



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

POKROČILÉ METODY VYHODNOCOVÁNÍ TOPOGRAFIE POVRCHU

ADVANCED METHODS OF SURFACE TOPOGRAPHY EVALUATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ladislav Toman

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

| | |
|-------------------|--|
| Ústav: | Ústav strojírenské technologie |
| Student: | Bc. Ladislav Toman |
| Studijní program: | Strojní inženýrství |
| Studijní obor: | Strojírenská technologie a průmyslový management |
| Vedoucí práce: | prof. Ing. Miroslav Píška, CSc. |
| Akademický rok: | 2018/19 |

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

Pokročilé metody vyhodnocování topografie povrchu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Popis standardních a moderních způsobů vyhodnocování topografie povrchu, aplikace na vybranou technologii obrábění (výroba závitů).

Cíle diplomové práce:

- Základní způsoby měření a měřicí přístroje.
- Způsoby vyhodnocování, měřené parametry.
- Aplikace vybrané technologie obrábění na kvalitu opracování.
- Doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

DE CHIFFRE, L., et al. Quantitative characterisation of surface texture. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2000, vol. 49, no. 2, p. 635-652. ISSN 0007-8506.

JIANG, X. and WHITEHOUSE, D. J. Technological shifts in surface metrology. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 61(2). p. 815-836. 2012. ISSN 0007-8506.

LONARDO, P. M., LUCCA, D. A., DE CHIFFRE, L. Emerging trends in surface metrology. In: CIRP Annals, Vol. 51, No. 2, 2002. p. 701-723.

DE CHIFFRE, L., LONARDO, P. M., TRUMPOLD, H., LUCCA, D. A., GOCH, G., BROWN, C. A., RAJA, J., HANSEN, H. N. Quantitative Characterisation of Surface Texture. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 49, No. 2, 2000. p. 635-651.

DE CHIFFRE, L. Industrial survey on ISO surface texture parameters. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 48, No. 3, 1999. p. 74-77.

PETERSA, J. Contribution of CIRP to the Development of Metrology and Surface Quality Evaluation during the last fifty years. CIRP Annals - Manufacturing Technology. Volume 50, Issue 2, 2001. p. 471–488.

DEMIRCIOGLU, P., DURAKBASA, M. N. Investigations on machined metal surfaces through the stylus type and optical 3D instruments and their mathematical modeling with the help of statistical techniques, Measurement, Volume 44, Issue 4, May 2011. p. 611-619. ISSN 0263-2241.

NWAOGU, U. C., TIEDJE, N. S., HANSEN, H. N. A non-contact 3D method to characterize the surface roughness of castings, Journal of Materials Processing Technology, Volume 213, Issue 1, January 2013. p. 59-68. ISSN 0924-0136.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá popisem způsobů měření textury povrchu, popisuje přístroje, pomocí nichž lze texturu těchto povrchů zaznamenávat a popisuje parametry, které umožňují texturu povrchu kvantifikovat. Praktická část se zabývá vyhodnocením a srovnáním parametrů řezaných a tvářených metrických závitů M10 pomocí analýzy jejich průřezů, poté je zaměřena pozornost na analýzu tlakových sil a točivých momentů při výrobě jednotlivých závitů a v poslední části práce je obsaženo ekonomické hodnocení nákladů na výrobu jednoho kusu řezaného závitu.

Klíčová slova

drsnost, textura povrchu, závit, focus variation, průřez závitu, točivý moment, tlaková síla

ABSTRACT

This paper deals with the description of the surface texture measurement methods, describes the devices by which the surface texture can be recorded and describes the parameters that allow the surface texture to be quantified. The practical part deals with the evaluation and comparison of the parameters of metric threads M10 made by cutting and forming by analysis of their cross-sections, then the attention is focused on the analysis of pressure forces and torques which occur during the manufacture and in the last part of the thesis there is an economic evaluation of the cost of manufacturing one piece of cut thread.

Key words

roughness, surface texture, thread, focus variation, thread cross section, torque, pressure force

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TOMAN, Ladislav. *Pokročilé metody vyhodnocování topografie povrchu*. Brno 2019.

Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117285>. Diplomová práce.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 89 s. 4 přílohy. Vedoucí práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Pokročilé metody vyhodnocování topografie povrchu** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Ladislav Toman

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za cenné připomínky a odborné vedení při vypracování diplomové práce. Poděkování patří také Ing. Petře Sliwkové Ph.D. za dílčí pomoc při provádění měření. Dále bych chtěl také poděkovat svým rodičům za podporu během studia.

OBSAH

| | |
|--|----|
| ABSTRAKT | 3 |
| PROHLÁŠENÍ..... | 4 |
| PODĚKOVÁNÍ..... | 5 |
| OBSAH..... | 6 |
| ÚVOD..... | 8 |
| 1. ZÁKLADNÍ ZPŮSOBY MĚŘENÍ A MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE..... | 9 |
| 1.1 Způsoby měření..... | 9 |
| 1.2 Dotykový způsob měření | 9 |
| 1.2.1 Profilové měření | 9 |
| 1.2.2 Plošné profilové měření | 13 |
| 1.3 Bezdotykový způsob měření | 14 |
| 1.3.1 Měření metodou koherenční skenovací interferometrie | 15 |
| 1.3.2 Měření pomocí konfokální mikroskopie..... | 16 |
| 1.3.3 Měření pomocí elektronové mikroskopie | 18 |
| 1.3.4 Měření pomocí variace ostření | 20 |
| 1.3.5 Měření pomocí mikroskopie atomárních sil | 22 |
| 1.3.6 Měření pomocí řádkovacího tunelového mikroskopu | 23 |
| 2. ZPŮSOBY VYHODNOCOVÁNÍ, MĚŘENÉ PARAMETRY | 24 |
| 2.1 Vyhodnocování topografie povrchu profilovými parametry | 24 |
| 2.1.1 Filtrace | 25 |
| 2.1.2 Základní parametry | 26 |
| 2.1.3 Profilové parametry metody MOTIF | 33 |
| 2.2 Vyhodnocování topografie povrchu plošnými parametry..... | 34 |
| 2.2.1 Filtrace | 34 |
| 2.2.2 Birminghamovy parametry | 36 |
| 2.2.3 Parametry pole | 36 |
| 2.2.4 Parametry prvku..... | 46 |
| 3. APLIKACE VYBRANÉ TECHNOLOGIE NA KVALITU OPRACOVÁNÍ | 48 |
| 3.1 Záznam a analýza dat průřezů..... | 49 |
| 3.1.1 Měřené vzorky | 49 |
| 3.1.2 Přístroj použitý pro měření | 49 |
| 3.1.3 Normalizovaný metrický závit M10..... | 50 |
| 3.1.4 Zaznamenaná data..... | 51 |
| 3.1.5 Analýza ploch průřezů | 54 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.1.6 | Analýza výšky závitu..... | 59 |
| 3.1.7 | Analýza roztečí | 63 |
| 3.1.8 | Analýza vrcholových úhlů | 64 |
| 3.1.9 | Analýza prohlubní tvářených závitů | 66 |
| 3.2 | Energetická analýza | 66 |
| 3.2.1 | Zaznamenaná data..... | 67 |
| 3.2.2 | Analýza tlakových sil..... | 68 |
| 3.2.3 | Analýza točivých momentů | 70 |
| 3.3 | Ekonomické zhodnocení nákladů na výrobu jednoho kusu závitu | 72 |
| 3.3.1 | Náklady na strojní práci | 72 |
| 3.3.2 | Náklady na nástroj | 73 |
| 3.3.3 | Náklady na vedlejší práci..... | 73 |
| | ZÁVĚR | 76 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ | 78 |
| | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK | 84 |
| | SEZNAM PŘÍLOH..... | 88 |

ÚVOD

Tato diplomová práce se zabývá metodami vyhodnocování topografie povrchu, popisuje jak základní, tak také moderní metody, kterými lze strukturu povrchu měřit, dále se zabývá způsoby, jakými lze strukturu povrchu analyzovat a interpretovat a také detailně popisuje parametry, které slouží ke kvantifikaci vyhodnocovaného povrchu. V praktické části je v diplomové práci zrealizováno bezdotykové měření metrických závitů, provedena analýza parametrů s nimi souvisejících pomocí průřezů těchto závitů. Dále jsou analyzovány tlakové síly a točivé momenty, které vznikají při jejich výrobě a v závěru práce se nachází ekonomické zhodnocení nákladů pro výrobu jednoho kusu metrického závitu.

Analýza topografie povrchů je součástí technologického procesu výroby, která bývá často podceňována a nedostatečné vyhodnocení a kvantifikace těchto parametrů může mít fatální následky v jejich funkčnosti. Naopak vhodné měření a analýza těchto dat může napomoci lepší funkčnosti a vede také k vyšší životnosti a spolehlivosti. V posledních padesáti letech byl tomuto odvětví přikládán čím dál větší význam a došlo v něm také k výraznému vývoji a posunu. Pro získání dat v praktické části je použit přístroj, který primárně slouží pro analýzu topografie povrchu, avšak v této práci je použit ke zjištění dat tvořící průřez zkoumaného povrchu, v tomto případě metrického závitu. Tyto skutečnosti tvoří jedny z důvodů, které mne vedly ke zvolení tématu této diplomové práce.

1. ZÁKLADNÍ ZPŮSOBY MĚŘENÍ A MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE

Oblast měření struktury povrchu zažívá v posledních desetiletích velký pokrok a stává se čím dál důležitější součástí výroby, kterou nelze podceňovat. Přestože součást splňuje veškeré geometrické a rozměrové tolerance, nevhodná struktura povrchu může mít zcela fatální dopad na její funkčnost.

1.1 Způsoby měření

K měření a kvantifikaci struktury těchto povrchů se používá velké množství přístrojů, jejichž způsob měření a vyhodnocování dat lze obecně rozdělit do tří skupin [15].

První skupinou je čárová-profilovací metoda. Je to taková metoda měření struktury povrchu, při které je vytvářen dvourozměrný graf nepravidelnosti povrchu. Graf je vytvářen z dat, které jsou reprezentovány matematicky, jako výška funkce $z(x)$. Druhou skupinou měřidel jsou měřidla využívající metodu topografie plochy. Norma ČSN EN ISO 25178-6 jí definuje jako metodu měření, která vytváří topografické zobrazení povrchu, které může být reprezentováno matematicky jako úroveň funkce $z(x,y)$ dvou nezávisle proměnných (x,y) . Třetí metodou je metoda integrování plochy. Touto metodou je měřena reprezentativní plocha zkoumaného povrchu a získávají se číselné výsledky, které jsou závislé na vlastnostech integrování textury povrchu měřené plochy materiálu [15].

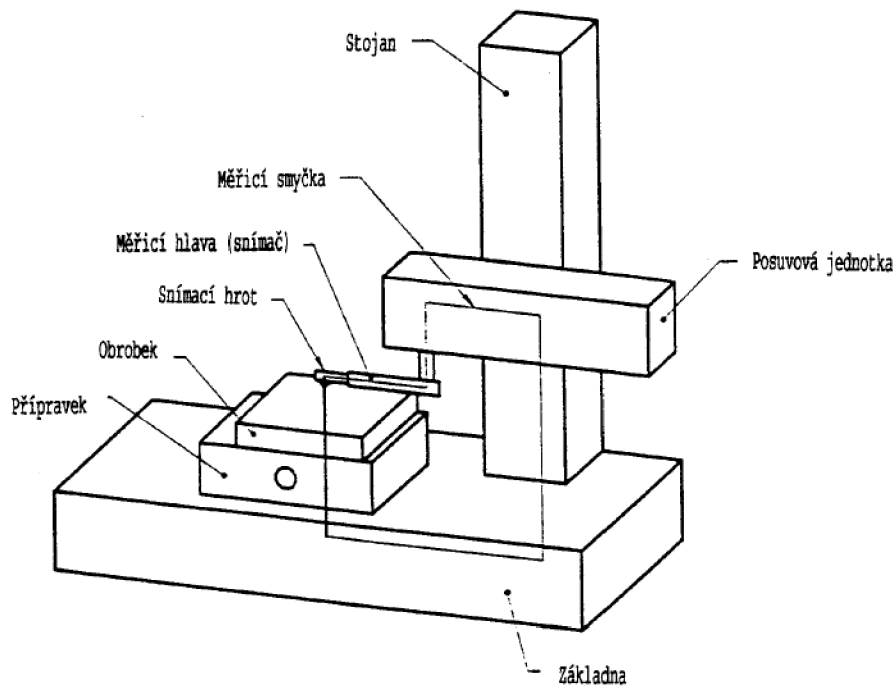
Do skupiny využívající čárově-profilovací metodu patří například skenování dotykovým hrotem, interferometrická mikroskopie s fázovým posunem, kruhové interferometrické profilování, či optické diferenciální profilování. Mezi metody topografie plochy může patřit také skenování dotykovým hrotem, dále koherenční skenovací mikroskopie, konfokální chromatická mikroskopie, zaostřovací variační mikroskopie, digitální holografická mikroskopie, mikroskopie atomárních sil a další. K metodám integrování plochy se řadí měřidla využívající úplnou integraci rozptýleného světla, úhlového rozšíření rozptýleného světla, či kapacitu rovnoběžných desek [15]. Vybrané metody měření budou detailně rozebrány v dalších kapitolách práce. Měřicí přístroje lze také rozdělit podle uskutečnění kontaktu s měřeným povrchem na dotykové a bezdotykové.

