i| \text{ [}\mu\text{m]} \quad (5)$$

kde je

l_r základní délka,

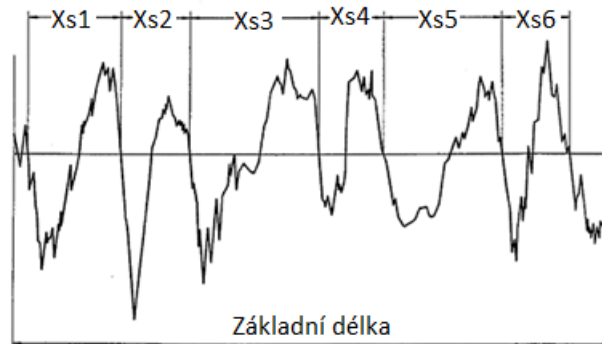
n počet měření,

$Z(x)$ funkce charakteristická pro naměřený profil drsnosti,

Z_i i-tá naměřená hodnota profilu drsnosti.

RSm

RSm je průměrná délka prvků profilu drsnosti, která je vyhodnocována na základní délce [15], ale pokud prvek profilu není úplný, viz Obr. 11), nezahrnujeme jej do výpočtu (6). U soustružení je hodnota RSm rovna posuvu nástroje na otáčku. Ostatní parametry byly výškové s jednotkami mikrometrů, zatímco RSm je délkový parametr udávaný v milimetrech.



Obr. 11) Průměrná šířka prvků profilu drsnosti [15]

$$R_{sm} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{s,i} [mm] \quad (6)$$

kde je

m počet celých prvků profilu drsnosti uvažovaných na základní délce,

$X_{s,i}$ i -tá naměřená délka prvku profilu drsnosti povrchu v milimetrech.

2.4.3 Metody vyhodnocování

Jsou využívány především dvě metody, metoda 16 % a metoda maxima.

Metoda 16 %

Podle staré normy se uvádí jako výchozí metoda vyhodnocování, tudíž se na výkresu nemusí přidávat žádné doplňující označení, viz Obr. 12). Více než 16 % naměřených hodnot nesmí překročit předepsanou hodnotu na výkresu, **což odpovídá mezi určené součtem aritmetického průměru a směrodatné odchylky naměřených hodnot**. [16] Tato metoda může být často nevhodná pro vyhodnocování, takže se může stát, že vzorek vyhovuje metodě vyhodnocování, ale může špatně plnit požadovanou funkci. U některých norem je v dnešní době metoda vyhodnocování 16 % zakázána.

„Povrch bude akceptován podle zjednodušeného postupu, jestliže:

- *první měřená hodnota nepřesáhne 70 % hodnoty udané na výkresu,*
- *první tři měřené hodnoty nepřesáhnou specifikovanou hodnotu,*
- *ne více než jedna z prvních šesti měřených hodnot přesáhne specifikovanou hodnotu,*

- *ne více než dvě z prvních dvanácti naměřených hodnot přesáhnou specifikovanou hodnotu,*
- *ne více než čtyři hodnoty z prvních dvaceti pěti hodnot přesáhnou specifikovanou hodnotu,*
- *v každém jiném případě bude obrobek odmítnut.“ [16]*

Metoda maxima

Na výkrese se doplňuje index „max“ podle Obr. 12). Žádná z naměřených hodnot nesmí překročit stanovenou specifikovanou hodnotu. „Obvykle je vzorek měřen alespoň třikrát na místech, kde se očekávají největší hodnoty.“ [16]

2.4.4 Postup při měření

Nejprve je nutné správně určit směr měření. Vždy se volí směr, pro který budou hodnoty výškových parametrů odpovídat největším hodnotám. Také je nutné měřit na té části vzorku, kde jsou očekávány největší hodnoty drsnosti, to se ovšem dost často těžko posuzuje pouze vizuálně pomocí lidského oka, proto je nutné mít před měřením teoretické základy a zkušenosti. [16]

Pokud je na výkrese součásti specifikovaná základní délka, tak se zvolí mezní filtr stejný, jako je základní délka. Pokud na výkrese specifikována není, pak se musí k jejímu určení použít postup pro volbu filtrů. [16]

Volba filtrů

Volba filtru je nedílnou součástí při každém vyhodnocování textury povrchu. Při nedodržování pravidel volby filtru, podle Tab. 4), by mohly být pro každý povrch naměřeny libovolné velikosti parametrů textury povrchu. Jak již bylo dříve uvedeno, filtrem λc je základní profil rozdělován na profil drsnosti a profil vlnitosti. Při volbě filtru je nutné rozlišit, zda se jedná o periodický či neperiodický povrch. Velikost filtru λc je rovna velikosti základní délky l_r .

Periodický povrch

U periodického povrchu se prvky profilu periodicky opakují. Tento typ povrchu vzniká po soustružení a frézování. Postup určení velikosti filtru pro periodický povrch:

- a) Odhadne se hodnota RS_m ;
- b) z Tab. 4) je určena doporučená hodnota cut-off pro odhadnutý parametr RS_m ;
- c) ve sporném případě je určena RS_m za pomoci hodnoty cut-off určené v b), pokud hodnota RS_m odpovídá jiné vlnové délce cut-off podle Tab. 4), tak je uvažována tato nová hodnota mezního filtru jako správná;
- d) vyhodnotí se parametry podle určeného mezního filtru. [16]

Neperiodický povrch

Prvky profilu se neopakují. Ostatní výrobní procesy jsou většinou výsledkem neperiodického povrchu, ale rozhodování o typu povrchu bývá často sporné, jelikož neexistuje návod, podle kterého by bylo možné jednoznačně určit typ povrchu. Tento problém je vyřešen v nové normě ČSN EN ISO 21920-3, což je rozvedeno v kapitole 2.5.3. Při určování mezního filtru pro neperiodický povrch se postupuje následovně:

- Odhadne se neznámý parametr R_a , R_z nebo R_{Sm} . Odhad je možný za pomoci vizuální prohlídky nebo srovnáním více vzorků, u kterých jsou tyto hodnoty známé a podobné.
- Pro odhadnutou hodnotu je zvolena základní délka a mezní filtr cut-off podle Tab. 4).
- Je prováděno měření a získají se reprezentativní hodnoty parametrů R_a , R_z nebo R_{Sm} .
- Naměřené hodnoty jsou porovnány s hodnotami z Tab. 4), pokud hodnoty nespádají do požadovaného rozmezí pro odhadnutý filtr, tak se mění filtr na menší či větší a celé měření se opakuje.
- Pokud jsou dvě možné hodnoty cut-off, volí se pro přesnost ta nižší. [16]

Tab. 4) Volba filtru cut-off [7]

Doporučená volba cut-off podle ISO 4288-1996					
Periodický profil	Neperiodický profil		Cut-off	Základní délka	Vyhodnocovaná délka
R_{Sm} [mm]	R_z [μ m]	R_a [μ m]	λ_c [mm]	l_r [mm]	l_n [mm]
0.013-0.04	Do 0.1	Do 0.02	0.08	0.08	0.4
0.04-0.13	0.1-0.5	0.02-0.1	0.25	0.25	1.25
0.13-0.4	0.5-10	0.1-2.0	0.8	0.8	4.0
0.4-1.3	10-50	2-10	2.5	2.5	12.5
1.3-4.0	50	10	8	8	40

2.5 Změny v nových normách ČSN EN ISO 21920

Normy ČSN EN ISO 21920 jsou platné od konce roku 2022 a doposud nemají český překlad. Při jejich vytváření byly všechny staré normy složeny dohromady a částečně upraveny. Normy týkající se textury povrchu byly vytvářeny v různých státech, proto měly i nepatrné odlišnosti, takže je bylo nutné sjednotit dohromady pro srozumitelnost a stručnost. Starší normy měly kořeny až od druhé světové války a hlavně měly své nedostatky, které bylo nutné napravit. Největší problémy týkající se starých norem byly vyřešeny, s výjimkou uvažování nejistot měření. [14]

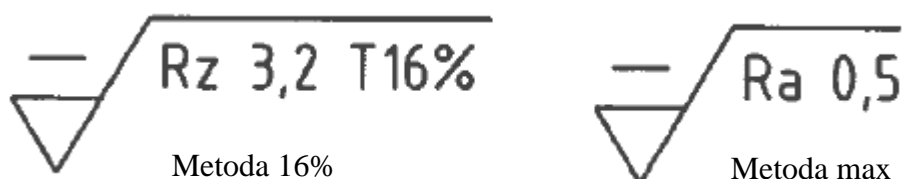
2.5.1 ČSN EN ISO 21920-1

ČSN EN ISO 21920-1 nahradila normu ČSN EN ISO 1302 z roku 2002, která se nazývala: „Označování struktury povrchu v technické dokumentaci výrobku“. Nejsignifikantnější změnou v nové normě je způsob, podle kterého vyhodnocujeme. Nyní nemusíme u metody maxima připsávat index max, ale naopak pro metodu 16 % musíme doplnit index 16 %. Rozdílem mezi značením podle staré a nové normy je pouze čára navíc, viz Obr. 13). Snahou

této změny je upřednostnit metodu maxima oproti metodě 16 %. Nevýhody metody 16 % jsou popsány v kapitole 2.4.3. [17]



Obr. 12) Označování drsnosti povrchu na výkrese podle ISO 1302 [17]



Obr. 13) Označování drsnosti povrchu na výkrese podle ISO 21920-1 [17]

2.5.2 ČSN EN ISO 21920-2

Norma ČSN EN ISO 21920-2 spojila dohromady celkem čtyři normy, viz Tab. 1). Nese název „Termíny, definice a parametry struktury povrchu“. V této nové normě jsou u některých parametrů změny, jako např. upravena definice, způsob výpočtu, název nebo označení. Také se několikrát zvětšil počet parametrů. Hlavní změnou je změna délky, na které jsou parametry definovány. Již nejsou definovány na základní délce, ale na vyhodnocované délce. V práci jsou dále rozvedeny jednotlivé parametry, které jsou uvedeny v kapitole 2.4.2, pro přiblížení odlišností ve výsledcích při vyhodnocování. Základní délka je zde nově označována jako délka sekce. Opět zde platí stejné pravidlo, že standardní vyhodnocovaná délka je pětinašobkem základní délky. [18]

Další odlišností je změna v definici, dříve byl parametr R_p definován jako největší výška výstupku profilu drsnosti. [15] Nyní podle nové normy je překládán jako průměrná výška výstupku profilu drsnosti. [18] Stejná změna platí pro parametr R_v , není to největší hloubka prohlubně, ale průměrná hloubka prohlubně profilu drsnosti. Hodnota parametrů R_p a R_v pro daný povrch je podle obou norem stejná.

R_z , nově definována jako průměrná výška profilu drsnosti, je i podle nové normy uváděna jako součet parametrů R_p a R_v , tudíž jsou i změny u tohoto parametru stejné jako u dvou předcházejících.

R_a , přeloženo z nové normy jako průměrná aritmetická výška profilu drsnosti. [18] Jedinou změnou je opět vyhodnocovaná délka, jinak je vyhodnocení tohoto parametru stejné jako podle staré normy, tudíž jsou změny u tohoto parametru pouze formální, nemají vliv na výslednou hodnotu parametru.