1.2 Dotykový způsob měření

Měření a vyhodnocování struktury povrchu pomocí dotykových metod patří k velmi častým způsobům měření. Při tomto měření dochází k tažení hrotu s definovanou geometrií po zkoumaném povrchu, přičemž hrot zaznamenává výchylky na tomto povrchu, které jsou zaznamenány jako elektrický signál, který je dále konvertován na signál digitální, jehož průběh je již možné vyhodnotit a kvantifikovat tak danou strukturu povrchu. Mezi výhody dotykového měření patří nižší náklady na pořízení měřidel, jejich poměrně jednoduchá obsluha, rychlost měření a vyhodnocování dat [12].

1.2.1 Profilové měření

Profilovou metodou měření a charakteristikou dotykových měřících přístrojů se zabývá norma ČSN EN ISO 3274. Základní prvek dotykových přístrojů je podle zmíněné normy měřicí smyčka, která je definována jako uzavřený řetězec, zahrnující všechny mechanické části propojující měřený objekt a snímací hrot. Hlavní části tohoto řetězce jsou přípravek na upnutí měřeného obrobku, prostředek na polohování, měřicí stojan, posuvová jednotka a snímací hlava [13]. Zjednodušený náčrt lze vidět na obrázku 1.



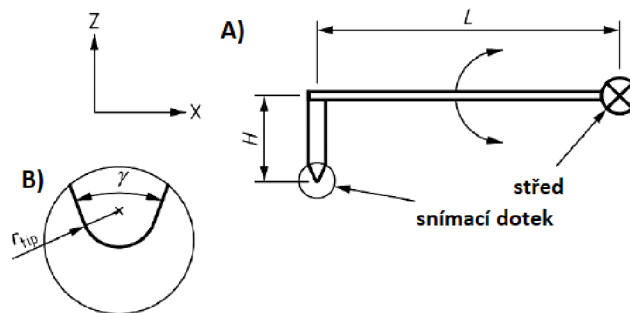
Obr.1 Měřicí smyčka dotykového přístroje [13].

Při profilovém měření struktury povrchu je hrot snímače, na kterém je zakulacený dotek z tvrdého materiálu, ve většině případů z diamantu, tažen po definované dráze po povrchu vyhodnocovaného materiálu. Geometrie a parametry hrotu jsou definovány podle normy ČSN EN ISO 25178-601 [14].

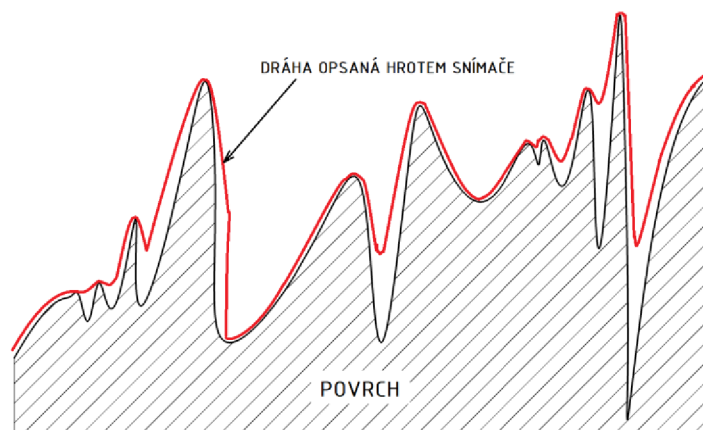
Při definování geometrie hrotu hraje roli poloměr doteku r_{tip} , úhel kužele doteku γ , výška hrotu H a délka ramena L . Nejčastější rozměry poloměru doteku r_{tip} jsou 2, 5 a 10 μm a úhly kužele doteku γ jsou 60° nebo 90°.

Jedním z důležitých aspektů, který hraje roli při volbě poloměru, kromě povahy struktury povrchu, je tvrdost materiálu. Každý poloměr doteku totiž způsobuje rozdílné statické napětí na povrchu materiálu a materiál by mohl být poškozen. Pro poloměr 2 μm působí statické napětí 0,7 mN, pro poloměr 5 μm působí napětí 4 mN a pro poloměr 10 μm působí až 16 mN [19].

Hrot dotykového přístroje definovaný podle výše zmíněné normy je možno vidět na obrázku 2. Při tomto snímání je zaznamenávána aktuální poloha hrotu snímače vedeného po určité dráze a vzniká tzv. úplný profil [14]. Zjednodušené znázornění hrotu snímající povrch materiálu je možno vidět na obrázku 3.



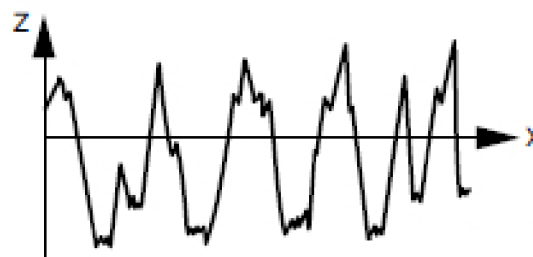
Obr. 2 a) Hrot dotykového měřicího přístroje, b) Detail doteku [14].



Obr. 3 Znárodnění snímaného materiálu profilovým měřením [10].

Běžně se používají dva typy hrotu. Prvním typem je hrot s diamantovým zakončením, který má efektivní délku ramena 60 mm, druhým typem je hrot zakončený safírovou kuličkou s efektivní délkou ramene 120 mm [11]

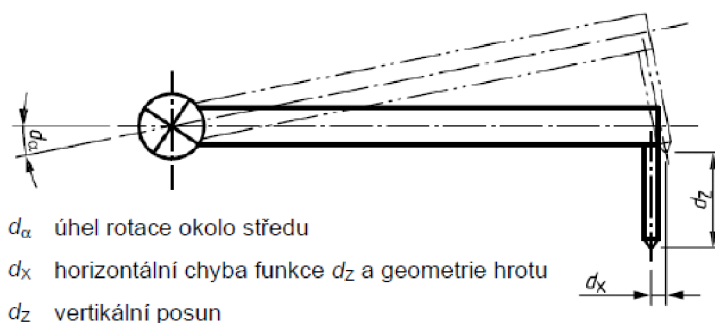
Při vyhodnocování topografie povrchu je v případě profilové metody pracováno v pravouhlém souřadnicovém systému, přičemž osa X je považována za střední čáru profilu, který je snímán, osa Y je rovnoběžná s povrchem součásti a je kolmá na osu X a osa Z, která je kolmá na osy X a Y směřuje ven z materiálu, jak lze vidět na obrázku 2 [8]. Po zaznamenání těchto dat je vytvořen úplný profil. Z tohoto profilu je však nutné vytvořit základní profil, aby bylo možné strukturu povrchu dále kvantifikovat.



Obr. 4 Prvek profilu povrchu [8].

V praxi se můžeme setkat s hlavními dvěma druhy měřidel, které se liší konstrukcí snímacích hrotů, a to s tzv. dílenským měřidlem, které je vybaveno relativním snímacím hrotem, jenž je osazený vodící patkou a druhým typem je laboratorní měřidlo vybavené absolutním snímacím hrotem a tento druh měřidla vodící patku nemá. Vodící patka je v kontaktu s měřeným povrchem a způsobuje mechanickou filtraci, jejíž následkem je to, že dílenský přístroj díky tomu vyhodnocuje pouze parametry z profilu drsnosti, kdežto laboratorní přístroj je schopen zaznamenat jak profil drsnosti, tak profil vlnitosti a lze jej připojit k počítači a zaznamenávat výsledky, či tisknout protokoly z měření [16].

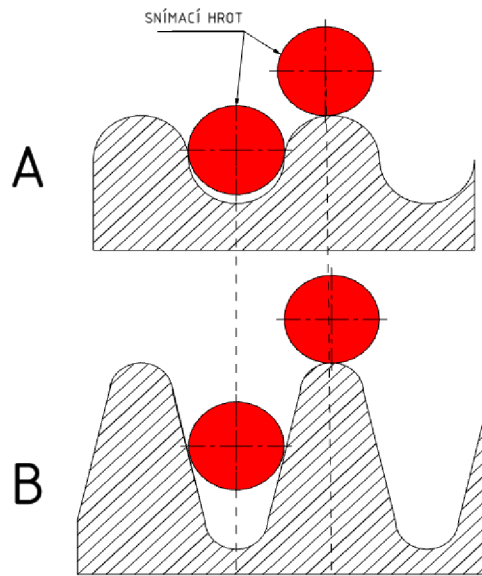
Jednou z nevýhod dotykového měření pomocí hrotu je možnost výskytu chyby v měření, způsobené v důsledku rotace hrotu okolo středu a tvorby krátkého obloukového pohybu. Tato chyba vzniká v důsledku faktu, že sonda zařízení je schopna měřit pouze jednu veličinu a není zde tudíž dostatek informací pro výpočet obou veličin X a Z. Tuto chybu je však možno zanedbat v závislosti na požadované přesnosti měření, nebo lze aplikovat částečnou korekci díky znalosti jedné z veličin X nebo Z a geometrie hrotu [14]. Chyba způsobená rotací okolo středu je znázorněná na obrázku 5.



Obr. 5 Chyba v důsledku rotace hrotu [14].

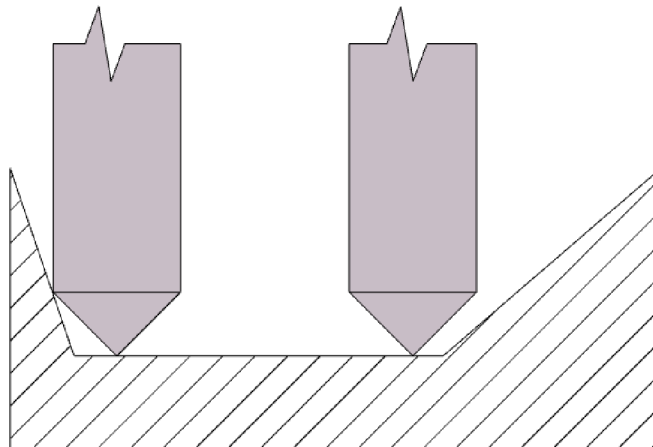
V případě, že je poloměr špičky hrotu dostatečně malý s ohledem ke zkoumanému povrchu, hrot přesně kopíruje výchyly povrchu. Pokud se však zakřivení povrchu zvětší, hrot má tendenci vynechávat prohlubně s menším průměrem, než je průměr hrotu snímače, protože hrot do těchto prohlubní nedokáže proniknout a tím se snižuje citlivost zaznamenávat prvky s krátkou vlnovou délkou.

Toto však není jediný parametr, který má na snížení citlivosti vliv. Na snížení citlivosti snímání má vliv také rozteč a výška jednotlivých prvků na povrchu. Čím menší je výška měřených prvků za předpokladu stejné vlnové délky, tím má na tento povrch mechanická filtrace zapříčiněná poloměrem hrotu menší vliv, jak lze vidět na obrázku 6. Obrázek 6a znázorňuje povrch se stejnou vlnovou délkou, jako obrázek 6b, avšak výška prvků je zde nižší a vliv filtrace způsobený velikostí špičky hrotu je zde menší. [11].



Obr. 6a, 6b Vliv poloměru špičky hrotu na měřený povrch podle [11].

Další nevýhodou může být obtížné měření povrchů se strmými výchyfkami [15], jelikož hrot je ve většině případů po měřené ploše tažen v kolmém směru, bývá omezení dané geometrií snímacího doteku, přesněji úhlem kužele doteku, jak lze vidět na obrázku 7 [15]. Toto omezení může však nastávat také u některých typů optických mikroskopů, přičemž toto omezení bývá dáno numerickou aperturou objektivu [15].



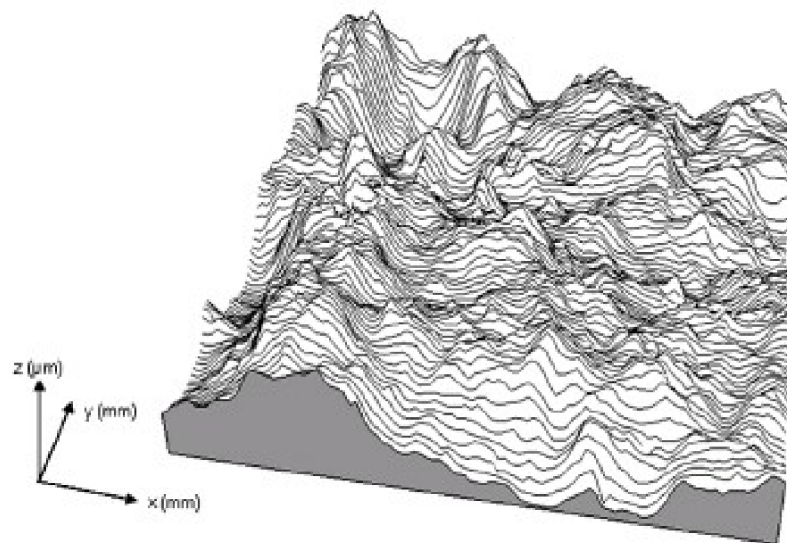
Obr. 7 Omezení profilového měření způsobené úhlem kužele doteku podle [11].

1.2.2 Plošné profilové měření

Profilové měření pomocí snímacího hrotu lze také využít pro vytvoření plošného obrazu struktury vyhodnocovaného povrchu, přičemž je zapotřebí využít speciální software, který z jednotlivých profilových měření vytvoří 3D obraz povrchu [12].

Tento obraz však není tvořen spojitými daty, ale je vytvořen z velké série 2D profilových měření, které jsou měřeny s určitým paralelním posuvem, který se pohybuje v řádech jednotek μm [19].

Mezi nevýhody použití tohoto měření patří malé horizontální rozlišení 3D povrchu, z důvodu spojování 2D dat z jednotlivých profilů (naopak vertikální rozlišení je díky množství naměřených dat velmi dobré). Další nevýhodou je rychlost tohoto měření. I přesto, že jednotlivé měření 2D profilů probíhá rychle, tak k sestavení 3D obrazu je nutno naměřit těchto profilů, kvůli malým posuvům, velké množství, což tuto metodu činí značně časově náročnou a neefektivní [12, 20].



Obr. 8 3D obraz získaný měřením sérií 2D profilů [15].

1.3 Bezdotykový způsob měření

Drsnost povrchu většiny obráběných součástí je obvykle měřena pomocí dotykových profilometrů. Většina standardů a norem je proto uzpůsobena pro tento styl měření. Avšak tento způsob měření má své limity, kterými mohou být například malé rozlišení výsledného obrazu při plošném profilovém měření či citlivost měřidel na okolní vibrace. Velkou nevýhodou představuje také samotný snímací hrot. Jak již bylo zmíněno, výsledky snímání ovlivňuje poloměr zaoblení kužele doteku tohoto hrotu, nebo tlak, kterým hrot působí na materiál, z čehož plyne, že je také třeba klást pozornost na tvrdost zkoumaného materiálu, aby nedošlo k mechanickému poškození snímacím hrotem. Během používání dotykových měřidel probíhal výzkum, který směřoval k vývoji 3D optických měřidel, které dokáží zaznamenat 3D strukturu povrchu přesně obráběných ploch součástí bez kontaktu s tímto povrchem a tím uspokojit požadavky pro aplikaci v průmyslovém prostředí [20].

Nelze však jednoznačně říci, která z metod měření je výhodnější. Použití jednotlivých metod závisí individuálně na konkrétní situaci. V minulosti byly provedeny studie pro porovnání vhodnosti kontaktních a nekontaktních metod. Například v práci [20] bylo porovnáno měření klasickým profilovým kontaktním měřidlem s měřením pomocí konfokálního mikroskopu, interferenčního mikroskopie a koherenční skenovací

interferometrické mikroskopie, ze které bylo vyvozeno obecné srovnání kontaktního a bezkontaktního způsobu měření.

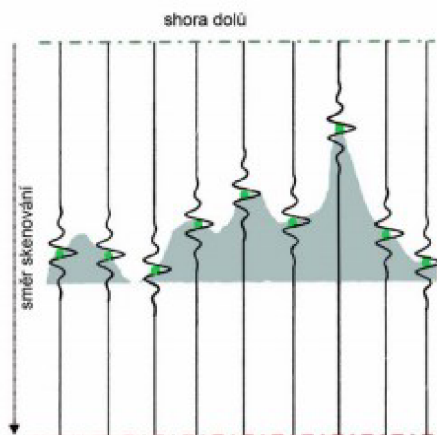
Jak již bylo řečeno, při kontaktním způsobu může být poškozen povrch měřené součásti, pokud je z měkkého materiálu. Protože je při bezkontaktní metodě zrekonstruován celý 3D model měřeného povrchu, je třeba u této metody většího množství dat, přičemž bezdotykové přístroje jsou nuceny pro 3D rekonstrukci používat složitější algoritmy, než přístroje dotykové, z čehož plyne, že při dotykovém způsobu měření jsou zaznamenaná data vyhodnocena rychleji. Kladným bodem dotykových měřících přístrojů je také fakt, že jsou jednodušší na obsluhu a ovládání, avšak na rozdíl od bezdotykových přístrojů nemohou být používány v prostředí blízkém výrobě, z důvodu možných vibrací z okolí. Důležitým srovnávacím faktorem je také komplexnost tvarů měřených součástí. Dotykovými měřidly lze měřit pouze omezené množství druhů tvarových ploch, ale optickými bezkontaktními metodami lze měřit mnohem větší množství druhů ploch a součástí. V neposlední řadě je třeba zmínit, že pořízení 3D optických bezkontaktních měřidel je značně dražší, než pořízení dotykových profilometrů [15, 20].

1.3.1 Měření metodou koherenční skenovací interferometrie

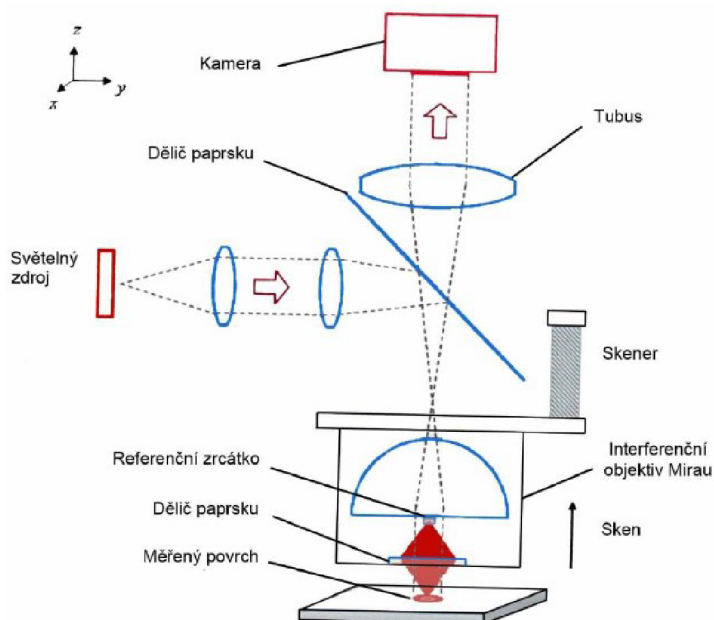
Měření metodou koherenční skenovací interferometrie patří k často využívané bezkontaktní metodě. Koherenční skenovací interferometrie CSI z anglického Coherence Scanning Interferometry je popsána a definována normou ČSN EN ISO 25178-604 [22].

Princip měření spočívá v tom, že je přes interferometrický objektiv na povrch vzorku promítáno nekoherentní polychromatické světlo. Na povrchu vzorku dochází k interferenci tohoto světla různých vlnových délek (obrázek 9), což zapříčiňuje, že odražené světlo má různou intenzitu a tato rozdílná intenzita je zaznamenávána kamerou (CCD snímačem) a k těmto datům je následně přiřazena výšková souřadnice vzorku pomocí autokorelačního algoritmu [23]. Schématické znázornění skenovacího interferometrického přístroje je znázorněno na obrázku 10.

Postup měření, který bude popisován je postup uplatňovaný při měření přístrojem Taylor Hobson Talysurf CCI Lite, ale princip je podobný u každého koherenčního interferometrického přístroje. V první řadě je nutné umístit vzorek na pohyblivý stůl a pomocí elektrického posuvu jej dopravit do zorného pole objektivu. Při manipulaci je třeba si dát pozor na to, aby byl vzorek dostatečně vzdálený od objektivu, neboť by mohlo dojít k poškození tohoto objektivu. Poté je nutné synchronizovat zvolený typ objektivu se softwarem měřiče, aby docházelo ke správnému přepočtu dat z CCD snímače. Poté je nutno měřidlem zaostřit na povrch vzorku. V dalším kroku se nastaví rozsah měření a intenzita světelného toku. Po těchto úkonech je možné provést měření [23, 44].



Obr. 9 Znáznornění interferenčních signálů [44].



Obr. 10 Schématické znázornění CSI přístroje [44].

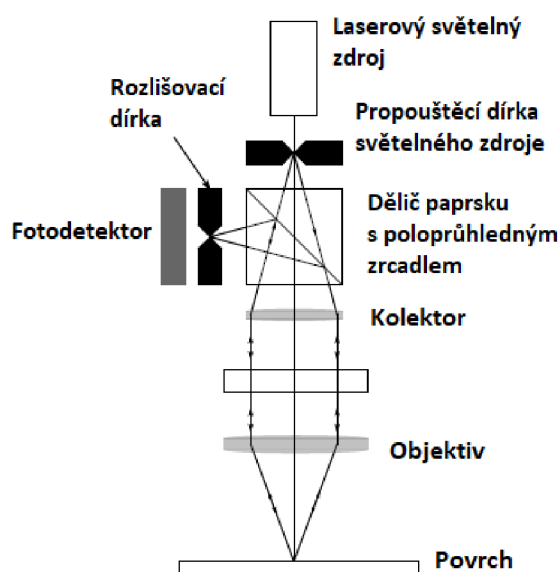
Je také vhodné se zmínit o objektivu, který je v těchto soustavách používán. Jedná se o dvoupaprskový interferenční objektiv, který je schopen velkého zvětšení, což způsobuje, že jsme schopni vytvořit obraz ve velkém rozlišení v jednotkách nm. Pro tyto měřidla existují tři typy objektivů a to Michelson, Mirau a nebo Linnik. Každý z těchto typů má různé možnosti zvětšení a různé pracovní vzdálenosti [12, 22, 44].

1.3.2 Měření pomocí konfokální mikroskopie

Měření pomocí konfokálních mikroskopů je jednou z dalších nekontaktních metod, která je nám schopná poskytnout detailní 3D obraz textury sledovaného povrchu. V oblasti konfokální mikroskopie se rozlišují dva typy mikroskopů. Prvním typem je konfokální mikroskop s rotujícím diskem a druhým typem je rastrující konfokální mikroskop [26].

Podle [12] by pro tyto metody měření měla být zformulována norma ČSN EN ISO 25178-607, avšak tato norma zatím bohužel stále definována není.