R_{Sm} , průměrná šířka prvku profilu drsnosti. U tohoto parametru, hraje změna základní délky na vyhodnocovanou délku důležitou roli. Podle staré normy byl tento parametr počítán na pěti základních délkách a z nich se udělal průměr, ale v těchto pěti základních délkách jsme počítali pouze celé prvky profilu (nedokončené prvky profilu mezi základními délkami

byly zanedbávány). Nová norma uvažuje všechny dokončené prvky na vyhodnocované délce, tudíž se bude výsledek podle nové normy nepatrně lišit od výsledku podle staré normy. [18]

2.5.3 ČSN EN ISO 21920-3

ČSN EN ISO 21920-3 je norma s názvem „Struktura povrchu: Profil – Část 3: Operátory specifikace“, která nahradila normu ČSN EN 4288. Nyní není rozlišováno, zda se jedná o periodický či neperiodický povrch. Konstruktor určuje hodnotu filtru předepsáním na výkrese. Hodnoty filtru jsou různé pro jednotlivé geometrické parametry, podle Tab. 5). Další novinkou je zde tzv. *maximum sampling distance*, což lze přeložit jako maximální vzorkovací délka. Určuje, kolikrát musí přístroj minimálně změřit hodnotu drsnosti. Například pro vyhodnocovanou délku 4 mm je maximální vzorkovací délka 0,5 μm. Takže na této délce musí přístroj naměřit minimálně 8000 vzorků. [19]

Tab. 5) Hodnoty filtru cut-off podle normy ČSN EN 21920-3 [19]

	Třída nastavení				
	Sc1	Sc2	Sc3	Sc4	Sc5
Specifikovaný parametr	Horní toleranční limit (U) specifikovaného parametru				
Rz [μm]	$U \leq 0,16$	$0,16 \leq U \leq 0,8$	$0,8 \leq U \leq 16$	$16 \leq U \leq 80$	$U > 80$
Ra [μm]	$U \leq 0,02$	$0,02 \leq U \leq 0,1$	$0,1 \leq U \leq 2$	$2 \leq U \leq 10$	$U > 10$
Rp [μm]	$U \leq 0,06$	$0,06 \leq U \leq 0,3$	$0,3 \leq U \leq 6$	$6 \leq U \leq 30$	$U > 30$
Rv [μm]	$U \leq 0,10$	$0,10 \leq U \leq 0,5$	$0,5 \leq U \leq 10$	$10 \leq U \leq 50$	$U > 50$
Rq [μm]	$U \leq 0,032$	$0,032 \leq U \leq 0,16$	$0,16 \leq U \leq 3,2$	$3,2 \leq U \leq 16$	$U > 16$
Rzx [μm]	$U \leq 0,23$	$0,23 \leq U \leq 1,15$	$1,15 \leq U \leq 23$	$23 \leq U \leq 115$	$U > 115$
Rt [μm]	$U \leq 0,26$	$0,26 \leq U \leq 1,3$	$1,3 \leq U \leq 26$	$26 \leq U \leq 130$	$U > 130$
Cut-off	0,08	0,25	0,8	2,5	8

2.6 Nejistoty měření

Žádná z měřicích metod není dokonalá. Existuje hned několik faktorů, kvůli kterým není možné naměřit skutečnou hodnotu. Mezi tyto faktory se řadí například:

- osobní zaujatost při čtení analogových nástrojů,
- nedostatečné zkušenosti a znalosti osoby provádějící měření,
- omezené rozlišení přístroje,
- proměnlivé podmínky při měření a nedostatečná znalost jejich vlivu. [20]

Proto při měření vždy vzniká odchylka od skutečné hodnoty. Pro přesnost je tedy nutné statistickou formou zavést rozmezí, o kolik se může naměřená hodnota s danou pravděpodobností lišit od skutečné hodnoty. Pro stanovení intervalu, do kterého musí námi naměřená hodnota spadat, zavádíme nejistoty měření.

2.6.1 Výpočet nejistoty měření

Při vyhodnocování nejistot měření se vypočte nejprve nejistota typu A, poté nejistota typu B. Z nich se jednoduše určuje kombinovaná nejistota využitím Pythagorovy věty.

Nejistota typu A

Nejistota typu A je získávána opakovaným měřením. Pro její výpočet je nejprve určen aritmetický průměr, viz rovnice (7), a z něj pak výběrová směrodatná odchylka aritmetického průměru, podle rovnice (8), která je rovna nejistotě typu A [21].

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (7)$$

kde je

\bar{x} aritmetický průměr naměřených hodnot,

n počet měření,

x_i i-tá naměřená hodnota.

$$u_A = s_{\bar{x}} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})}{n(n-1)} [21] \quad (8)$$

kde je

u_A nejistota typu A,

$s_{\bar{x}}$ výběrová směrodatná odchylka aritmetického průměru,

n počet měření,

\bar{x} aritmetický průměr naměřených hodnot,

x_i i-tá naměřená hodnota.

Nejistota typu B

Někdy bývá označována jako nejistota měřicího přístroje, ale je možné do ní zahrnout všechny nejistoty, které nesouvisí s opakovaným měřením. Například zkušenost a znalost materiálů nebo specifikace výrobce [22]. Je počítána ze vztahu (9). Hlavním faktorem při výpočtu této nejistoty je maximální dovolená chyba, která je odlišná pro různé měřicí přístroje.

$$u_B = \frac{MPE}{\sqrt{3}} [21] \quad (9)$$

kde je

u_B nejistota typu B,

MPE maximální dovolená chyba (Maximum permissible error).

Kombinovaná nejistota

Kombinovaná nejistota je výslednou složkou nejistoty typu A a nejistoty typu B. Je nutné ji vypočítat pro určování shody se specifikací. Počítá se podle vztahu (10).

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \quad (10)$$

kde je

u_C kombinovaná nejistota,

u_A nejistota typu A,

u_B nejistota typu B.

Pomocí kombinované nejistoty je určovaná rozšířená nejistota, viz rovnice (11), pomocí níž se zapisuje výsledná hodnota měřené veličiny. [14]

$$U = k \cdot u_C \quad (11)$$

kde je

U rozšířená nejistota,

k koeficient rozšíření ($k = 2$ pro pravděpodobnost pokrytí 95,45 % u normálního rozdělení),

u_C kombinovaná nejistota. [14]

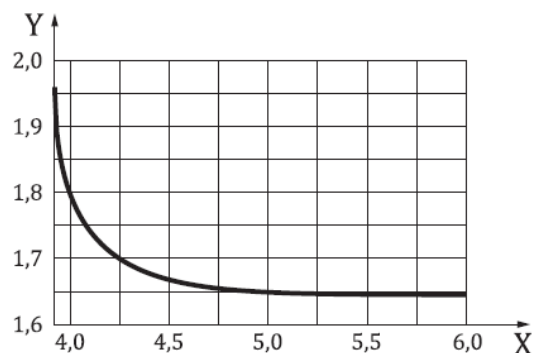
Výsledek bývá zapisován jako $\bar{x} \pm U$. [14]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A NÁVRH ŘEŠENÍ

Nejistota výsledku měření je pouze odhad, který je zaváděn z důvodu nedostatku přesných znalostí při určování hledané veličiny, zavádí se pro téměř každou měřenou veličinu ve formě součtu aritmetického průměru naměřených hodnot a rozšířené nejistoty, viz kapitolu 2.6.1 [22]. Nejistoty měření jsou využívány u všech vlastností ISO GPS, definovaných v kapitole 2.1, s výjimkou textury povrchu, což je nepochopitelné. Při každém měření vznikají nejistoty, proto nesmí být při vyhodnocování zanedbány. Dokonce ani v nových normách z roku 2022 není tento problém žádným způsobem řešen. Proto je tato práce věnována primárně návrhu hodnocení textury povrchu s uvažováním nejistot měření a následně demonstrací tohoto řešení na daném vzorku.

Jelikož nové normy na texturu povrchu platí od konce roku 2022, tak je práce zaměřena na vyhodnocování podle norem ČSN EN 4287,4288, protože se mně ani škole doposud nepodařilo zajistit software, který by byl schopen vyhodnotit parametr Ra podle nové normy. Dostupné jsou zatím pouze jen časově omezené verze softwarů, ale licence k neomezenému používání by byla velice nákladná. Přejít na vyhodnocování podle nových norem je i pro firmy náročný a těžko realizovatelný za tak krátkou dobu. Proto i dnes hodně firem stále využívá staré normy a nejspíše je ještě nějakou dobu hodně firem využívat bude. Vyhodnocování parametru Ra je stejné jak podle nové, tak i podle staré normy, proto by norma, podle které je demonstrační vzorek vyhodnocován, měla mít nulový vliv na výsledek.

Návrh řešení tohoto problému spočívá ve spojení dvou norem a nejistot měření. Tyto normy jsou ČSN EN 4288 a ČSN EN ISO 14253-1:2018, která vymezuje pravidla pro určování shody nebo neshody se specifikací pro zkoušení obrobků a měřidel měřením. Nejprve je nutné zjistit hodnoty vyhodnocovaného parametru, podle normy ČSN EN 4288. Čím více měření je provedeno, tím více se bude výsledek přibližovat reálné hodnotě. Doporučuje se minimálně 10 měření. Z naměřených hodnot jsou určeny nejistoty měření, viz kapitolu 2.6.1. Dále je nutné tyto nejistoty zakomponovat do vyhodnocování, a abychom toho dosáhli, využijeme kombinovanou nejistotu měření a horní specifikaci USL a dolní specifikaci LSL , která je pro vyhodnocování parametrů drsnosti většinou nulová, pouze ojediněle bývá předepisována na výkrese. Dále se spočítá parametr $(USL - LSL) / u_c$, z něj se poté určí hodnota parametru gA (faktor ochranného pásma), viz Obr. 14), a pomocí tohoto parametru je možné určit pole přijetí. Horní mezní rozměr pole přijetí je určen jako $USL - gA \cdot u_c$ a dolní mezní rozměr je u určování parametrů drsnosti povrchu většinou nulový, ale mohou nastat případy, kdy je předepisován. [23]



Obr. 14) Určení parametru gA [23]

kde je

$$X = (USL - LSL) / u_c,$$

$$Y = gA.$$

Maximální hodnota parametru $gA = 1,96$ nastane, pokud bude hodnota $X \leq 3,92$. Minimální hodnota gA je $1,65$, což je hodnota pro $X \geq 6$. Při určování hodnoty gA u ostatních vlastností ISO GPS je nutné vycházet z tabulky hodnot pro Obr. 14), ale u textury povrchu vychází parametr gA téměř ve všech případech $1,65$, protože LSL bývá nulové. Takže můžeme vzorec pro určení gA upravit jako $(USL - 0) / u_c$, kombinovaná nejistota je obvykle velmi malé číslo, proto vyjde výsledná hodnota vysoká. Celá tabulka pro určování gA je v příloze.

3.1 Metoda 16 %

Součást se vyhodnocuje stejným postupem jako podle normy ČSN EN 4288, viz kapitolu 2.4, pouze se neuvažuje jako horní mezní rozměr parametr USL , ale do vyhodnocení se započítávají i nejistoty měření, proto jako horní mezní rozměr uvažujeme parametr $USL - gA \cdot u_c$, který je porovnáván s aritmetickým průměrem naměřených hodnot rozšířených o směrodatnou odchylku.

Při vyhodnocování mohou nastat tři možnosti:

- $\bar{x} + s_x < USL - gA \cdot u_c \rightarrow$ drsnost povrchu **vyhovuje**,
- $\bar{x} + s_x > USL - gA \cdot u_c \rightarrow$ drsnost povrchu **nevyhovuje**,
- $USL > \bar{x} + s_x > USL - gA \cdot u_c \rightarrow$ **nelze určit**, zda drsnost povrchu vyhovuje či nikoliv.

3.2 Metoda maxima

Postup je opět téměř stejný jako v kapitole 2.4, ale je porovnávána maximální hodnota s horním mezním parametrem $USL - gA \cdot u_c$. U metody maxima je také vhodné zamyšlení nad polohou aritmetického průměru. Pokud jeho poloha leží v poli přijetí, pak je možné, že jsou špatné pouze některé naměřené hodnoty, případně se u nich nachází nedokonalost povrchu. To je nutné zkontrolovat, jelikož součást může být v pořádku.

U metody maxima jsou opět rozlišovány tři možnosti:

- $x_{max} < USL - gA \cdot u_c \rightarrow$ drsnost povrchu **vyhovuje**,
- $x_{max} > USL - gA \cdot u_c \rightarrow$ drsnost povrchu **nevyhovuje**,
- $USL > x_{max} > USL - gA \cdot u_c \rightarrow$ **nelze určit**, zda drsnost povrchu vyhovuje či nikoliv.

4 MĚŘENÍ DANÉHO VZORKU

Měření bylo prováděno za pomoci kontaktního profilometru. V softwaru TalyProfile Lite byla dále určena hodnota parametru Ra pro jednotlivá měření. Celé měření bylo realizováno za okolních podmínek znázorněných v Tab. 6).

Tab. 6) Podmínky při měření [vlastní zdroj]

Vlhkost	28,7 %
Teplota	24,1 °C
Tlak	976,2 hPa

4.1 Použitý měřicí přístroj a pomůcky

Všech 12 měření bylo vykonáváno pomocí kontaktního profilometru Taylor-Hobson Surtronic 25. Jelikož má daný vzorek poměrně malou hmotnost, bylo vhodné jej umístit do malého svěráku proti zamezení pohybu.

Taylor-Hobson Surtronic 25

Taylor-Hobson Surtronic 25, zobrazený na Obr. 15), je přenosné měřicí zařízení sloužící pro měření textury povrchu. Přesněji jde o profilovou kontaktní metodu, viz Obr. 5). Tento přístroj je vybaven diamantovým hrotem, který se pohybuje po povrchu měřené součásti. Hrot je za pomoci posuvného mechanismu veden po povrchu měřeného vzorku ve směru horizontálním za pomoci vodící patky, přičemž je pohyb hrotu ve směru vertikálním (pohyb způsobený texturou povrchu součásti) zaznamenáván jako elektrický signál, který je následně převáděn na signál digitální. Vodící patka je místo, ve kterém se přístroj dotýká vzorku, a tím dovoluje libovolné zasouvání a vysouvání hrotu v závislosti na textuře povrchu. Patka musí být dostatečně zaoblená, aby nedošlo ke kopírování profilu drsnosti. Další funkcí vodící patky je, že funguje jako mechanický filtr tvaru a filtr vlnitosti povrchu, který je větší než poloměr patky. Nevýhodou diamantového hrotu může být jeho poloměr, pokud se na povrchu součásti vyskytují úzké prohlubně, hrot je může vynechat. Proto je nutné mít dostatečně malý poloměr hrotu, aby nedošlo k mechanické filtraci některých dat. Specifikace přístroje jsou vypsány v Tab. 7). [21]

Tab. 7) Technické specifikace měřicího přístroje [21]

Technické specifikace Taylor-Hobson Surtronic 25	
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



Obr. 15) Měřicí přístroj Taylor-Hobson Surtronic 25 [vlastní zdroj]

4.2 Popis měřeného vzorku

Měřený vzorek, viz Obr. 16), byl poskytnut vedoucí práce Ing. Vendulou Sámelovou, Ph.D, slouží pro demonstraci navržené metody řešení. Vzorek je z infiltrovaného karbidu křemíku SiSiC. Karbid křemíku SiC je chemická sloučenina uhlíku a křemíku. V přírodě se vyskytuje velmi vzácně, a to ve formě nerostu s názvem *moissanit*, který se svou tvrdostí vyrovná diamantu. Nejčastěji se však vyrábí karbotermickou redukcí oxidu křemičitého SiO_2 za teplot až 2600 °C. [24]

Z karbidu křemíku se poté vyrábí infiltrovaný karbid křemíku SiSiC. Výrobcem je společnost CeramTec Czech Republic, s.r.o. Výroba je prováděna metodou reakčního slinování. Součást ze směsi práškového α -SiC a volného uhlíku C je vylišována do požadovaného tvaru a následně mechanicky opracována. Výsledná celistvá součást je infiltrována křemíkem Si v radiofrekvenčních pecích při teplotě 1500 °C ve vakuu nebo inertní atmosféře. Při infiltraci jsou kovovým křemíkem zaplněny všechny póry a dutiny struktury, díky čemuž vzniká těsný nenasákavý materiál. [24]

Karbid křemíku má mimořádné vlastnosti. Jedná se především o vysokou tvrdost, výbornou otěruvzdornost, nízkou měrnou hmotnost, výborné kluzné vlastnosti, vysokou odolnost vůči korozi a dobrou tepelnou vodivost. Vlastnosti materiálu jsou podrobněji popsány v Tab. 8). [24]

Zmiňované vlastnosti udávají oblast využití materiálu. Například pro trubky a armatury, korozivzdorné kontejnery, hořáky, trysky, přesná valivá i kluzná ložiska, těsnicí kroužky a díky chemické nezávadnosti jej lze využít i v potravinářském průmyslu. [24]



Obr. 16) Infiltrovaný karbid křemíku SiSiC [vlastní zdroj]

Tab. 8) Vlastnosti infiltrovaného karbidu křemíku SiSiC [24]

Infiltrovaný karbid křemíku SiSiC			
Obchodní název		Rocar®SiG	
Výrobce		CeramTec Czech Republic s.r.o.	
Vlastnosti			
Lomová houževnatost		[Mpa·m ^{1/2}]	4
Pevnost v tlaku		[MPa]	> 3500
Pevnost v ohybu 20 °C		[MPa]	340
Pevnost v ohybu 1000 °C		[MPa]	340
Modul pružnosti		[GPa]	380
Weibullův modul		[-]	> 14
Poissonovo číslo		[-]	0,17
Tvrdost		[HV 0,2]	1200(Si)/2700(SiC)
Hustota		[g·cm ⁻³]	3,07
Tepelná vodivost		[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	115
Koef. tepelné roztažnosti α	20–100 °C	[10 ⁻⁶ ·K ⁻¹]	3,4
	20–400 °C		4,1
	20–600 °C		4,4
	20–1000 °C		4,9
Maximální použitelná teplota		[°C]	1350
Měrný elektrický odpor	20 °C	[Ω·cm]	1
	400 °C		100

Elektrojiskrové řezání SiSiC drátovou metodou

Při elektrojiskrovém řezání drátovou metodou je řezným nástrojem drát, který vede elektrický proud, přičemž musí být řezaný materiál vodivý. SiSiC byl vyřezán z polotovaru o průměru $D = 318 \text{ mm}$ a tloušťce $t = 7 \text{ mm}$. Polotovar je vyobrazen na Obr. 17). [24]



Obr. 17) Polotovar SiSiC připravený pro vyřezání vzorku [24]

Vzorek byl vyřezán na elektroerozivní drátové rezačce Robofil 310 od firmy Charmilles Technologies. Touto metodou vznikl neperiodický povrch. Nástrojem pro řezání byl mosazný drát o průměru $0,25 \text{ mm}$. Parametry použité při řezání jsou zobrazeny v Tab. 9). [24]

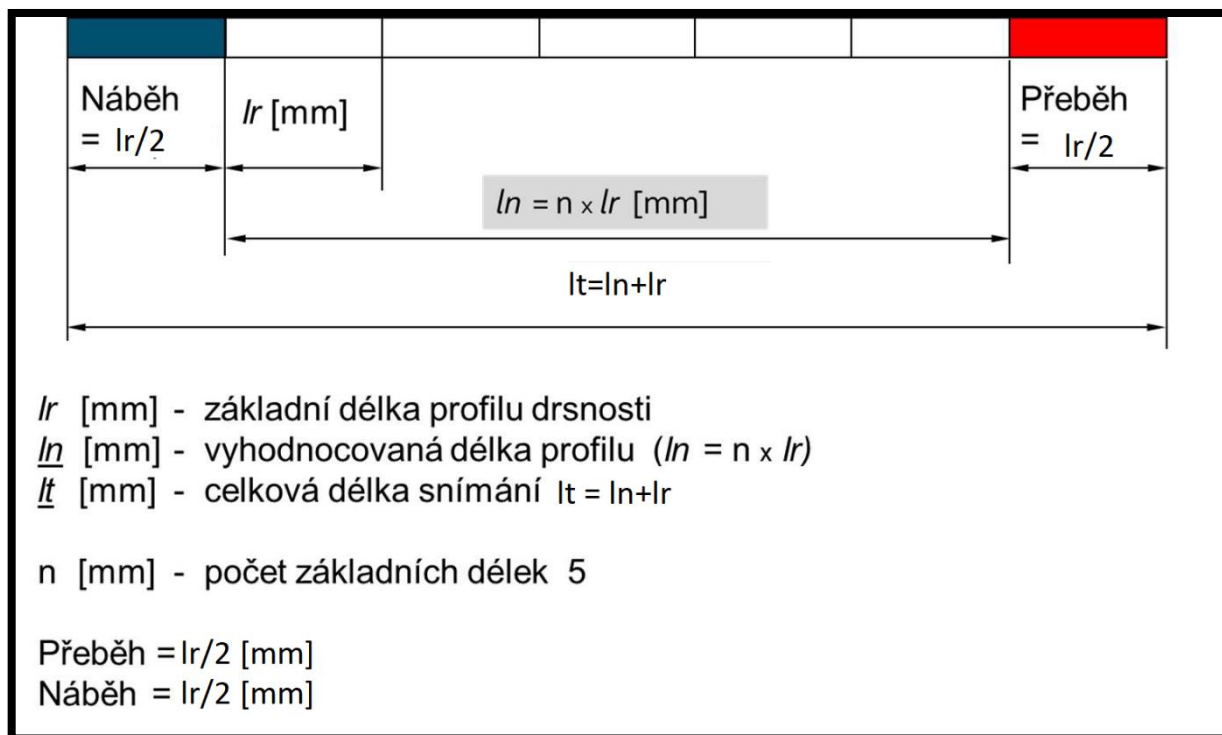
Tab. 9) Podmínky při řezání [24]

Režim řezání	Dokončování
Dielektrikum	Deionizovaná voda
Polarita elektrody	[–]
Napětí naprázdno	120 V
Pracovní proud výboje	16 A
Doba trvání pulzu	0,2 μs
Doba pauzy	3,8 μs
Mechanické napětí drátu	1,4 kg

4.3 Metodika měření

Prvním krokem bylo nastavení přístroje Taylor-Hobson Surtronic 25. Přístroj disponuje mnoha funkcemi, ale pro každé měření je nejdůležitější nastavení měřené délky a tzv. dumping módu. Z měřené délky je potom možné v softwaru vyříznout celkovou délku snímání, ale měřená délka musí být pro správné vyhodnocení větší nebo rovna celkové délce snímání. Celková délka snímání je délka, která je měřena přístrojem. Je to v podstatě vyhodnocovaná délka rozšířená na každé straně o polovinu základní délky, podle Obr. 18). Je zaváděna pro minimalizaci nepřesností přístroje při začátku a konci měření.

Dále bylo nutné přístroj nastavit do dumping módu. Tento mód umožňuje přenést naměřené hodnoty do počítače, kde je lze jednoduše vyhodnotit přes software TalyProfile Lite.

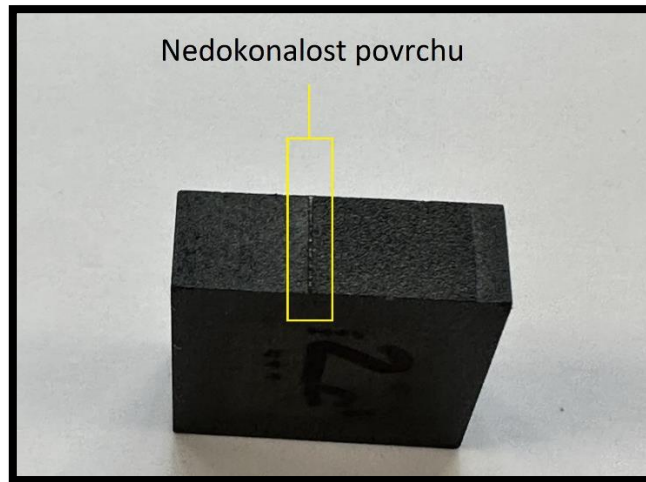


Obr. 18) Celková délka snímání měřicího přístroje [21]

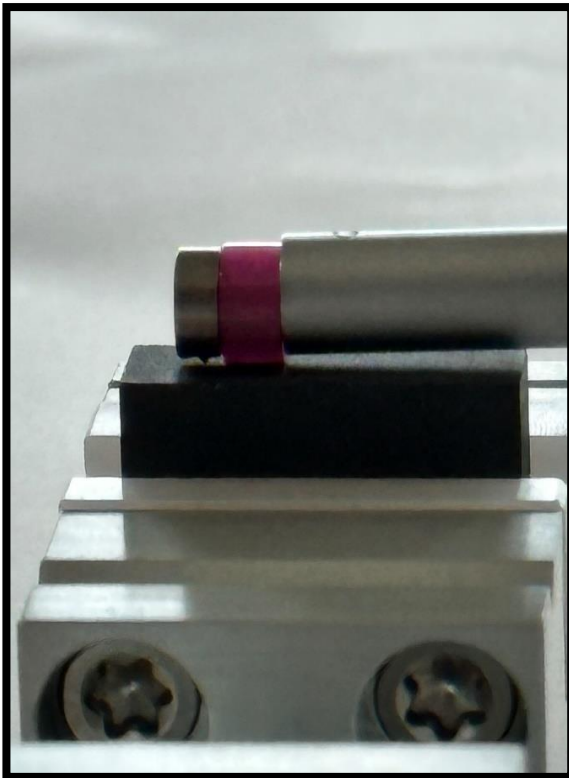
Pro nastavení délky měření přístroje bylo nutné odhadnout hodnotu cut-off, ze které určíme všechny ostatní délky důležité pro měření. Vzorek nebyl vyráběn soustružením ani frézováním, tudíž volíme postup určení hodnoty cut-off pro neperiodický povrch, viz kapitolu 2.4.4. Pro daný vzorek vyšla hodnota cut-off 2,5 mm, takže celková délka snímání byla 15 mm. Na přístroji byla nastavena měřená délka 16 mm, aby se mohl odříznout okraj vzorku, jelikož měl lehce poškozené rohy.