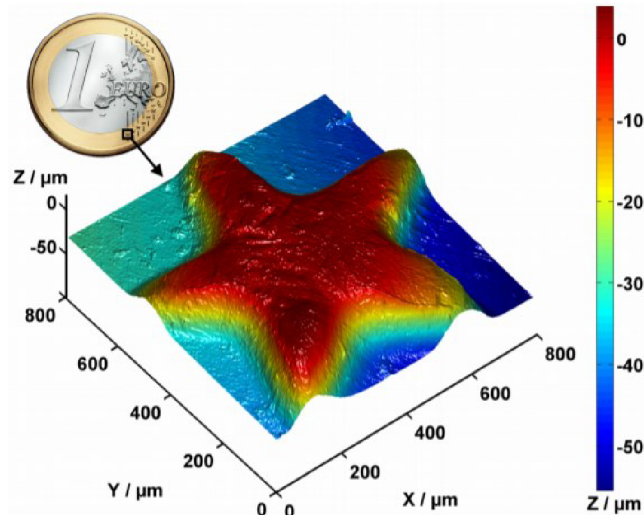
Princip fungování laserového rastrujícího konfokálního mikroskopu je takový, že světelný zdroj vysílá paprsek světla, který je rozložen děličem paprsku, tento rozdělený paprsek prochází skrz kolektor do objektivu, který tento paprsek soustředí a zaostří na měřený povrch. Od tohoto povrchu je paprsek odražen zpět do objektivu, který ho přenáší skrz rozlišovací díрку do fotodetektoru. Z fotodetektoru je signál přenášen do počítače, kde je pomocí softwaru zpracován 3D obraz na základě intenzity odraženého světla [12, 25, 26, 23]. Schématický náčrt skenovacího konfokálního mikroskopu je zobrazen na obrázku 11.



Obr. 11 Náčrt skenovacího konfokálního mikroskopu [23].

Konfokální obraz je za každých okolností zaostřený, jelikož se pro každý měřený bod plochy aktualizuje ohnisko a obraz není tvořen najednou, ale postupným řádkováním a díky velmi malému a definovanému posuvu v ose Z jsme schopni vytvořit obraz s velkou hloubkou ostrosti a jsme schopni pozorovat i jednotlivé optické řezy v ose Z [19, 26]. Obraz vytvořený pomocí skenovacího konfokálního mikroskopu je možno vidět na obrázku 12.

Velkou výhodou této metody je to, že lze toto měření zkombinovat s jinými mikroskopickými technikami a software poté vytvoří povrch, který je vykreslen ve skutečných barvách [26].



Obr. 12 Povrch části mince změřený metodou konfokální mikroskopie [27].

1.3.3 Měření pomocí elektronové mikroskopie

Měření elektronovým mikroskopem je jedna z dalších možností, která umožňuje zkoumat strukturu povrchu. Tyto přístroje patří k těm nejsložitějším a umožňují zkoumat objekty až v jednotkách nanometrů. Dalším velkým rozdílem oproti jiným metodám je ten, že pomocí elektronového mikroskopu jsme schopni analyzovat nejen povrch materiálu, ale i jeho vnitřní strukturu a díky snižujícím se nákladům na výrobu těchto mikroskopů se v určitých odvětvích stávají čím dál více používanými typy měřidel [28].

Hlavní rozdíl oproti ostatním typům mikroskopů je ten, že elektronový mikroskop nepoužívá jako svůj zdroj proud fotonů, tedy světla, nýbrž proud elektronů. Tento proud elektronů po vyzáření prochází soustavou elektromagnetických čoček, které vytvoří vhodně tvarované magnetické pole. Poté, co dojde k dopadu elektronů na povrch zkoumaného materiálu, dojde k interakci materiálu a těchto fotonů a vznikne velké množství signálů různého druhu a z těchto signálů je možné analyzovat množství informací o zkoumaném vzorku. Pokud by však bylo pozorování prováděno v okolní atmosféře, docházelo by k interakci elektronů s touto atmosférou a data z pozorování by byla zkreslená. Je proto nutné, aby byl jak zkoumaný vzorek, tak svazek elektronů umístěn ve vakuu [29]. Při použití svazku elektronů namísto fotonů dochází k velkému zvýšení rozlišovací schopnosti mikroskopu, přičemž rozlišovací schopnost můžeme vypočítat ze vztahu (1) [28].

$$RS = \frac{0,61 \cdot \lambda}{n \cdot \sin(\alpha)} \quad (1)$$

Kde RS je rozlišovací schopnost mikroskopu, λ je vlnová délka, α je polovina otvorného úhlu kužele paprsků, které mohou vstoupit do objektivu a n je index lomu, přičemž vztah ve jmenovateli zlomku se nazývá numerická apertura [28].

Napětí U mezi anodou a katodou, které je zdrojem potřebných elektronů se nazývá urychlovací napětí a lze pomocí něj ovlivnit rozlišovací schopnost. Urychlovací napětí dodává elektronu kinetickou energii E_k , která se vypočítá podle vzorce (2). Z pohledu korpuskulárně vlnového dualismu je možno na elektron přihlížet také jako na monochromatickou vlnu o určité vlnové délce λ , která se vypočítá pomocí vztahu (3), přičemž proměnná h označuje v tomto vztahu Planckovu konstantu [28, 29].

$$\lambda = e \cdot U = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v} \quad (3)$$

Po dosazení rovnice (3) do rovnice (2) je získán vzorec (4), který vyjadřuje vztah mezi vlnovou délkou elektronu a urychlovacím napětím. Po dosazení konstant do vzorce (4) je po jeho úpravě získán vztah (5), pomocí kterého je možné dopočítat vlnovou délku elektronů při známém urychlovacím napětí [28]

$$e \cdot U = \frac{h^2}{2 \cdot m \cdot \lambda^2} \quad (4)$$

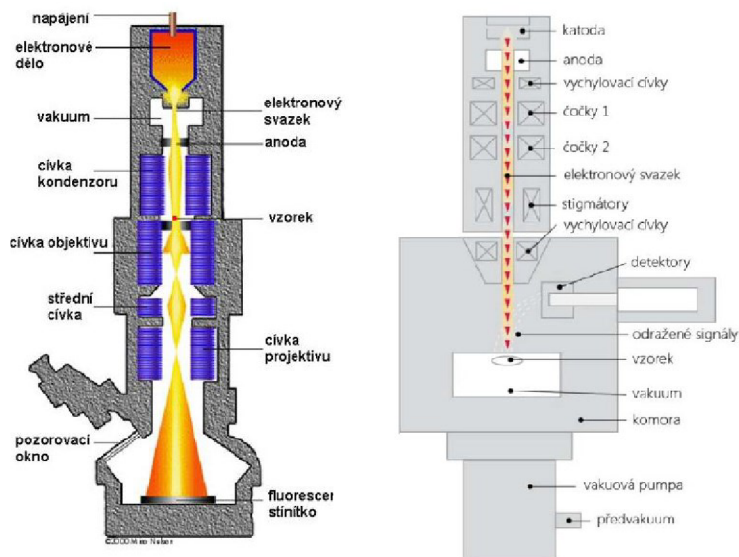
$$\lambda = \frac{1,226}{U^{1/2}} \quad (5)$$

Existují dva typy elektronových mikroskopů. Prvním typem je řádkovací elektronový mikroskop označovaný zkratkou SEM z anglického scanning electron microscope a druhým typem je transmisní elektronový mikroskop označovaný TEM z anglického transmission electron microscope.

V transmisní elektronové mikroskopii dochází k proniknutí elektronů pozorovaným vzorkem, který však musí mít velmi malou tloušťku. Elektrony procházející vzorkem jsou vychýleny ze svého původního směru, dopadají na fluorescenční stínítko, kde tvoří výsledný obraz, který může být dále analyzován. Schématické znázornění TEM mikroskopu je na obrázku 13a [29].

Řádkovací elektronový mikroskop funguje na principu, kdy svazek elektronů přes čočky dopadá na povrch pozorovaného objektu, kde dochází k vzájemné interakci elektronů a povrchu materiálu [29]. Dochází k vylučování různých druhů signálů, kterými mohou být například sekundární elektrony, které udávají informace o topografii povrchu, dále zpětně odražené elektrony, které nám dávají informace rovněž o topografii, ale také o atomovém čísle materiálu, dále je možno zachytit rentgenové záření, pomocí něhož analyzujeme informace o povrchovém složení. Po interakci je vylučováno další množství signálů, ale tyto

právě popsané jsem považoval za vhodné zmínit v této práci [28]. Schématické znázornění SEM mikroskopu je na obrázku 13b.



Obr. 13 Schématické znázornění elektronových mikroskopů a) transmisní, b) skenovací [29].

Velkou výhodou elektronových mikroskopů je bezesporu jejich možnost velkého zvětšení, které může být řádově až 1 000 000, díky čemuž jsme schopni pozorovat i velmi malé prvky na struktuře povrchu materiálu. Elektronové mikroskopy mají také velké rozlišení, zhruba 0,1 nm a velkou hloubku ostrosti. Jak již bylo zmíněno, velkou výhodou je také možnost analyzovat z pozorování nejen strukturu povrchu, ale také například vnitřní složení materiálu, či informace o jeho elektrických vlastnostech.

Nevýhodou transmisního elektronového mikroskopu je fakt, že při pozorování objektu musí být sledovaný objekt velmi tenký a dokonale čistý. Nutnost malé tloušťky pozorovaného materiálu může být v mnoha případech velmi omezující. Jednou z nevýhod je také vysoká náročnost na umístění v prostoru, neboť tyto mikroskopy bývají dosti objemné. Další nevýhodou je také jejich vysoká pořizovací cena, která se sice v posledních letech snižuje a tyto mikroskopy se stávají dostupnějšími, i přes to je tato cena velmi vysoká [12, 29, 30].

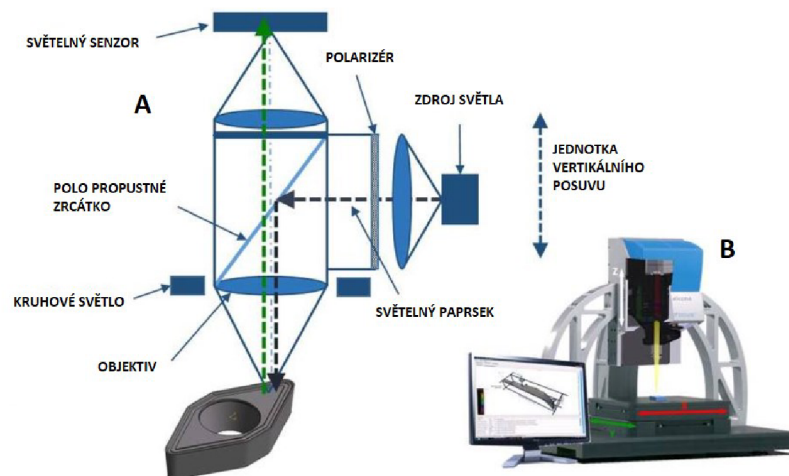
1.3.4 Měření pomocí variace ostření

Metoda Focus Variation neboli metoda variace ostření je jedno z dalších možných metod bezkontaktního měření struktury povrchu. Metoda Focus Variation funguje na principu kombinace hloubky ostrosti optického systému a vertikálního skenování, které probíhá kolmo k ose, čímž získává informace jak o topografii povrchu, tak ale také o barevnosti tohoto povrchu. Hlavní částí systému tohoto měřidla je přesná optická soustava vybavená systémy objektivů, které umožňují měřit s různým rozlišením [31, 32].