Po nastavení přístroje byl vzorek umístěn do svěráku a diamantový hrot byl nastaven na kraj vzorku. Bylo nutné zkontrolovat, zda je vodicí patka vhodně opřena o vzorek, viz Obr. 20).

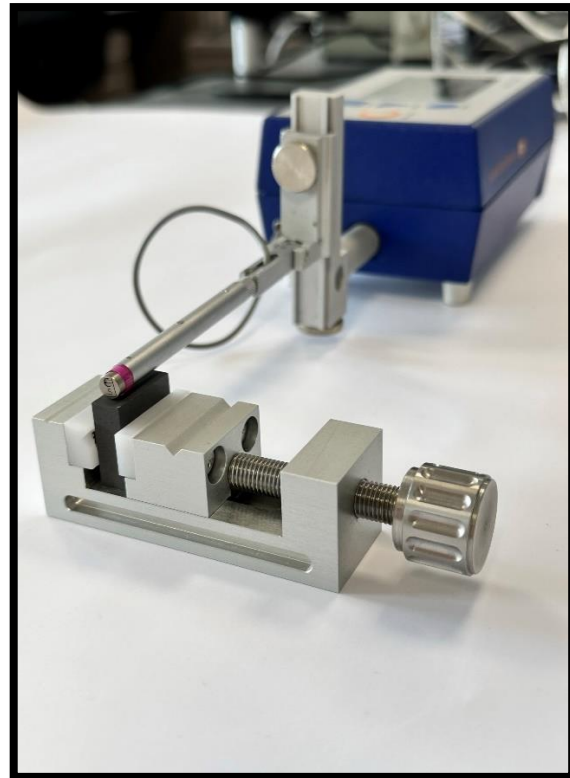
Jakmile bylo vše nastaveno, bylo spuštěno měření zmáčknutím tlačítka MEASURE. Po každém měření byla mírně změněna poloha vzorku vůči diamantovému hrotu, aby byl reprezentativně naměřen celý povrch vzorku, nikoliv jen jeden profil. Měření bylo realizováno celkem dvanáctkrát, a to čtyřikrát pro tři povrchy. Jeden povrch nebyl měřen, jelikož obsahoval nedokonalosti povrchu, které neřadíme do drsnosti povrchu, nedokonalost je zobrazena na Obr. 19). Nedokonalost vznikla už při elektrojiskrovém řezání, mohla být způsobena buď nedokončením celého cyklu řezání, nebo se může jednat o část utrženého řezacího drátu.



Obr. 19) Nedokonalost povrchu na vzorku [vlastní zdroj]



a) Nastavená vodící patka na vzorku

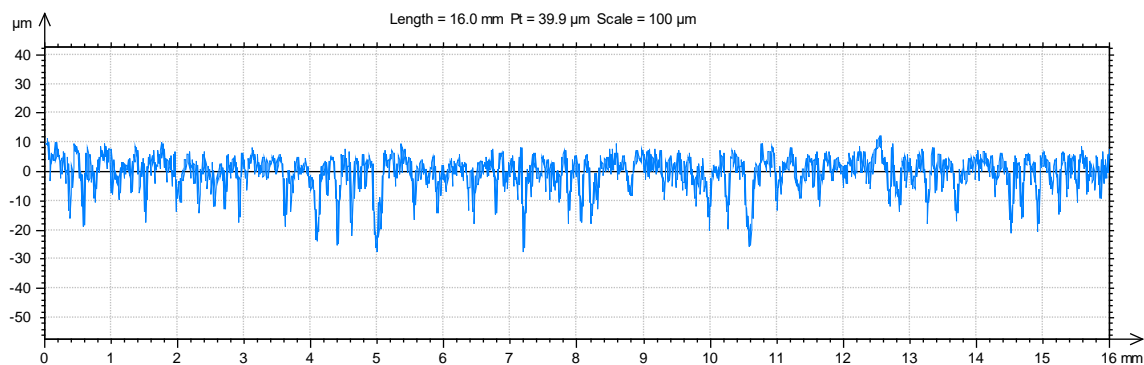


b) Nastavený přístroj před měřením

Obr. 20) Měření vzorku [vlastní zdroj]

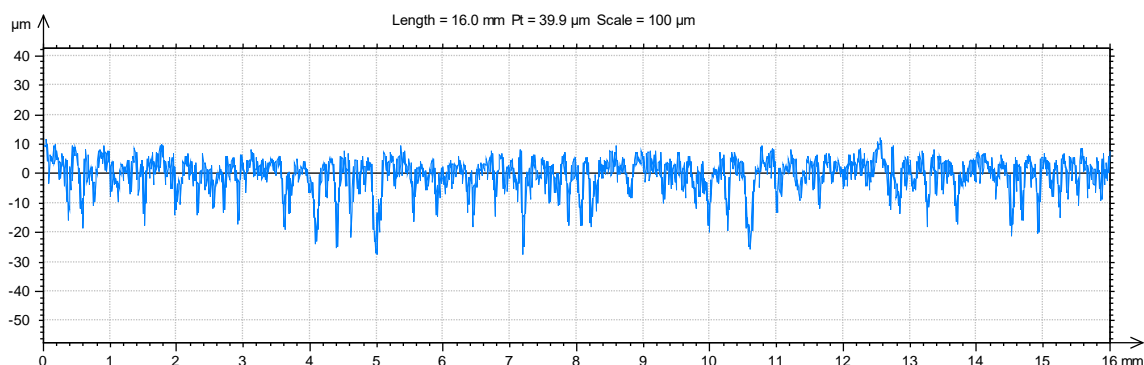
4.4 Získávání naměřených hodnot z TalyProfile Lite

Nejprve je přístrojem nahrán naměřený povrch do softwaru, viz Obr. 21).



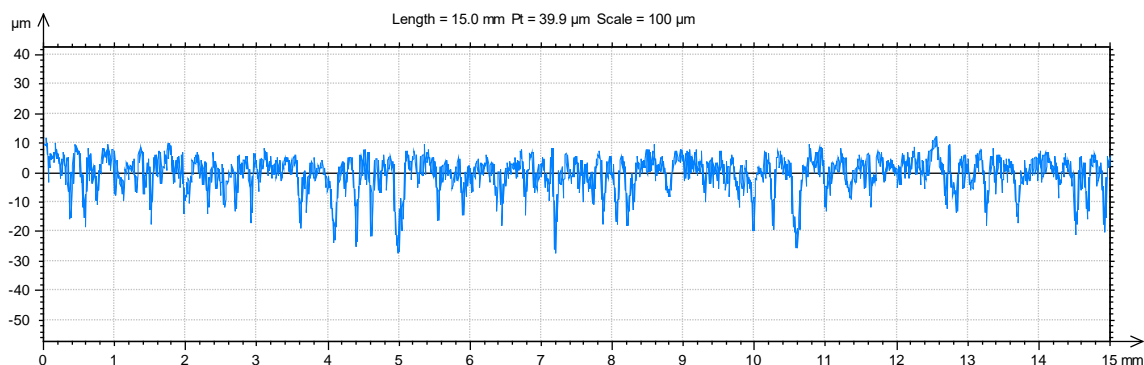
Obr. 21) Naměřený povrch

Dalším krokem je zavedení filtru tvaru vzorku λf . Toho je možné v softwaru docílit pomocí funkce levelling, viz Obr. 22).



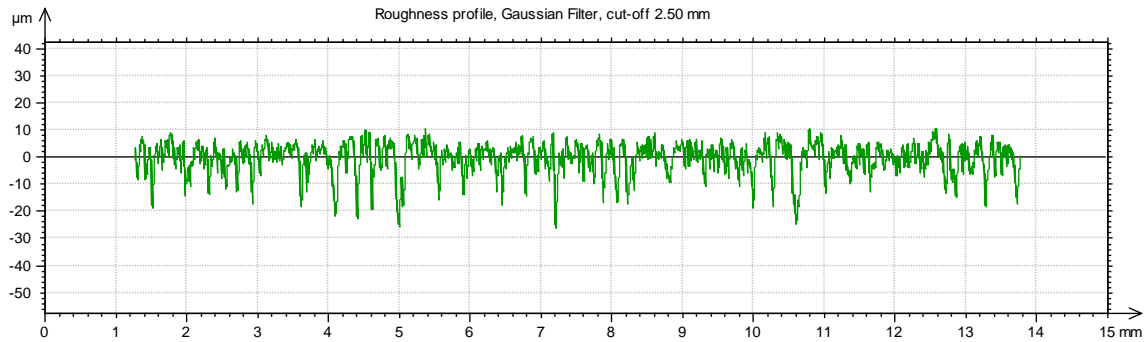
Obr. 22) Zavedení filtru λf

Z obrázků je patrné, že délka měřeného povrchu je 16 mm, proto je nutné vyříznout 15 mm, protože 15 mm je celková délka snímání pro filtr cut-off 2,5 mm, viz Obr. 23). V softwaru se k tomu využívá funkce zooming.

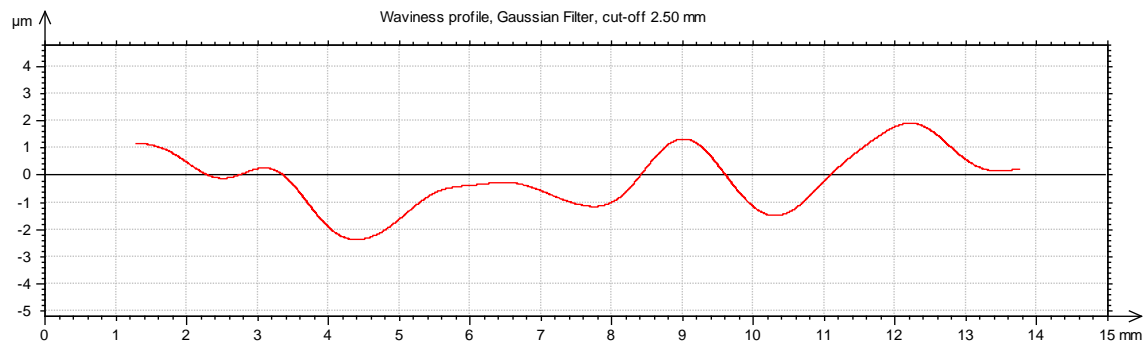


Obr. 23) Vyříznutí celkové délky snímání

Dále už je možné zobrazit profil drsnosti, Obr. 24), a profil vlnitosti, Obr. 25).



Obr. 24) Drsnost profilu povrchu vzorku [vlastní zdroj]



Obr. 25) Vlnitost profilu povrchu vzorku [vlastní zdroj]

Dále je již možné určit hodnoty parametrů drsnosti povrchu pomocí funkce parameters table, viz Obr. 26).