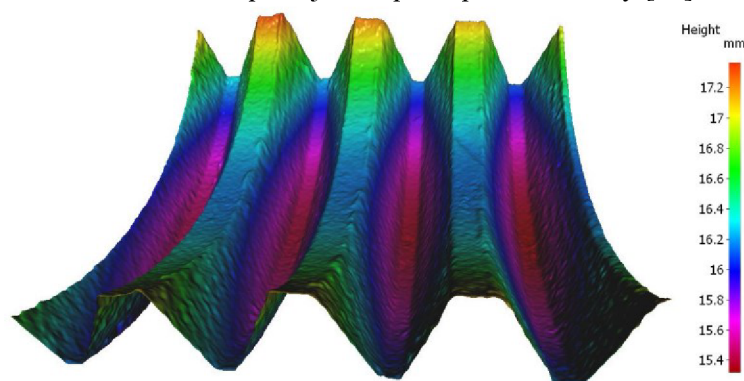
Zdroj bílého světla vysílá proud světla, který je pomocí polopropustného zrcátka odražen do optického systému, který tento paprsek zaměří přes optickou čočku na zkoumaný vzorek. V závislosti na topografii vzorku se světlo od povrchu vzorku odráží v několika

směrech. Pokud struktura povrchu vykazuje tzv. difuzní reflexní vlastnosti, světlo se od něj odrazí rovnoměrně v každém směru od povrchu. V případě kolmého odrazu se světlo příliš nerozptýlí a odrazí se v jednom podobném směru. Po odražení od povrchu jsou tyto svazky světla pomocí optického systému nasměrovány do jednoho směru, prochází přes polopropustné zrcátko a dopadají na světelný senzor, který z těchto paprsků získává informace o zkoumaném povrchu [32].

Vzhledem k tomu, že je obraz povrchu snímán při velmi malé hloubce ostrosti, je ostře zaměřena pouze malá část zkoumaného povrchu. Proto je zde postupně měněna hloubka ostrosti podél svislé osy a během tohoto procesu jsou stále snímány data z povrchu. Tato výšková variace ostření má za následek to, že je po měření k dispozici velké množství zaostřených 2D snímků v různé výšce povrchu a pomocí těchto snímků je softwarem pomocí naskládání snímků na sebe vytvořen výsledný 3D obraz měřeného povrchu [12, 32].



Obr. 14 a) Schématické znázornění měření metodou Focus Variation, b) Přístroj Alicona Infinite Focus IFM 4Ge pracující na principu této metody [33].



Obr. 15 Obraz povrchu řezaného závitu získaný pomocí metody Focus Variation.

Měření závitů pomocí metody variace ostření

Jelikož se praktická část této práce věnuje analýze tvářených a řezaných závitů, jejichž struktury jsou měřeny pomocí metody variace ostření na přístroji od firmy Alicona, je vhodné se zmínit o výhodách a nevýhodách, které vyplývají z výběru této metody.

Výhodou této metody je rychlost získání dat, která jsou k dispozici již po několika minutách od začátku měření. Povrch závitu je rovněž možno zobrazit ve skutečných barvách a rozlišení výsledného obrazu je velmi vysoké. Hlavní nevýhodou měření závitu oproti rovinným plochám je fakt, že díky tvaru závitu nelze nasnímat minimální požadovanou vyhodnocovanou délku, která je nutná pro vyhodnocení profilových a prostorových parametrů. Vyhodnocovanou délku tedy nemůže tvořit jedna přímka, ale je nutné ji sečíst z více kratších úseků, což může způsobit nepřesnost výsledků. Další nevýhodou je špatný průnik světla na dno závitu doprovázený přsvícením vrcholu závitu. Vzorek je proto nutné velmi pečlivě prostorově nastavit a věnovat velkou pozornost vhodnému nasvícení vzorku před spuštěním měření.

1.3.5 Měření pomocí mikroskopie atomárních sil

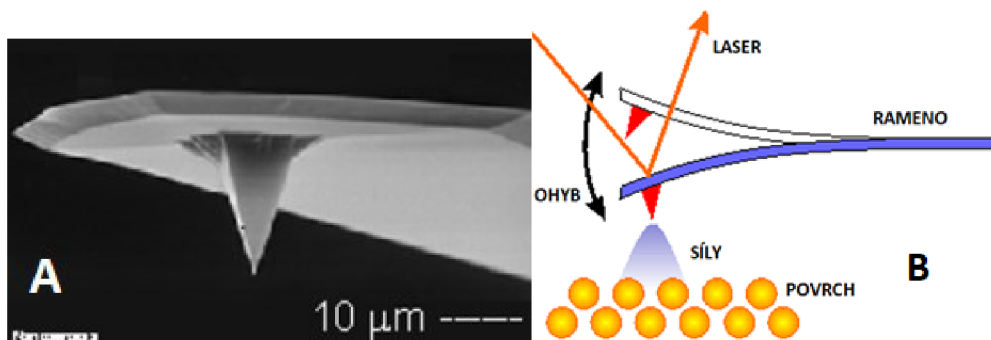
Měření pomocí mikroskopu, který pro svou funkci využívá působení meziatomárních (AFM) sil je velmi přesné a hojně využívané. K zaznamenání výchylek na povrchu zkoumaného materiálu se detekuje pohyb hrotu, který prochází v těsné blízkosti nad tímto vzorkem. Mikroskopy založené na tomto principu mohou vykonávat měření ve dvou základních režimech. První z nich je kontaktní režim, kdy hrot, který je posouván po povrchu vzorku je v kontaktu s tímto povrchem a je do něj mírně tlačěn konstantní silou. Po vychýlení hrotu způsobeném nerovností se změní velikost prohnutí ramena, které nese hrot. Tato změna ohnutí je zaznamenána a v závislosti na poloze hrotu je v tomto místě struktura povrchu zaznamenána [34,36].

Tento způsob však díky svému kontaktu s povrchem může způsobit poškození povrchu v případě měkkého materiálu a také dochází díky kontaktu k otupení špičky hrotu, jehož ostrost je k přesnému měření velmi důležitá. Z těchto důvodů se častěji používá druhý režim, což je režim bezkontaktní. Při této metodě se hrot pohybuje v těsné vzdálenosti nad povrchem (cca 5 Ångström, tj. $5 \cdot 10^{-7}$ mm). V této vzdálenosti působí Van der Waalovy a elektrostatické síly. Protože jsou tyto síly příliš malé na to, aby způsobily vychýlení ramena snímače, je rameno snímače rozkmitáno na frekvenci, která bývá většinou vlastní a poté je zaznamenáván fázový posuv kmitání ramena, který je způsoben působením atomárních sil. Toto kmitání je zaznamenáváno pomocí laserového paprsku, který dopadá na povrch nosníku, který je umístěn u hrotu snímače. Od tohoto nosníku se laserový svazek odráží a dopadá na fotodetektor, který tento paprsek zaznamenává. Při změně prohnutí ramena se změní úhel dopadu, resp. Úhel odrazu laserového paprsku a paprsek dopadá na jiné místo fotodetektoru. Pomocí těchto změn místa dopadu paprsku jsou analyzována data o struktuře povrchu vzorku [34,35].

Pro přesné měření je třeba, aby byla poloha hrotu co nejpřesnější a jeho posuv co nejlépe kontrolován. Pro kontrolu posuvu je používán piezoelektrický skener, který je schopen zrealizovat posuv v desetinách nm. Díky nutné přesnosti polohy hrotů jsou tyto mikroskopy stavěny z pevných materiálů a umístěny na antivibračních stolech [34,35].

Oproti optické mikroskopii dosahuje tento způsob měření většího rozlišení, které se pohybuje v jednotkách nm. Rozlišení je závislé na poloměru špičky hrotu a se zvětšením snímané plochy klesá. Mezi nevýhody AFM patří rychlost snímání povrchu, která je velmi pomalá a také omezená velikost obrazů, která bývá řádově ve stovkách mikrometrů. Další nevýhodou je také těsná blízkost hrotu u povrchu, kde může dojít k nečekanému kontaktu

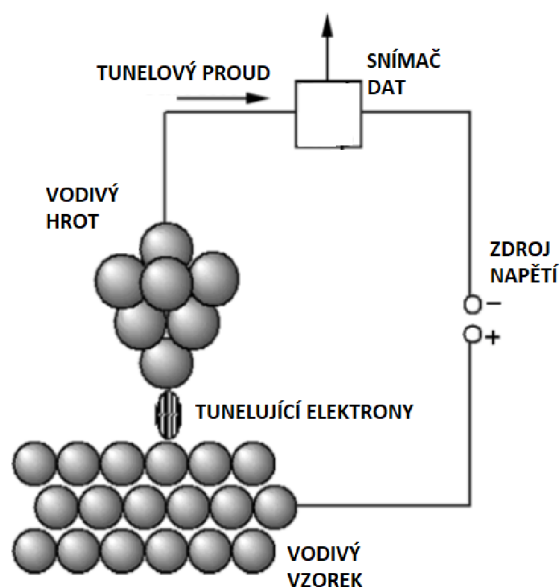
s povrchem, či může být hrot od povrchu znečištěn a může docházet ke zkreslení dat. Mírné zkreslení dat způsobuje také šířka hrotu, která je nenulová [34].



Obr. 16 a) Hrot, nosník a část ramena AFM, b) Princip funkce AFM [35].

1.3.6 Měření pomocí řádkovacího tunelového mikroskopu

Měření využívající řádkovací tunelový mikroskop (STM) je principiálně podobné měření pomocí AFM a je zde dosahováno podobných rozlišení. Měřidlo zaznamenává povrch díky vodivému hrotu, který koná posuv po zkoumaném vzorku, který však musí být vodivý. Tento hrot je taktéž vodivý a mezi hrotem a zkoumaným povrchem vzniká tunelový jev a množství elektronů, které jsou schopny tunelovat mezi snímacím hrotem měřiče a zkoumaným povrchem je exponenciálně závislé na vzdálenosti mezi těmito objekty. Toto množství prošlých elektronů v čase je zaznamenáváno a poté je z těchto dat rekonstruována struktura povrchu zkoumaného vzorku [37, 38, 34].



Obr. 18 Schéma principu STM [38].

2. ZPŮSOBY VYHODNOCOVÁNÍ, MĚŘENÉ PARAMETRY

V minulosti nebyl kvalitě povrchu přikládán dostatečný význam a povrch vyráběných součástí byl dokončován tak, aby měl co nejlhladší plochy. Struktura těchto ploch však nebyla nijak kvantifikována, byla měřena pouze subjektivním posouzením jako například vizuální kontrolou, či přejetím nehtu po obrobeném povrchu [2].

Při výrobě součásti vzniká na povrchu stopa, kterou vždy zanechá nástroj, kterým byla součást naposledy opracována a tím vzniká tzv. textura povrchu. Dříve se textura říkalo také struktura povrchu, dnes je již tento pojem spíše spojován s povrchem na nano úrovni. Avšak i v dnešní době je pojem struktura povrchu jako pojmenování pro texturu povrchu velmi častý [12]. Podle [2] je textura povrchu dělená na dva typy. Prvním typem je strukturovaný povrch. Jedná se o povrch s vysokým poměrem stejných geometrických prvků a podle tvaru těchto prvků je strukturovaný povrch dále dělen na povrch mozaikovitý, povrch s lineárním vzorem, povrch s rotačním vzorem a na tzv. multi-patterns povrch, který obsahuje více druhů strukturovaných vzorů. Druhým typem textury povrchu je tzv. stochastický povrch, kde jsou prvky vyskytující se na povrchu zcela náhodné. Stochastický povrch se dále dělí na izotropní a anizotropní [1, 2].

Jak již bylo zmíněno, nedostatečná kvalita povrchu může mít velký vliv na funkci součástí a často mohou být tyto nedostatky způsobené špatnou kvalitou povrchu fatální následky. Z tohoto důvodu bylo vymyšleno mnoho parametrů, které pomáhají kvantifikovat texturu povrchu a díky nim jsme schopni vyhodnotit funkčnost vyráběných součástí. Tyto parametry budou detailně rozebrány v následujících kapitolách.

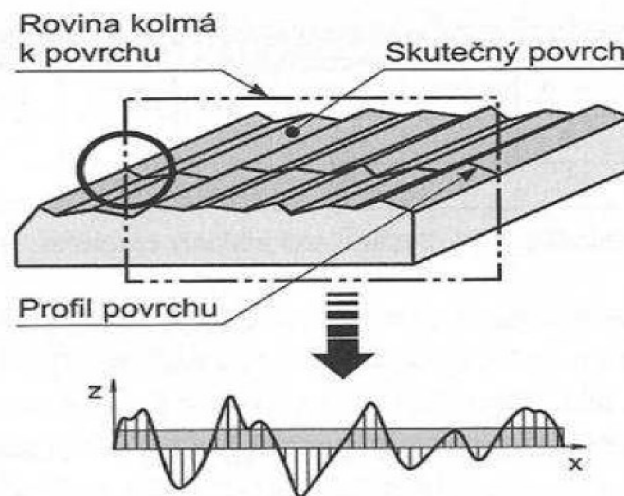
2.1 Vyhodnocování topografie povrchu profilovými parametry

Aby bylo možné popsat způsoby vyhodnocování topografie povrchu, je nutné si definovat základní pojmy, které budou používány. Tyto pojmy jsou definovány normami ČSN EN ISO 8785 [40] a ČSN EN ISO 4287 [41] a vztahují se k profilovým metodám vyhodnocování.