ISO 4287			
Amplitude parameters - Roughness profile			
Rp	10.2	µm	Gaussian filter, 2.5 mm
Rv	22.6	µm	Gaussian filter, 2.5 mm
Rz	32.8	µm	Gaussian filter, 2.5 mm
Rc	12.2	µm	Gaussian filter, 2.5 mm
Rt	37.4	µm	Gaussian filter, 2.5 mm
Ra	4.43	µm	Gaussian filter, 2.5 mm
Rq	5.84	µm	Gaussian filter, 2.5 mm
Rsk	-1.18		Gaussian filter, 2.5 mm
Rku	4.51		Gaussian filter, 2.5 mm
Material Ratio parameters - Roughness profile			
Rmr	0.328	%	$c = 1 \mu\text{m}$ under the highest peak, Gaussian filter, 2.5 mm
Rdc	8.41	µm	$p = 20\%$, $q = 80\%$, Gaussian filter, 2.5 mm

Obr. 26) Parametry profilu drsnosti povrchu [vlastní zdroj]

Stejný postup byl prováděn pro každé měření a dále byl zaznamenán parametr Ra pro vyhodnocení textury povrchu vzorku. Zaznamenané hodnoty jsou uvedeny v Tab. 10).

Tab. 10) Naměřené hodnoty parametru Ra [vlastní zdroj]

Naměřené hodnoty Ra					
První povrch		Druhý povrch		Třetí povrch	
Měření	Ra [μm]	Měření	Ra [μm]	Měření	Ra [μm]
1	4,43	1	4,69	1	4,54
2	4,48	2	4,4	2	3,78
3	4,62	3	4,91	3	4,38
4	4,54	4	4,59	4	4,27

5 VYHODNOCOVÁNÍ DANÉHO VZORKU

Vzorek je vyhodnocován podle normy ČSN EN ISO 4288 a poté podle návrhu řešení s uvažováním nejistot podle normy ČSN EN ISO 14253:2018. Pro použitý infiltrovaný karbid křemíku nebyla k dispozici předepsaná specifikace, proto jsou v práci voleny tři velikosti specifikace pro demonstraci všech případů, které mohou nastat pro metodu 16 % i pro metodu maxima.

Pro vyhodnocení vzorků bylo nutné nejprve statisticky zpracovat naměřená data, viz Tab. 11).

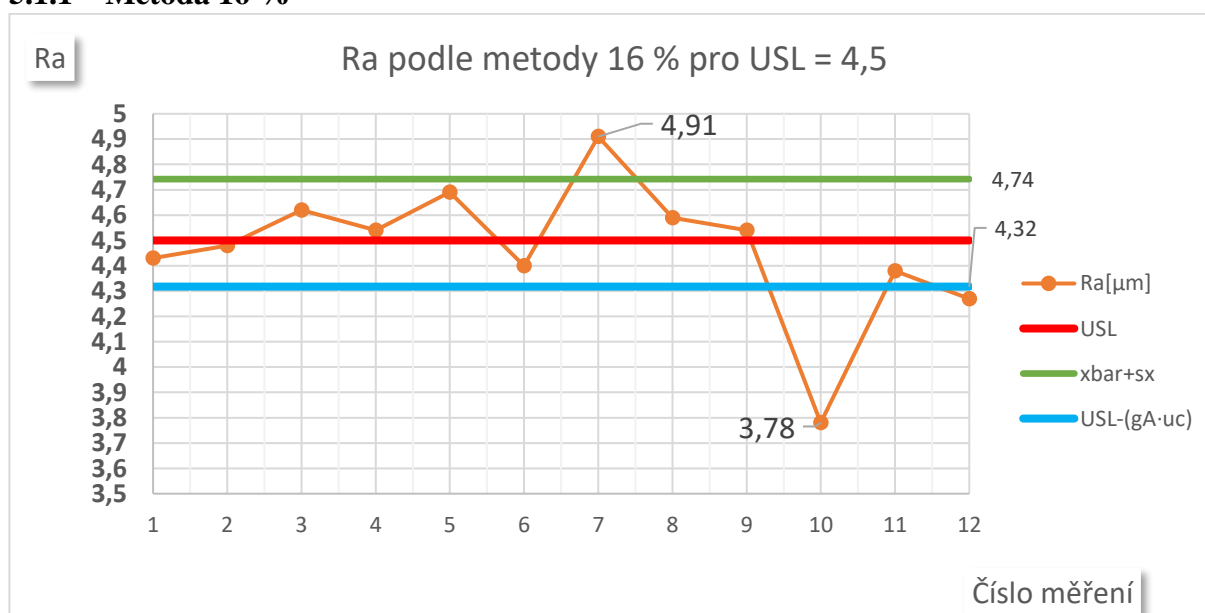
Tab. 11) Statistické zpracování naměřených dat [vlastní zdroj]

xmax	4,910
xmin	3,780
xbar	4,469
sx	0,273
xbar+sx	4,742
uA	0,079
uB (odhad)	0,077
uc	0,111
U (k = 2)	0,221
Výsledek	4,469±0,221

Nejistota typu B byla odhadnuta z aritmetického průměru podle vztahu (9).

5.1 Vyhodnocení pro $USL = 4,5$

5.1.1 Metoda 16 %

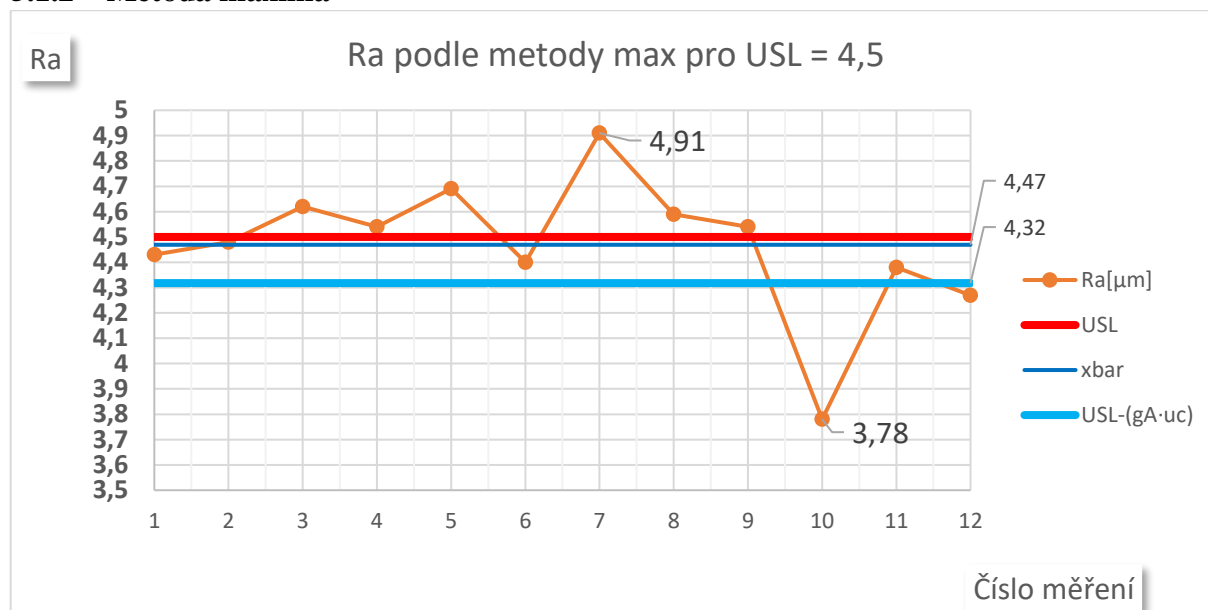


Obr. 27) Vyhodnocení Ra pro $USL = 4,5$ pro metodu 16 % [vlastní zdroj]

Při vyhodnocování podle normy ČSN EN ISO 4288 musí vzorek splňovat kritéria uvedená v kapitole 2.4.3, kterým vzorek **nevyhovuje**. Hodnota $\bar{x} + s_x$ je větší než hodnota USL , viz Obr. 27).

Z grafu je možné zpozorovat, že $USL - (gA \cdot uc)$ je o $0,43 \mu m$ menší než $\bar{x} + s_x$, proto vzorek této specifikaci podle metody s uvažováním nejistot také **nevyhovuje**.

5.1.2 Metoda maxima



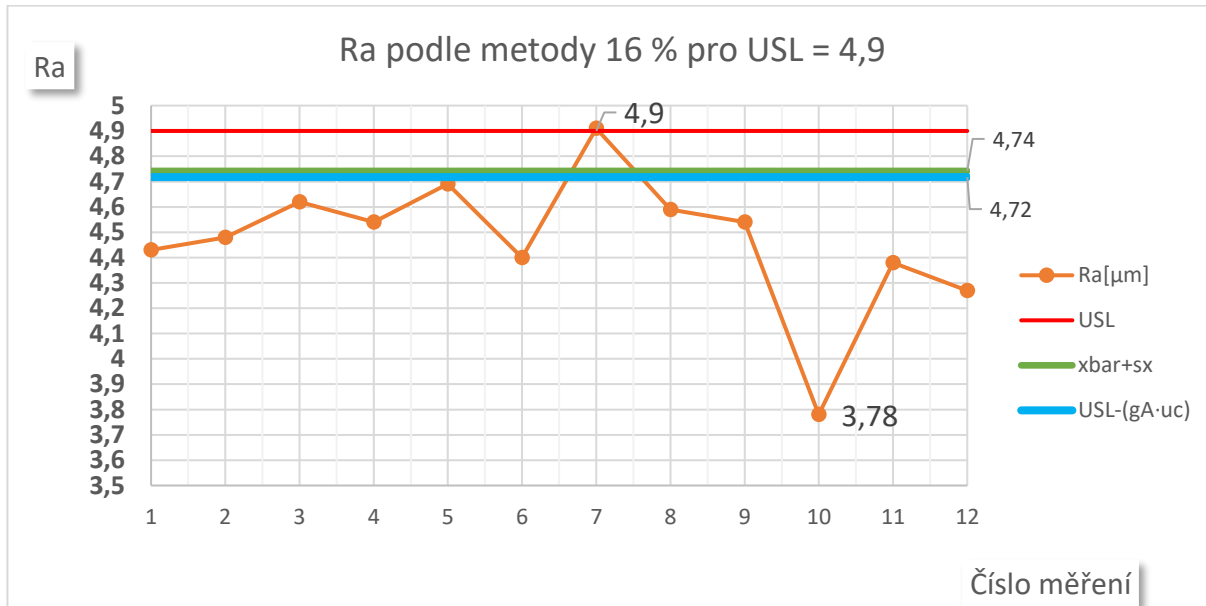
Obr. 28) Vyhodnocení Ra pro $USL = 4,5$ pro metodu maxima [vlastní zdroj]

Pro vyhodnocování podle ČSN EN ISO 4288 s využitím metody maxima musí všechny naměřené hodnoty ležet pod specifikací $USL = 4,5$. Pod touto hodnotou se nachází pouze šest z dvanácti naměřených hodnot, dokonce i aritmetický průměr splňuje toto kritérium pouze o $0,031 \mu m$. Tudíž vzorek **nevyhovuje**, viz Obr. 28).

Podle metody s uvažováním nejistot musí při metodě maxima ležet všechny naměřené hodnoty pod kritériem $USL - (gA \cdot uc)$, to splňují pouze dvě z dvanácti naměřených hodnot, takže vzorek opět **nevyhovuje**.