Před posuzováním topografie je dán referenční, nebo také vztažný povrch, který je definován jako povrch, který má tvar geometrického povrchu, vůči němuž se posuzují parametry nedokonalosti povrchu a také je dán skutečný povrch, což je povrch omezující těleso a oddělující ho od okolního prostředí.

Tyto povrchy jsou poté mezi sebou porovnávány a to tak, že je vybrána vyhodnocovací plocha nedokonalosti povrchu, což je část skutečného povrchu celého skutečného povrchu součásti, na níž se předepisují a kontrolují nedokonalosti povrchu, což jsou prvky, nepravidelnosti, nebo skupiny prvků a nepravidelností skutečného povrchu, neúmyslně nebo náhodně způsobené během výroby, skladování nebo používání. Mezi základní typy nedokonalostí povrchu patří např. prohlubeniny, rýhy, škrábance, trhliny, póry, dutiny, vyvýšeniny, vměstky, ořepy a tak dále [40, 41].

Profilovým měřidlem je zaznamenáván profil povrchu, což je profil, který vzniká jako průsečnice skutečného povrchu a dané roviny. Tato rovina bývá ve většině případů kolmá k měřenému povrchu a je položena ve vhodném směru, což je směr, který vykazuje větší výchylky od referenčního povrchu [41]. Tento směr se liší v závislosti na metodě obrábění a nelze ho jednoznačně definovat. Profil povrchu je znázorněn na obrázku 19.



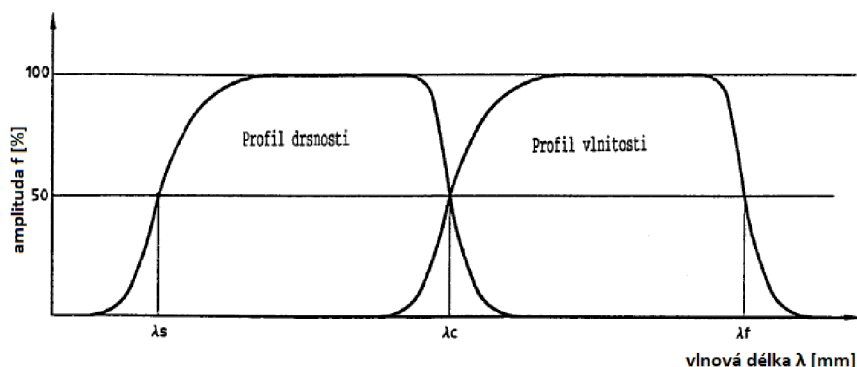
Obr. 19 Znáornění profilu povrchu [39].

2.1.1 Filtrace

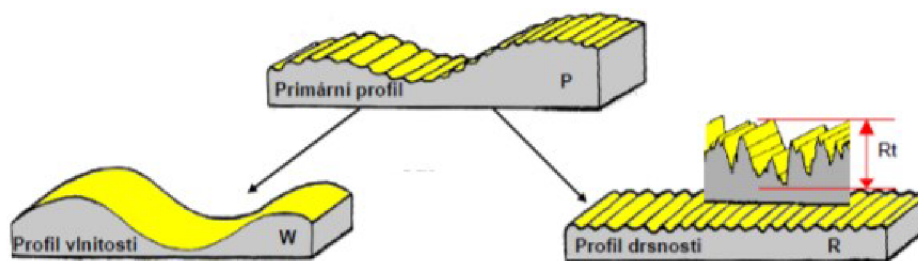
Abychom byli schopni relevantně vyhodnotit topografii měřeného povrchu, je třeba z naměřeného profilu povrchu získat základní profil, ze kterého je poté získán profil vlnitosti a profil drsnosti, s kterými je možno dále pracovat [42]. Tyto profily jsou postupně získávány tak, že je jsou na naměřený profil aplikovány jednotlivé filtry. Znázornění rozdílu mezi těmito profily je zobrazeno na obrázku 21.

Filtr profilu je podle normy ČSN EN ISO 11562 [42] definován jako filtr, který rozděljuje dlouhovlnné a krátkovlnné složky profilu. Zajišťuje tedy vyloučení určitých vlnových délek, které jsou pro další práci v danou chvíli nežádoucí. Filtry jsou aplikovány podle mezní vlnové délky cut-off fázově korigovaného filtru profilu λ_c , jehož vlnová délka je definována jako vlnová délka sinusového profilu, jehož amplituda bude filtrem profilu přenesena s úrovní 50% [42]. Měření bývá ve většině případů prováděno za použité cut off $\lambda_c = 0,8$ mm. Může být použita také délka $\lambda_c = 2,5$ mm, což však musí být uvedeno ve specifikaci a u výsledku [42].

První filtr, který je na měřený povrch aplikován je filtr profilu λ_s , který je definován jako filtr definující rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln přítomnými na povrchu. Tento filtr odstraní z profilu vlivy nedokonalostí povrchu, jako například prohlubeniny, rýhy, škrábance apod. S těmito prvky tedy dále není počítáno. Po aplikaci tohoto filtru vznikne základní profil [39, 40]. Po aplikaci λ_s je na základní profil aplikován filtr λ_c , který je definován jako filtr, jež definuje rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti. Jinak řečeno, tento filtr odstraní z naměřeného profilu prvky s příliš velkou vlnovou délkou a poté zůstává profil drsnosti, jež je základem, pro měření parametrů drsnosti, tzv. R-parametrů. Třetím typem profilu je profil vlnitosti. Profil vlnitosti je získán tak, že je na základní profil aplikován nejdříve filtr λ_c , který odstraní prvky vlnové délky, které jsou kratší, než námi žádané a poté je aplikován filtr λ_r , který podle normy definuje rozhraní mezi složkou vlnitosti a delšími složkami vln přítomnými na povrchu [39, 41]. Jednotlivé složky profilu spolu s naznačenými hodnotami jednotlivých filtrů jsou znázorněny na obrázku 20.



Obr. 20 Profily v závislosti na vlnové délce [41].



Obr. 21 Znárodnění profilů drsnosti a vlnitosti po separaci ze základního profilu [44].

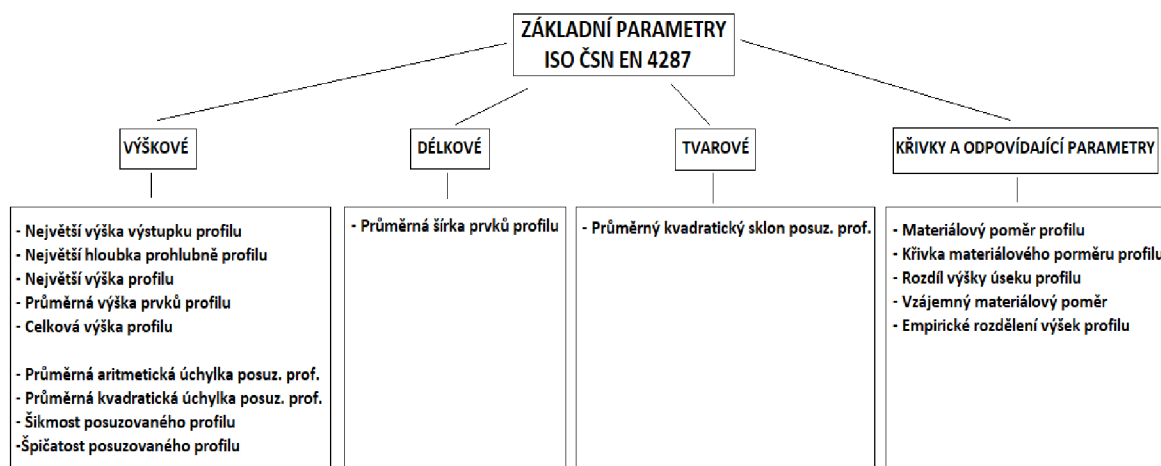
Po získání jednotlivých profilů je možné začít posuzovat a kvantifikovat jednotlivé parametry. Jednotlivé hodnoty analyzovaných parametrů jsou vztahovány k tzv. střední čáře profilu, což je čára, která prochází profilem a dělí na dvě stejné velikosti plochy nad touto čarou a pod touto čarou. V případě profilu drsnosti je střední čára normou definována jako čára odpovídající dlouhovlnné složce profilu potlačené filtrem profilu λ_c , pro případ profilu vlnitosti je dlouhovlnná složka potlačená filtrem profilu λ_f a střední čára základního profilu je čára, která přiléhá k jmenovitému tvaru základního profilu a její poloha je zjišťována metodou nejmenších čtverců [39, 41].

Na těchto čarách jsou parametry měřeny na dvou možných délkách. První délka je délka základní (l_p , l_r , l_w), což je délka ve směru osy X, použitá pro rozpoznání nerovnosti charakterizujících vyhodnocovaný profil. Druhou délkou, která se pro vyhodnocování parametrů používá je vyhodnocovaná délka (l_n), která je definována jako délka ve směru osy X, použitá pro posouzení vyhodnocovaného profilu. Vyhodnocovaná délka může v sobě zahrnovat jednu, či více základních délek, nicméně často je vyhodnocovaná délka dána pětinašobkem délky základní a analyzované parametry jsou poté dány průměrem z hodnot na jednotlivých základních délkách [42, 44].

2.1.2 Základní parametry

Norma ČSN EN ISO 4287 definuje 15 základních parametrů, pomocí kterých je možno kvantifikovat strukturu povrchu při profilovém měření. Parametry jsou děleny do čtyř základních skupin, a to výškové parametry, parametry délkové tvarové a křivky a odpovídající parametry. Každý z 15 parametrů je dále rozlišován do tří typů. Prvním typem

jsou R-parametry, které jsou odvozovány a počítány z profilu drsnosti, dalším typem je W-parametr, který je odvozen z profilu vlnitosti a třetím typem je P-parametr, který je odvozen z profilu základního. V následujícím textu jsou rozebrány jednotlivé z 15 základních parametrů. Jejich přesné definice jsou převzaty z normy ČSN EN ISO 4287 [41].



Obr. 22 Rozdělení základních parametrů.

Největší výška výstupku profilu P_p , R_p , W_p

Anglický název: maximum profile peak height

Definice dle [41]: Výška Z_p nejvyššího výstupku profilu v rozsahu základní délky.

Výpočet ze základní délky naznačuje vzorec (6). Největší výška výstupku profilu je zobrazena na obrázku 23.

$$R_p = \max(Z_{pi}) \quad (6)$$

Největší hloubka prohlubně profilu P_v , R_v , W_v

Anglický název: maximum profile valley depth

Definice dle [41]: Hloubka Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky.

Výpočet ze základní délky naznačuje vzorec (7). Největší hloubka prohlubně profilu je zobrazena na obrázku 23.

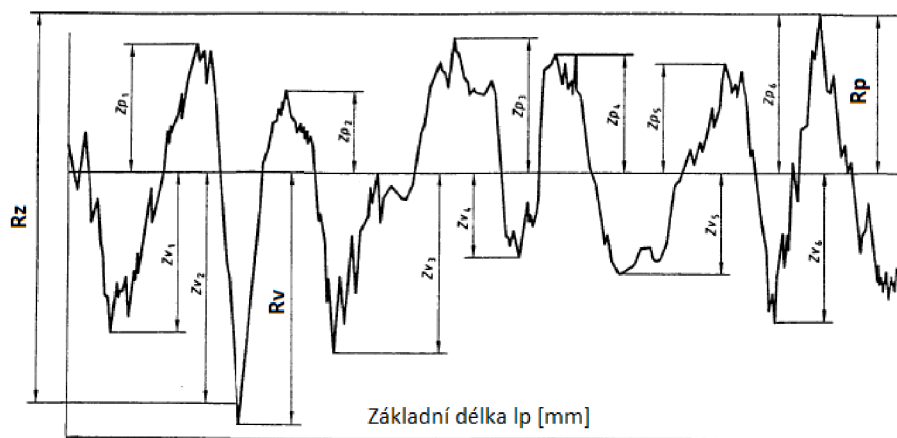
$$R_v = \max(Z_{vi}) \quad (7)$$

Největší výška profilu P_z , R_z , W_z

Anglický název: maximum height of profile

Definice dle [41]: Součet výšky Z_p největšího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky.