5.2 Vyhodnocení pro $USL = 4,9$

5.2.1 Metoda 16 %

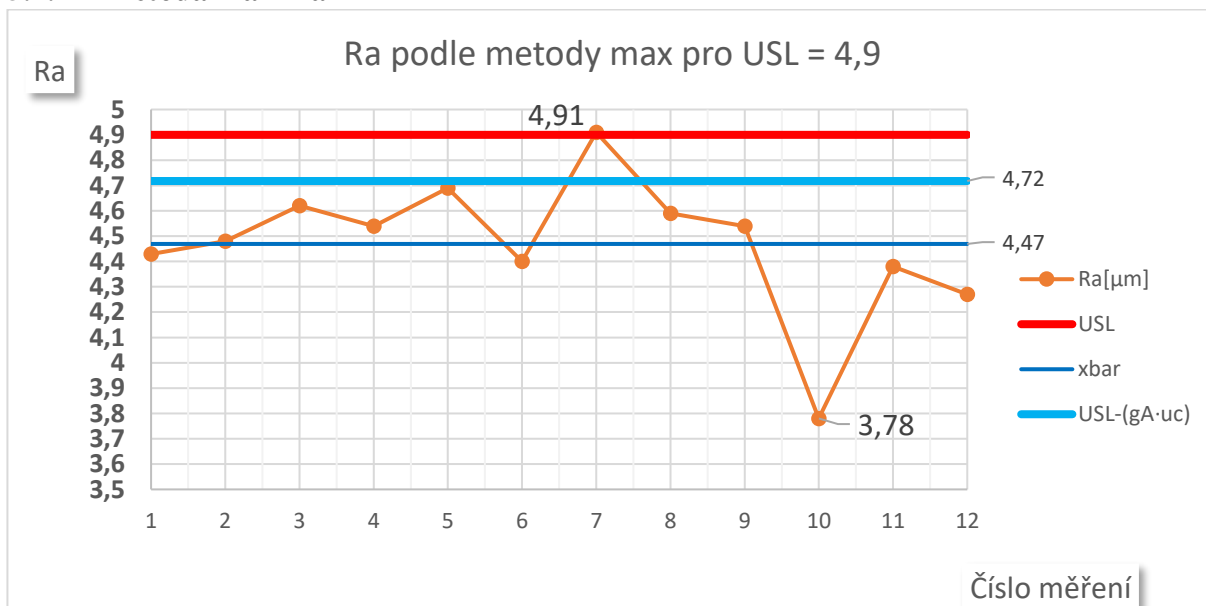


Obr. 29) Vyhodnocení Ra pro $USL = 4,9$ metodou 16 % [vlastní zdroj]

Při vyhodnocování podle staré normy je možné prohlásit, že vzorek **vyhovuje** specifikaci, jelikož hodnota $xbar + sx$ je nižší než hodnota USL o $0,158 \mu\text{m}$, viz Obr. 29).

Pro vyhodnocování s uvažováním nejistot jsou výsledky sporné. Hodnota $xbar + sx$ je o 2 setiny mikrometru větší než hodnota $USL - (gA \cdot uc)$, proto vzorek **nevyhovuje**, neleží v poli přijetí.

5.2.2 Metoda maxima



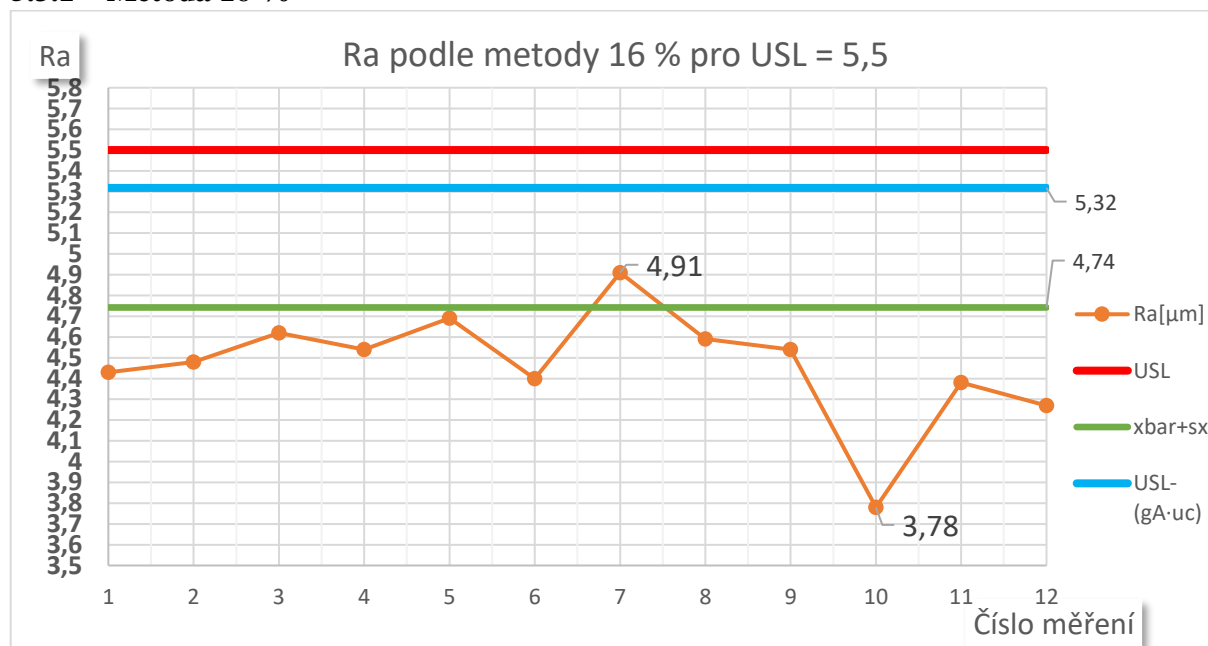
Obr. 30) Vyhodnocení Ra pro $USL = 4,9$ metodou maxima [vlastní zdroj]

Podle ČSN EN ISO 4288 **nevyhovuje** specifikaci. Všechny naměřené hodnoty jsou menší než hodnota USL kromě sedmé hodnoty, která toto kritérium převyšuje o $0,01 \mu m$, viz Obr. 30).

Podle postupu s uvažováním nejistot vzorek **nevyhovuje**, všechny hodnoty leží v poli přijetí kromě sedmé naměřené hodnoty, která je blízká hodnotě USL , ale převyšuje ji a to o $0,01 \mu m$.

5.3 Vyhodnocení pro $USL = 5,5$

5.3.1 Metoda 16 %

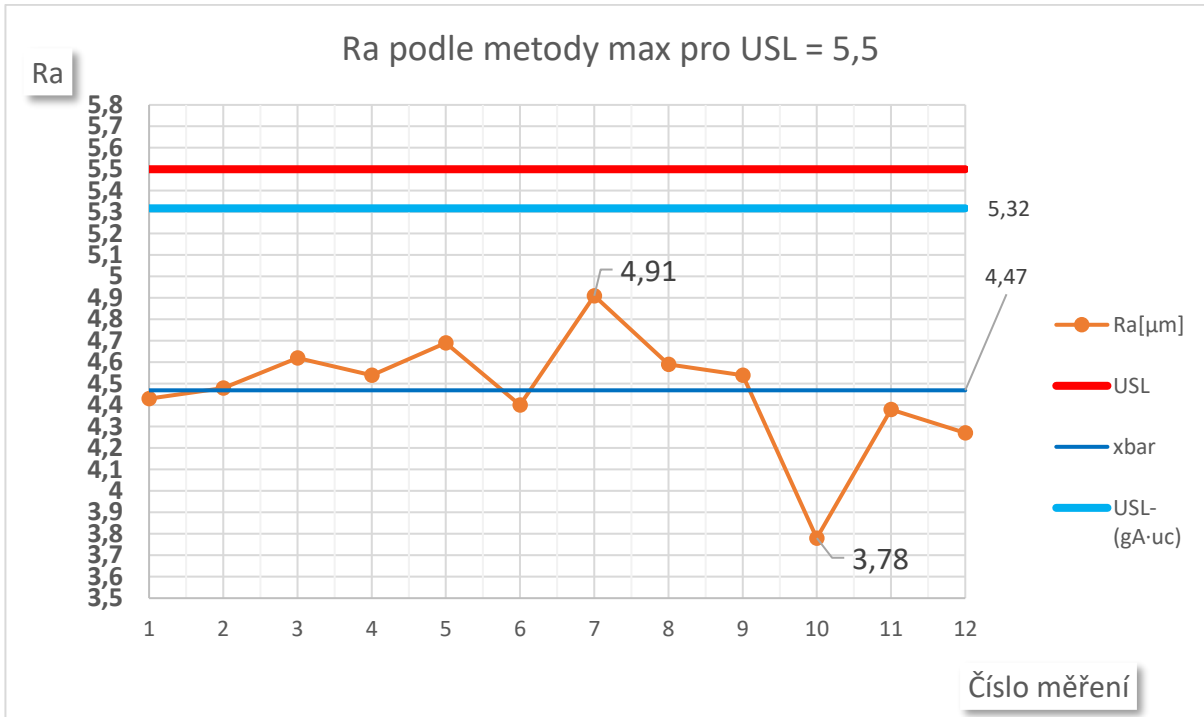


Obr. 31) Vyhodnocení Ra pro $USL = 5,5$ metodou 16 % [vlastní zdroj]

Podle normy ČSN EN ISO 4288 vzorek **vyhovuje** specifikaci, jelikož hodnota $\bar{x} + s_x$ je menší než hodnota USL o více než $0,5 \mu m$, viz Obr. 31).

Podle metody s uvažováním nejistot můžeme o vzorku také prohlásit, že **vyhovuje**. Hodnota $\bar{x} + s_x$ je menší než hodnota $USL - (gA \cdot uc)$, takže můžeme o naměřených hodnotách prohlásit, že leží v poli přijetí.

5.3.2 Metoda maxima



Obr. 32) Vyhodnocení Ra pro $USL = 5,5$ metodou maxima [vlastní zdroj]

Všechny naměřené hodnoty jsou menší než $USL-(gA-uc)$, viz Obr. 32). Nejvíce se této hodnotě přiblížilo sedmé měření, ale pořád je mezi nimi rozdíl o více než $0,4 \mu m$, proto můžeme bezpečně prohlásit, že vzorek **vyhovuje** jak pro metodu vyhodnocování podle ČSN EN ISO 4288, tak i pro metodu vyhodnocování s uvažováním nejistot.

6 DISKUSE VÝSLEDKŮ

Tab. 12) Shrnutí výsledků vyhodnocování

Shrnutí výsledků vyhodnocování					
Metoda 16 %					
USL [μm]	USL-($gA \cdot uc$) [μm]	$\bar{x} + s_x$ [μm]	ISO 4288	ISO 14253	\bar{x}
4,50	4,32	4,74	4,50 < 4,74	4,32 < 4,74	4,47
4,90	4,72	4,74	4,90 > 4,74	4,72 < 4,74	4,47
5,50	5,32	4,74	5,50 > 4,74	5,32 > 4,74	4,47
Metoda max					
USL [μm]	USL-($gA \cdot uc$) [μm]	x_{max} [μm]	ISO 4288	ISO 14253	\bar{x}
4,50	4,32	4,91	4,50 < 4,91	4,32 < 4,91	4,47
4,90	4,72	4,91	4,90 < 4,91	4,72 < 4,91	4,47
5,50	5,32	4,91	5,50 > 4,91	5,32 > 4,91	4,47

Vyhovuje

Nevyhovuje

V Tab. 12) jsou zobrazeny všechny výsledky vyhodnocování. Již z této tabulky je patrné, že metoda s uvažováním nejistot má přísnější kritéria než metoda podle ČSN EN ISO 4288, jelikož pole přijetí je u metody s uvažováním nejistot zmenšeno o součin parametru gA a kombinované nejistoty.

Pro obě metody vyhodnocování je vhodné kontrolovat více parametrů než pouze ty, pro které podle dané metody vyhodnocujeme. Např. pro metodu 16 % je dobré kontrolovat i maximální a minimální naměřené hodnoty, může nastat případ, kdy vzorek nevyhovuje specifikaci, ale po kontrole naměřených hodnot je možné jej znovu přeměřit a tímto způsobem se sníží počet zmetků, takže i firma ušetří hodně peněz. Proto je nutná dostatečná kvalifikace osoby provádějící vyhodnocování součástí.

Při vyhodnocování podle metody maxima je vhodné sledovat i aritmetický průměr z naměřených hodnot, může nastat případ, kdy je pouze jedna hodnota větší než hodnota specifikace, ale podle pravidel vyhodnocování ji není možné označit za správnou. Např. pro specifikaci $USL\ 4,90\ \mu\text{m}$ je vzorek zamítnut, ale maximální hodnota je větší pouze o $0,01\ \mu\text{m}$. V tomto případě, pokud je patrné, že aritmetický průměr hodnot leží výrazně pod horní mezní specifikací, je z ekonomického hlediska vhodné tento vzorek znovu překontrolovat, jelikož mohlo pouze dojít k chybě měření nebo se v měřeném místě mohla vyskytovat nedokonalost povrchu, případně jiná část textury povrchu, kterou neřadíme do drsnosti. Opakováním měření je možné u sporných případů ověřit, zda má vzorek drsnost povrchu ve shodě se specifikací či nikoliv.

Naměřené hodnoty Ra jsou velmi vysoké na to, že byl vzorek vyroben elektrojiskrovým řezáním drátkovou metodou. Hodnota parametru Ra se u této metody pohybuje většinou okolo $0,8\ \mu\text{m}$. [25] Tato metoda nekonvenčních technologií výroby součástí je vhodná pro dobře vodivé materiály, což infiltrovaný karbid křemíku není.

7 ZÁVĚR

V práci se podařilo úspěšně navrhnout metodiku vyhodnocování profilových parametrů textury povrchu s uvažováním nejistot a následně demonstrovat tento návrh na měření daného vzorku za pomoci kontaktního profilometru. Měření a vyhodnocování bylo prováděno podle staré, již neplatné normy ČSN EN 4287 a 4288, jelikož zatím není volně dostupný software, který by byl schopen vyhodnotit parametry podle nových norem ČSN EN 21920. V práci byl měřen pouze profilový parametr Ra , jehož výsledek by měl být stejný jak pro starou, tak i novou normu.

Tato navržená metodika hodnocení profilových parametrů textury povrchu by mohla být přínosná pro strojírenské firmy z oblasti přesného strojírenství. Navržená metoda s uvažováním nejistot má přísnější kritéria než samotná norma ČSN EN 4288, tudíž ve velkosériové výrobě bude kladen větší důraz na preciznost, jelikož po zavedení tohoto návrhu vznikne více nevyhovujících součástí. Při splnění všech kritérií tohoto návrhu bude firma s větší pravděpodobností vyrábět součásti, které budou schopny spolehlivě plnit svoji funkci, tím se zvedne kvalita a spolehlivost vyráběných součástí.

Textura povrchu je velmi obsáhlé téma, tato práce by se dala rozšířit hned v několika směrech. Nejaktuálněji by byl vhodný další výzkum ohledně nových norem ČSN EN 21920, jejich stav poznání a způsob vyhodnocování. Dalším rozšířením by mohly být přesněji zpracovány změny v nových normách, jelikož tato práce byla věnována primárně návrhu vyhodnocení s uvažováním nejistot, proto je kapitola ohledně nových norem pouze stručná a neobsahuje ani zdaleka všechny změny. Dalším pokračováním by mohl být návrh uvažování nejistot při vyhodnocování podle nových norem. Další práce by se mohly zabývat plošnými parametry textury povrchu, které jsou mnohem složitější než profilové parametry, ale na druhou stranu jsou taky přesnější.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- ČSN EN ISO 14638. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - maticový model*.
 1] Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- JÁNKOVÝCH, Róbert. *Metrologie textury povrchu I* [online]. Brno, 2022 [cit. 2023-02-27]. Dostupné z: <https://moodle.vut.cz>. Výukový materiál. Fakulta strojního inženýrství - Vysoké učení technické v Brně.
- Slovník spisovného jazyka českého. In: *Slovník spisovného jazyka českého*
 3] [online]. Praha: Středisko společných činností AV ČR, 2011 [cit. 2023-02-27]. Dostupné z: <https://ssjc.ujc.cas.cz/>
- MARXER, Michael, Carlo BACH a Claus P. KEFERSTEIN. *Grundlagen der Fertigungsmesstechnik*. 1. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2021. ISBN 978-3-658-34168-8. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1007/978-3-658-34168-8_2](https://doi.org/10.1007/978-3-658-34168-8_2)
- Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Nedokonalosti povrchu - Termíny, definice a parametry*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2000.
- WHITEHOUSE, David. *Surface and Their Measurement*. 1. London: Butterworth-Heinemann, 2004. ISBN 978-1-903996-01-0.
- Exploring surface texture* [online]. Leicester, 2011, 110 s. [cit. 2023-03-06].
 7] Dostupné z: <https://www.southampton.ac.uk/~assets/doc/Engineering/exploring%20surface%20texture.pdf>. Výukový materiál. University of Southampton.
- ČSN EN ISO 1101. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Geometrické tolerování - Tolerance tvaru, orientace, umístění a házení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- PETŘKOVSKÁ, Lenka. *Technická měření a metrologie teoretický základ*.
 9] *Technická měření a metrologie teoretický základ* [online]. Ostrava, 2013, 20 [cit. 2023-02-27]. ISBN 978-80-248-3035-3. Dostupné z: https://projekty.fs.vsb.cz/463/edubase/VY_01_025/Technick%C3%A1%20m%C4%9B%C5%99en%C3%AD%20a%20metrologie%20-%20Teoretick%C3%BD%20z%C3%A1klad/02%20Text%20pro%20e-learning/Technick%C3%A1%20m%C4%9B%C5%99en%C3%AD%20a%20metrologie%20-%20Teoretick%C3%BD%20z%C3%A1klad_12.pdf
- Elektronická učebnice ELUC. *ELUC* [online]. 2015 [cit. 2023-02-27]. Dostupné
 10] z: <https://eluc.ikap.cz/>
- Accretech.eu. *Accretech.eu: Měření kruhovitosti* [online]. 2019 [cit. 2023-02-27].
 11] Dostupné z: <https://www.accretech.eu/cs/mereni-tvaru/mereni-kruhovitosti/>
- Geometrické tolerance. *Technická dokumentace* [online]. [cit. 2023-02-27].

- 12] Dostupné z: <http://www.studentcar.cz/files/vyuka/TTD/lesson06.pdf>
- PROCHÁZKA, Lukáš. *Technická dokumentace* [online]. [cit. 2023-02-27].
- 13] Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2505280/>
- JÁNKOVÝCH, Robért. *Metrologie textury povrchu*. Brno, 2023. Přednáška.
- 14] Fakulta strojního inženýrství - Vysoké učení technické v Brně.
- ČSN EN ISO 4287. *Struktura povrchu: Profilová metoda: Termíny, definice a parametry struktury povrchu. 2*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- 15] ČSN EN ISO 4288. *Struktura povrchu: Profilová metoda: Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu. 1*. Praha: Český normalizační institut, 1999.
- 16] ČSN EN ISO 21920-1. *Geometrické specifikace produktu (GPS) Struktura povrchu: Profil - Část 1: Indikace struktury povrchu. 1*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2022.
- 17] ČSN EN ISO 21920-2. *Geometrické specifikace produktu (GPS) Struktura povrchu: Profil: Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2022.
- 18] ČSN EN ISO 21920-3. *Geometrické specifikace produktu (GPS) Struktura povrchu: Profil - Část 3: Operátory specifikace. 1*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2022.
- 19] Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement. *JCGM Publications: Guides in Metrology* [online]. 2008, 1-134 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.bipm.org/en/committees/jc/jcgm/publications/>
- 20] *Metody vyhodnocování textury povrchu* [online]. Brno, 2021 [cit. 2023-04-03].
- 21] Výukový materiál. Fakulta strojního inženýrství - Vysoké učení technické v Brně.
- TNI 01 4109-3. *Nejistoty měření - část 3: Pokyn pro vyjádření nejistoty měření. 1*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- 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] SÁMELOVÁ, Vendula. *Popis obráběného materiálu*. Brno, 2023. Výukový materiál. Fakulta strojního inženýrství - Vysoké učení technické v Brně.
- 24] KALIVODA, Milan. *Technologie obrábění: Nekonenční metody obrábění*. Brno, 2023. Cvičení. Fakulta strojního inženýrství - Vysoké učení technické v Brně.
- 25] CSNEN_ISO 14253-1:2018. Brno, 2021. Výukový materiál. Fakulta strojního inženýrství - Vysoké učení technické v Brně.
- 26]

9 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

9.1 Seznam zkratk

ISO	Mezinárodní organizace pro standardizaci
GPS	Geometrická specifikace produktu
ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
λ_s	Filtr mezi kratšími vlnovými délkami a drsností
λ_c	Filtr mezi drsností a vlnitostí (cut-off)
λ_f	Filtr mezi vlnitostí a delšími vlnovými délkami
P	Základní profil
R	Profil drsnosti
W	Profil vlnitosti
l_p	Základní délka základního profilu
l_r	Základní délka profilu drsnosti
l_w	Základní délka profilu vlnitosti
l_n	Vyhodnocovaná délka
R_p	Největší výška výstupku profilu drsnosti
R_v	Největší hloubka prohlubně profilu drsnosti
R_z	Největší výška profilu drsnosti
Z_p	Výstupek profilu
Z_v	Prohlubeň profilu
R_a	Průměrná aritmetická odchylka profilu drsnosti
Z_p	Výška výstupku profilu
Z_v	Hloubka prohlubně profilu
n	Počet měření
$Z(x)$	Funkce charakteristická pro naměřený profil drsnosti
Z	Naměřená výška profilu drsnosti
R_{Sm}	Průměrná délka prvku profilu drsnosti
X_s	Délka prvku profilu drsnosti
\bar{x}	Aritmetický průměr
u_A	Nejistoty typu A
$s_{\bar{x}}$	Výběrová směrodatná odchylka aritmetického průměru
u_B	Nejistota typu B
MPE	Maximální dovolená chyba

u_c	Kombinovaná nejistota
USL	Horní specifikace
LSL	Dolní specifikace
gA	Faktor ochranného pásma
SiC	Karbid křemíku
SiSiC	Infiltrovaný karbid křemíku
C	Uhlík
lt	Celková délka snímání
SiO_2	Oxid křemičitý
U	Rozšířená nejistota

9.2 Seznam tabulek

TAB. 1) MATICOVÝ MODEL PROFILU TEXTURY POVRCHU PODLE NOREM ISO GPS [4].....	15
TAB. 2) ODCHYLKY TVARU [8].....	17
TAB. 3) PROFILOVÉ PARAMETRY PODLE ČSN EN 4287 [15].....	21
TAB. 4) VOLBA FILTRU CUT-OFF [7].....	26
TAB. 5) HODNOTY FILTRU CUT-OFF PODLE NORMY ČSN EN 21920-3 [19]28	28
TAB. 6) PODMÍNKY PŘI MĚŘENÍ [VLASTNÍ ZDROJ]	33
TAB. 7) TECHNICKÉ SPECIFIKACE MĚŘICÍHO PŘÍSTROJE [21].....	33
TAB. 8) VLASTNOSTI INFILTROVANÉHO KARBIDU KŘEMÍKU SISIC [24]35	35
TAB. 9) PODMÍNKY PŘI ŘEZÁNÍ [24].....	36
TAB. 10) NAMĚŘENÉ HODNOTY PARAMETRU RA [VLASTNÍ ZDROJ].....	41
TAB. 11) STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT [VLASTNÍ ZDROJ].....	42
TAB. 12) SHRNU TÍ VÝSLEDKŮ VYHODNOCOVÁNÍ.....	47

9.3 Seznam obrázků

OBR. 1) POVRCH VZORKU [7]	15
OBR. 2) STOPY PO OBRÁBĚNÍ [2]	16
OBR. 3) NEDOKONALOSTI POVRCHU [5]	18
OBR. 4) PROFILY TEXTURY POVRCHU [2]	18
OBR. 5) METODY MĚŘENÍ TEXTURY POVRCHU [2]	19
OBR. 6) PŘENOSOVÁ CHARAKTERISTIKA PROFILU DRSNOSTI A VLNITOSTI [15].....	20
OBR. 7) NEJVĚTŠÍ VÝŠKA VÝSTUPKU PROFILU DRSNOSTI [15]	21
OBR. 8) NEJVĚTŠÍ HLOUBKA PROHLUBNĚ [15].....	22