Parametr byl podle dřívějšího znění normy označován jako výška nerovností z deseti bodů. Na tento fakt je třeba brát zřetel, protože starší přístroje, které se stále často používají měří parametr R_z v původní definici a výška profilu je počítána z deseti bodů a rozdíly mezi výsledky počítanými podle nové a staré definice mohou být nezanedbatelné. Největší výška profilu je zobrazena na obrázku 23.



Obr. 23 Znáornění parametrů R_p , R_v , R_z na profilu drsnosti – podle [41].

Průměrná výška prvků profilu P_c , R_c , W_c

Anglický název: mean height of profile elements

Definice dle [41]: Průměrná hodnota výšek Z_t prvků profilu v rozsahu základní délky.

Z_t prvkem se rozumí vzdálenost v ose Z dané prohlubně a nejbližšího výstupku. Výpočet ze základní délky naznačuje vzorec (8).

$$R_c = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m Z_{t_i} \quad (8)$$

Celková výška profilu P_t , R_t , W_t

Anglický název: total height of profile

Definice dle [41]: Součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnížší prohlubně profilu v rozsahu vyhodnocované délky.

Jedná se o parametr, který je velmi podobný parametru P_z , R_z , W_z , avšak tyto parametry se vyhodnocují na délce základní a celková výška profilu na délce vyhodnocované. Z toho plyne, že parametry P_t , R_t a W_t budou velmi pravděpodobně větší, než parametry P_z , R_z , W_z .

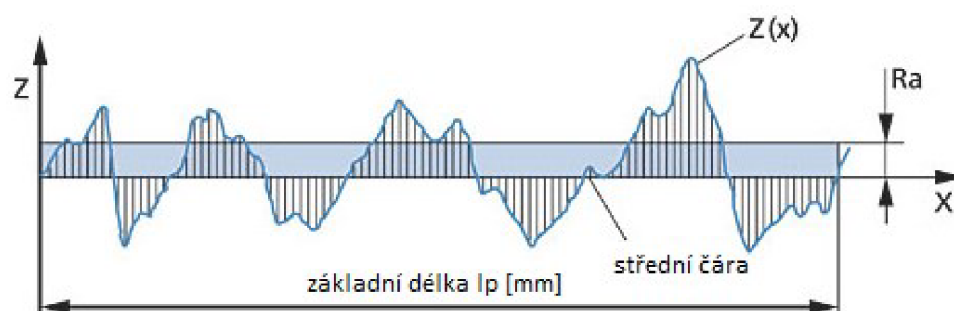
Průměrná aritmetická úchylna posuzovaného profilu Pa, Ra, Wa

Anglický název: arithmetical mean deviation of the assessed profile

Definice dle [41]: Aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky.

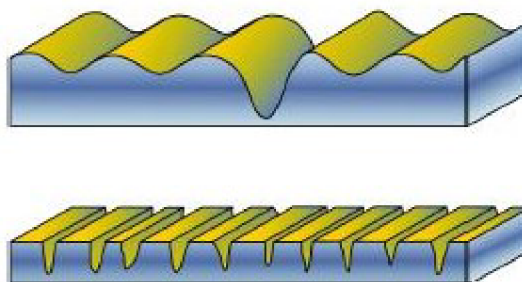
Hodnota Ra je jednou z nejrozšířenějších a nejvíce používaných profilových parametrů. Důkazem rozšířenosti je například fakt, že je tento parametr možné analyzovat téměř na všech přístrojích, měřících strukturu povrchu. Dalším důkazem je například to, že se parametr Ra předepisuje v rohovém razítku výkresové dokumentace pro danou součást v místech, kde není drsnost povrchu na výkresové dokumentaci specifikována konkrétní hodnotou. Grafické znázornění tohoto parametru lze vidět na obrázku 42, výpočet hodnoty Ra naznačuje vzorec (9).

$$Ra = \frac{1}{l} \cdot \int_0^l |Z(x)| dx \quad (9)$$



Obr. 42 Grafické znázornění parametru Ra [48].

Mezi výhody tohoto parametru patří, jak již bylo zmíněno, že jej lze naměřit téměř na všech přístrojích určených k těmto účelům, je statisticky stabilní a opakovatelný a je vhodný i pro náhodné typy povrch vytvořené například broušením. Tento parametr je vhodný pro procesy, jejichž podmínky jsou stále stejné [46]. Mezi nevýhody aritmetické úchylny patří to, že je průměrná hodnota úchylny počítána bez ohledu na směr těchto úchyln. Parametr tedy nerozlišuje prohlubně a výstupky a může se tedy stát, že se na povrchu s příznivou hodnotou Ra může objevit ojedinělá větší prohlubeň, či výstupek, což může přinést špatné následky. Z toho plyne, že dva povrchy mohou mít stejnou hodnotu Ra, ale jejich struktura může být zcela odlišná [45]. Názorné zobrazení této situace je možno vidět na obrázku 43.



Obr. 43 Dva odlišné povrchy se stejnou hodnotou Ra 2 μ m [45].

Nejčastější rozsah hodnot Ra u kovového povrchu je mezi 0,02 a 6,3 μm . Co se parametru Ra u závitu týče, hodnoty se pohybují od Ra 0,4 do 3,2 μm . Hodnota závisí na velkém průměru závitu, na stupni přesnosti lícování a na způsobu výroby. Při výrobě řezáním se hodnoty běžně pohybují v rozsahu 1,6 - 3,2 μm , při výrobě válcováním lze dosáhnout hodnoty Ra 0,4 μm [47].

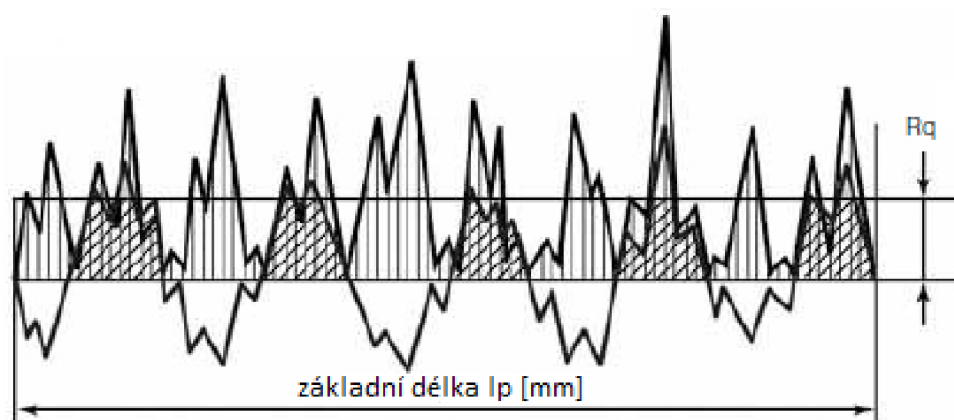
Průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu P_q , R_q , W_q

Anglický název: root mean square deviation of the assessed profile

Definice dle [41]: Kvadratický průměr pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky.

Parametr R_q je velmi podobný průměrné aritmetické úchylce Ra. Rozdíl je v tom, že jsou hodnoty amplitudy, tedy výchylek od střední čáry umocněny na druhou a tím pádem je tento parametr více citlivý na prohlubně a výstupky. Svou funkcí pro běžné použití často prakticky nahrazuje parametr Ra. Díky své větší citlivosti se používá u hladších povrchů převážně při laboratorních měřeních [49]. Grafické znázornění tohoto parametru lze vidět na obrázku 44, výpočet hodnoty Ra naznačuje vzorec (10).

$$Ra = \sqrt{\frac{1}{l} \cdot \int_0^l |Z^2(x)| dx} \quad (9)$$



Obr. 44 Grafické znázornění parametru R_q [50].

Šikmost posuzovaného profilu P_{sk} , R_{sk} , W_{sk}

Anglický název: skewness of the assessed profile

Definice dle [41]: Podíl průměrné hodnoty třetích mocnin pořadnic $Z(x)$ a třetí mocniny hodnoty P_q , R_q nebo W_q v rozsahu základní délky.

Tento parametr popisuje rozložení amplitudy profilu. Popisuje tedy míru symetrie profilu kolem střední čáry. Pro povrchy s normálním Gaussovým rozdělením platí, že šikmost je rovna nule. Tento parametr není schopen rozlišit, jestli se výchylky profilu nachází nad, nebo pod střední čarou a nevýhodou tohoto parametru je jeho vysoká citlivost

na ojedinělé větší výstupky, nebo prohlubně. Použití tohoto parametru může také rozlišit dva povrchy, které mají stejnou hodnotu Ra [51]. Výpočet hodnoty Rsk naznačuje vzorec (10).

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \cdot \left[\frac{1}{lr} \cdot \int_0^l |Z^3(x)| dx \right] \quad (10)$$

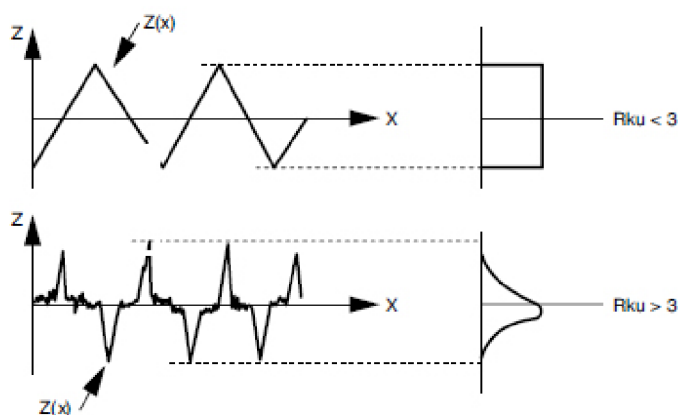
Špičatost posuzovaného profilu Pku, Rku Wku

Anglický název: kurtosis of the assessed profile

Definice dle [41]: Podíl průměrné hodnoty čtvrtých mocnin pořadnic Z(x) a čtvrté mocniny hodnoty Pq, Rq nebo Wq v rozsahu základní délky.

Tento parametr měří míru rozložení špičatosti vrcholů profilu oproti normálnímu rozložení. Pozitivní hodnota znázorňuje relativně špičaté rozložení, naopak negativní hodnota indikuje více ploché rozložení. Normální rozložení má hodnotu špičatosti 3 [52]. Grafické znázornění tohoto parametru lze vidět na obrázku 45, výpočet hodnoty Ra naznačuje vzorec (11).

$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \cdot \left[\frac{1}{lr} \cdot \int_0^l |Z^4(x)| dx \right] \quad (11)$$



Obr. 45 Znázornění parametru Rku [50].

Průměrná šířka prvků profilu PSm, RSm, WSm

Anglický název: mean width of the profile elements

Definice dle [41]: Aritmetický průměr šířek Xs prvků profilu v rozsahu základní délky.

Jeden prvek profilu Xs je roven vzdálenosti počátku prohlubně v bodě protnutí střední čáry a konce nejbližšího výstupku v bodě protnutí střední čáry. Aby mohl být tento parametr z profilu analyzován, je třeba aplikovat určité omezení výšky a šířky prvků profilu. Tyto hodnoty mohou být před měřením určeny, avšak pokud určeny nejsou, platí, že omezení

výšky prvku je rovno 10% Pz, Rz nebo Wz a omezení rozteče prvku je rovno 1% základní délky [41, 50]. Výpočet hodnoty RSm naznačuje vzorec (12).

$$RSm = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m X_{si} \quad (12)$$

Průměrný kvadratický sklon posuzovaného profilu P Δ q, R Δ q, W Δ q

Anglický název: root mean square slope of the assessed profile

Definice dle [41]: Kvadratický průměr sklonů pořadnic dZ/dX v rozsahu základní délky.