OBR. 9) NEJVĚTŠÍ VÝŠKA PROFILU DRSNOSTI [15].....	23
OBR. 10) PRŮMĚRNÁ ARITMETICKÁ ODCHYLKA PROFILU DRSNOSTI [7]23	
OBR. 11) PRŮMĚRNÁ ŠÍŘKA PRVKŮ PROFILU DRSNOSTI [15]	24
OBR. 12) OZNAČOVÁNÍ DRSNOSTI POVRCHU NA VÝKRESE PODLE ISO 1302 [17]27	
OBR. 13) OZNAČOVÁNÍ DRSNOSTI POVRCHU NA VÝKRESE PODLE ISO 21920-1 [17]	27
OBR. 14) URČENÍ PARAMETRU GA [23]	31
OBR. 15) MĚŘICÍ PŘÍSTROJ TAYLOR-HOBSON SURTRONIC 25 [VLASTNÍ ZDROJ]	34
OBR. 16) INFILTROVANÝ KARBID KŘEMÍKU SISIC [VLASTNÍ ZDROJ]	35
OBR. 17) POLOTOVAR SISIC PŘIPRAVENÝ PRO VYŘEZÁNÍ VZORKU [24]36	
OBR. 18) CELKOVÁ DÉLKA SNÍMÁNÍ MĚŘICÍHO PŘÍSTROJE [21]	37
OBR. 19) NEDOKONALOST POVRCHU NA VZORKU [VLASTNÍ ZDROJ]	38
OBR. 20) MĚŘENÍ VZORKU [VLASTNÍ ZDROJ]	38
OBR. 21) NAMĚŘENÝ POVRCH	39
OBR. 22) ZAVEDENÍ FILTRU AF	39
OBR. 23) VYŘÍZNUTÍ CELKOVÉ DÉLKY SNÍMÁNÍ	39
OBR. 24) DRSNOST PROFILU POVRCHU VZORKU [VLASTNÍ ZDROJ]	40
OBR. 25) VLNITOST PROFILU POVRCHU VZORKU [VLASTNÍ ZDROJ]	40
OBR. 26) PARAMETRY PROFILU DRSNOSTI POVRCHU [VLASTNÍ ZDROJ]40	
OBR. 27) VYHODNOCENÍ RA PRO $USL = 4,5$ PRO METODU 16 % [VLASTNÍ ZDROJ]	42
OBR. 28) VYHODNOCENÍ RA PRO $USL = 4,5$ PRO METODU MAXIMA [VLASTNÍ ZDROJ]	43
OBR. 29) VYHODNOCENÍ RA PRO $USL = 4,9$ METODOU 16 % [VLASTNÍ ZDROJ] 44	
OBR. 30) VYHODNOCENÍ RA PRO $USL = 4,9$ METODOU MAXIMA [VLASTNÍ ZDROJ]	44
OBR. 31) VYHODNOCENÍ RA PRO $USL = 5,5$ METODOU 16 % [VLASTNÍ ZDROJ] 45	
OBR. 32) VYHODNOCENÍ RA PRO $USL = 5,5$ METODOU MAXIMA [VLASTNÍ ZDROJ]	46

10 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A Tabulka pro určování parametru gA

Příloha B Naměřené hodnoty, jejich statistické zpracování a určování nejistot

PŘÍLOHA A

Tab. A) Tabulka pro určování parametru gA [26]

Guard band factor g	epsilon	alfa	epsilon+alfa=0,05	Finv(alfa)	g1=gA	g2	Finv(1-epsilon)	(USL-LSL)/uc
0,000001	0,049999	0,05	-	1,644863323	1,645	4,753424309	4,753424309	6,398287632
0,000005	0,049995	0,05	-	1,644902109	1,645	4,417173413	4,417173413	6,062075522
0,00001	0,04999	0,05	-	1,644950594	1,645	4,264890794	4,264890794	5,909841388
0,00005	0,04995	0,05	-	1,645338619	1,645	3,890591886	3,890591886	5,535930505
0,0001	0,0499	0,05	-	1,645823998	1,646	3,719016485	3,719016485	5,364840483
0,0005	0,0495	0,05	-	1,649721064	1,650	3,290526731	3,290526731	4,940247795
0,0009	0,0491	0,05	-	1,653643346	1,654	3,121389149	3,121389149	4,775032496
0,0013	0,0487	0,05	-	1,657591235	1,658	3,011453758	3,011453758	4,669044994
0,0017	0,0483	0,05	-	1,661565129	1,662	2,929049749	2,929049749	4,590614878
0,0021	0,0479	0,05	-	1,665565437	1,666	2,862736264	2,862736264	4,528301701
0,0025	0,0475	0,05	-	1,669592577	1,670	2,807033768	2,807033768	4,476626346
0,0029	0,0471	0,05	-	1,673646978	1,674	2,758879035	2,758879035	4,432526013
0,0033	0,0467	0,05	-	1,677729079	1,678	2,716380583	2,716380583	4,394109662
0,0037	0,0463	0,05	-	1,681839329	1,682	2,67828601	2,67828601	4,360125339
0,0041	0,0459	0,05	-	1,685978191	1,686	2,64372189	2,64372189	4,329700081
0,0045	0,0455	0,05	-	1,690146138	1,690	2,612054141	2,612054141	4,302200279
0,0049	0,0451	0,05	-	1,694343653	1,694	2,582807452	2,582807452	4,277151105
0,0053	0,0447	0,05	-	1,698571236	1,699	2,555616077	2,555616077	4,254187313
0,0057	0,0443	0,05	-	1,702829396	1,703	2,530192384	2,530192384	4,23302178
0,0061	0,0439	0,05	-	1,707118657	1,707	2,50630596	2,50630596	4,213424617
0,0065	0,0435	0,05	-	1,711439558	1,711	2,483769293	2,483769293	4,195208851
0,0069	0,0431	0,05	-	1,715792649	1,716	2,462427681	2,462427681	4,178220331
0,0073	0,0427	0,05	-1,7201785	1,720	2,442151952	2,442151952	4,162330451	
0,0077	0,0423	0,05	-1,72459769	1,725	2,422833102	2,422833102	4,147430792	
0,0081	0,0419	0,05	-1,72905082	1,729	2,404378283	2,404378283	4,133429103	
0,0085	0,0415	0,05	-	1,733538504	1,734	2,386707734	2,386707734	4,120246238
0,0089	0,0411	0,05	-	1,738061374	1,738	2,369752422	2,369752422	4,107813796
0,0093	0,0407	0,05	-	1,742620081	1,743	2,353452182	2,353452182	4,096072263
0,0097	0,0403	0,05	-	1,747215293	1,747	2,337754253	2,337754253	4,084969546
0,0101	0,0399	0,05	-	1,751847698	1,752	2,322612102	2,322612102	4,0744598
0,0105	0,0395	0,05	-	1,756518004	1,757	2,307984475	2,307984475	4,064502479
0,0109	0,0391	0,05	-1,76122694	1,761	2,29383462	2,29383462	4,055061561	

0,0113	0,0387	0,05	-	1,766	2,280129653	2,280129653	4,04610491
0,0117	0,0383	0,05	-	1,771	2,266840026	2,266840026	4,037603754
0,0121	0,0379	0,05	-	1,776	2,253939091	2,253939091	4,029532241
0,0125	0,0375	0,05	-	1,780	2,241402728	2,241402728	4,021867069
0,0129	0,0371	0,05	-	1,785	2,22920903	2,22920903	4,014587182
0,0133	0,0367	0,05	-	1,790	2,217338044	2,217338044	4,007673498
0,0137	0,0363	0,05	-	1,795	2,205771539	2,205771539	4,001108686
0,0141	0,0359	0,05	-	1,800	2,194492814	2,194492814	3,994876975
0,0145	0,0355	0,05	-	1,805	2,183486528	2,183486528	3,988963985
0,0149	0,0351	0,05	-	1,811	2,172738558	2,172738558	3,983356583
0,0153	0,0347	0,05	-1,81580689	1,816	2,16223587	2,16223587	3,97804276
0,0157	0,0343	0,05	-1,82104511	1,821	2,15196641	2,15196641	3,97301152
0,0161	0,0339	0,05	-	1,826	2,141919008	2,141919008	3,968252787
0,0165	0,0335	0,05	-1,83167403	1,832	2,132083291	2,132083291	3,963757321
0,0169	0,0331	0,05	-	1,837	2,122449609	2,122449609	3,959516644
0,0173	0,0327	0,05	-	1,843	2,113008972	2,113008972	3,955522976
0,0177	0,0323	0,05	-	1,848	2,103752984	2,103752984	3,951769179
0,0181	0,0319	0,05	-	1,854	2,094673798	2,094673798	3,948248707
0,0185	0,0315	0,05	-	1,859	2,085764065	2,085764065	3,94495556
0,0189	0,0311	0,05	-1,86486735	1,865	2,077016894	2,077016894	3,941884244
0,0193	0,0307	0,05	-	1,871	2,068425813	2,068425813	3,939029739
0,0197	0,0303	0,05	-1,87640273	1,876	2,059984737	2,059984737	3,936387467
0,0201	0,0299	0,05	-	1,882	2,051687935	2,051687935	3,93395326
0,0205	0,0295	0,05	-	1,888	2,043530007	2,043530007	3,931723344
0,0209	0,0291	0,05	-	1,894	2,035505855	2,035505855	3,92969431
0,0213	0,0287	0,05	-	1,900	2,027610662	2,027610662	3,927863098
0,0217	0,0283	0,05	-	1,906	2,01983987	2,01983987	3,926226979
0,0221	0,0279	0,05	-	1,913	2,012189167	2,012189167	3,924783545
0,0225	0,0275	0,05	-	1,919	2,004654462	2,004654462	3,923530688
0,0229	0,0271	0,05	-	1,925	1,997231874	1,997231874	3,922466597
0,0233	0,0267	0,05	-	1,932	1,98991772	1,98991772	3,921589743
0,0237	0,0263	0,05	-1,93819038	1,938	1,982708496	1,982708496	3,920898876
0,0241	0,0259	0,05	-	1,945	1,97560087	1,97560087	3,920393014
0,0245	0,0255	0,05	-	1,951	1,968591669	1,968591669	3,920071443
0,0249	0,0251	0,05	-	1,958	1,961677869	1,961677869	3,919933707
0,025	0,025	0,05	-	1,960	1,959963985	1,959963985	3,919927969

PŘÍLOHA B

Tab. B.1) Naměřené hodnoty a jejich statistické zpracování pro USL = 4,5

Naměřené hodnoty pro jednotlivé měření	
Číslo měření	Ra[μm]
1	4,43
2	4,48
3	4,62
4	4,54
5	4,69
6	4,40
7	4,91
8	4,59
9	4,54
10	3,78
11	4,38
12	4,27
xmax	4,91
xmin	3,78
xbar	4,469166667
sx	0,272945494
xbar+sx	4,74211216
uA	0,078792577
uB (odhad)	0,077408237
uc	0,110454993
U (k = 2)	0,220909985
Výsledek	4,469 \pm 0,221
USL	4,50
LSL	0,00
USL-LSL/uc	40,74057578
gA	1,65
gA·uc	0,182250738
Výpočet nejistoty typu B	
uB	0,077408237

Tab. B.2) Naměřené hodnoty a jejich statistické zpracování pro USL = 4,9

Naměřené hodnoty pro jednotlivé měření	
Číslo měření	Ra[μm]
1	4,43
2	4,48
3	4,62
4	4,54
5	4,69
6	4,40
7	4,91
8	4,59
9	4,54
10	3,78
11	4,38
12	4,27
xmax	4,91
xmin	3,78
xbar	4,469166667
sx	0,272945494
xbar+sx	4,74211216
uA	0,078792577
uB (odhad)	0,077408237
uc	0,110454993
U (k = 2)	0,220909985
Výsledek	4,469 \pm 0,221
USL	4,90
LSL	0,00
USL-LSL/uc	44,36196029
gA	1,65
gA·uc	0,182250738
Výpočet nejistoty typu B	
uB	0,077408237

Tab. B.3) Naměřené hodnoty a jejich statistické zpracování pro USL = 5,5

Naměřené hodnoty pro jednotlivé měření	
Číslo měření	Ra[μm]
1	4,43
2	4,48
3	4,62
4	4,54
5	4,69
6	4,40
7	4,91
8	4,59
9	4,54
10	3,78
11	4,38
12	4,27
xmax	4,91
xmin	3,78
xbar	4,469166667
sx	0,272945494
xbar+sx	4,74211216
uA	0,078792577
uB (odhad)	0,077408237
uc	0,110454993
U (k = 2)	0,220909985
Výsledek	4,469 ± 0,221
USL	5,50
LSL	0,00
USL-LSL/uc	49,79403706
gA	1,65
gA·uc	0,182250738
Výpočet nejistoty typu B	
uB	0,077408237



Výpočet nejistoty typu B:

$$u_B = \frac{MPE}{\sqrt{3}} = \frac{xbar \cdot 0,03}{\sqrt{3}} = \frac{4,469166667 \cdot 0,03}{\sqrt{3}} = 0,077408237$$