Materiálový poměr profilu (nosný podíl) Pmr(c) Rmr(c), Wmr(c)

Anglický název: materiál ratio of the profile

Definice dle [41]: Poměr délky materiálu elementů profilu MI(c) na dané úrovni c, k vyhodnocované délce.

Na vyhodnocované délce je v jednotlivých výškových úrovních profilu c vyhodnocen materiálový poměr a pomocí těchto výsledků je stanovena křivka materiálového poměru.

Křivka materiálového poměru profilu tzv. Abbott Firestoneova křivka

Anglický název: materiál ratio curve of the profile

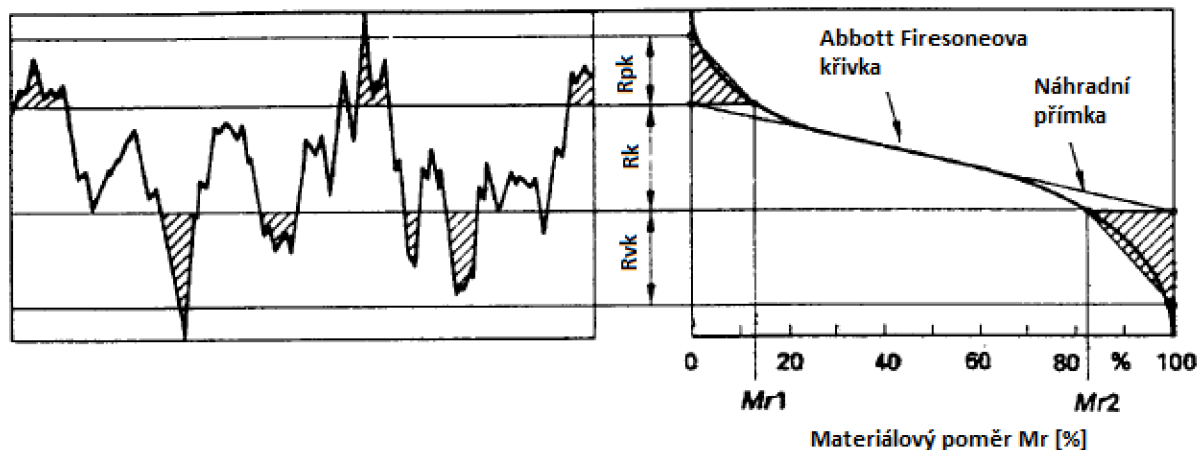
Definice dle [41]: Křivka představující materiálový poměr profilu v závislosti na výšce úrovně.

Abbott Firestoneova křivka (zkráceně nazývána Abbottova křivka) je velmi důležitým prvkem v oblasti analýzy povrchu. Slouží jako ukazatel velikosti odolnosti proti opotřebení. Nejdříve je určena samotná křivka materiálového poměru vyhodnocováním materiálového poměru v jednotlivých úrovních profilu.

Po stanovení této křivky je nutno do grafu vložit tzv. náhradní přímku. Náhradní přímka má délku 40% materiálového poměru a má polohu sečny k Abbottově křivce a leží v místech, kde má Abbottova křivka nejmenší sklon. Po umístění náhradní přímky vznikají dva body protnutím náhradní přímky svislé osy v 0% a 100% materiálového poměru. Svislá vzdálenost těchto bodů poté tvoří jádro drsnosti Rk, které je podle [53] definováno jako profil drsnosti s vyloučením vyčnívajících výstupků a hlubokých prohlubní.

Abbott Firestoneova křivka ve spojení s odpovídajícím profilem povrchu je zobrazena na obrázku 46. Plochy, jež jsou na obrázku 46 v oblasti Abbotovy křivky vyšrafované mají tvar pravoúhlého trojúhelníku o ploše odpovídající velikosti součtu ploch výstupků, resp. prohlubní, které se nachází mimo oblast jádra profilu drsnosti Rk. Základny těchto trojúhelníků tvoří úsečka 0% - materiálový podíl Mr1, resp. Mr2 – 100% a výšky těchto trojúhelníků znázorňují redukovanou výšku výstupků Rpk, resp. redukovanou hloubku prohlubní Rvk. Redukovaná výška výstupků znázorňuje materiál výstupků, které budou při uvedení součásti do provozu rychle opotřebeny, popřípadě může dojít k jejich oddělení.

Redukovaná hloubka prohlubní je parametr, který je vhodný pro posouzení množství maziva, které díky těmto prohlubním ulpí na povrchu součásti [45, 53].



Obr. 46 Abbott Firestoneova křivka [53].

2.1.3 Profilové parametry metody MOTIF

Metoda motif představuje další z možností, jak lze charakterizovat topografii povrchu. Je charakterizována a popsána normou ČSN EN ISO 12085 [54]. Tato metoda byla vyvinuta ve Francii a byla používána ve francouzském automobilovém průmyslu. Prvky metody motif jsou na rozdíl od základních profilových parametrů analyzovány na nefiltrovaném profilu povrchu [1].

Parametry motif jsou rozděleny do dvou skupin, a to do motif parametrů drsnosti a motif parametrů vlnitosti. Prvek motif je v profilu povrchu brán jako kombinace prohlubně a výstupku. Norma ČSN EN ISO 12085 definuje tento prvek jako část základního profilu mezi nejvyššími body dvou místních výstupků profilu, které nejsou nezbytně přilehlé [54]. Samotný prvek poté charakterizuje délka AR_i , resp. AW_i v případě profilu vlnitosti, prohlubněmi H_j a H_{j+1} , resp. H_{wj} a H_{wj+1} a tzv. T charakteristikou, jež je normou definována jako menší z dvou hloubek [53, 54]. Na základě stanovení jednotlivých motif prvků na vyhodnocované délce jsou pro profil drsnosti stanoveny parametry uvedené v tabulce 1.

Tab. 1 Parametry motif pro profil drsnosti – podle [68].

| Parametry | Název | Vzorec pro výpočet |
|----------------|---------------------------------------|--|
| AR | Průměrná rozteč prvků motif drsnosti | $AR = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n AR_i$ |
| R | Průměrná hloubka prvků motif drsnosti | $R = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m H_j$ |
| R _x | Největší hloubka profilu nerovnosti | $R_x = \max[H_j, j \in (1, m)]$ |

U profilu vlnitosti je nutné stanovit tzv. horní obálku základního profilu, díky které je možné stanovit parametry motif pro profil vlnitosti. Horní obálka je dle normy ČSN EN ISO 12085 definována jako přímka spojující nejvyšší body výstupků základního profilu po stanoveném omezení vrcholů [54]. Po stanovení horní obálky lze postupovat v podstatě analogicky jako v případě profilu drsnosti a je možno stanovit parametry motif pro profil vlnitosti uvedené v tabulce 2.

Tab. 2 Parametry motif pro profil vlnitosti – podle [68].

| Parametry | Název | Vzorec pro výpočet |
|------------|--|--|
| AW | Průměrná rozteč prvků motif vlnitosti | $AW = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n AW_i$ |
| W | Průměrná hloubka prvků motif vlnitosti | $W = \frac{1}{m} \cdot \sum_{j=1}^m HW_j$ |
| Wx | Největší hloubka nerovnosti | $W_x = \max[HW_j, j \in (1, m)]$ |
| Wte | Celková hloubka vlnitosti | |

2.2 Vyhodnocování topografie povrchu plošnými parametry

Vyhodnocování topografie povrchu pomocí plošných parametrů patří k velmi hojně využívanému způsobu kvantifikace topografie povrchu. Na rozdíl od vyhodnocování pomocí profilových parametrů, kdy je k dispozici pouze 2D profil naměřeného povrchu, je zde k dispozici rekonstruovaný povrch, který je trojrozměrný. Z tohoto trojrozměrného povrchu lze kromě plošných parametrů vyhodnocovat také profilové parametry s tím, že onen profil je možno vytvořit v jakémkoliv vhodném směru na povrchu a s tímto profilem dále pracovat.

Plošné parametry se dělí do dvou hlavních skupin, a to do parametrů pole a parametrů prvku. Parametry pole jsou parametry definované ze všech bodů na vyhodnocované ploše a parametry prvku pracují s předem definovanými topologickými prvky povrchu [2].

Výhodou tohoto typu hodnocení plochy je také to, že pro charakterizaci hodnocené plochy postačí pouze jeden parametr, na rozdíl od vyhodnocování profilovou metodou, kde jsou parametry dělené do tří skupin (základní profil, drsnost, vlnitost). V profilovém hodnocení povrchu je průměrná kvadratická úchylka posuzovaného povrchu zastupována parametry P_q , R_q , W_q , kdežto v plošném hodnocení je pro tyto parametry analogický jediný parametr S_q [2]. Plošné parametry pro vyhodnocování topografie povrchu jsou definovány normou ČSN EN ISO 25178-2 [55].

2.2.1 Filtrace

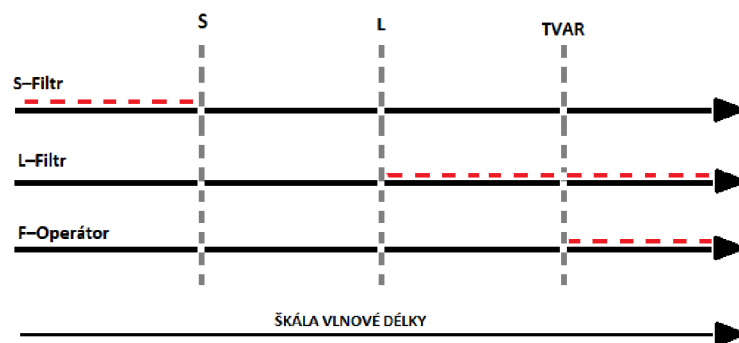
Na měřený povrch je po záznamu dat nutné aplikovat různé druhy filtrace. Tak, jako tomu je při profilovém hodnocení, i zde je nutné z povrchu odstranit prvky, které jsou při vyhodnocování nežádoucí, jako například trhliny, škrábance, otřepy a podobně. Filtrace

většinou funguje na podobném principu, jako u profilové metody a to tak, že jsou z naměřeného povrchu postupně vytěšňovány jednotlivé prvky s podobnou vlnovou délkou.

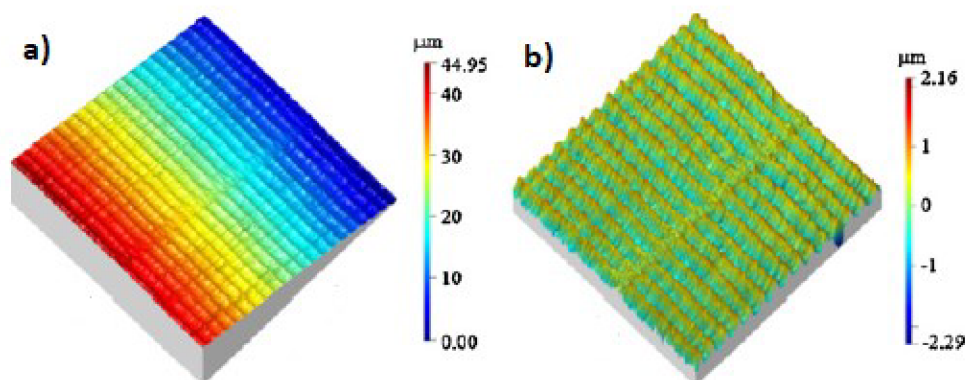
Po naměření povrchu je na povrch aplikována matematická operace, která má za úkol eliminovat vliv tvaru povrchu součásti. Naměřenému povrchu je tedy přiřazen určitý původní tvar, jako například plocha, válec, koule, náklon a podobně. Tato operace je nazývána jako F–operátor. Tuto operaci je vždy nutné aplikovat před jakoukoliv další filtrací [56]. V některých případech je vyhodnocovací software schopný přiřadit naměřenému povrchu tvar automaticky, jindy je nutné tvar povrchu přiřadit ručně.

Po přiřazení tvaru povrchu F–operátorem je na povrch aplikován Gaussův S–filtr, který má za úkol z povrchu vytěšnit prvky s velmi krátkou vlnovou délkou. Tímto se docílí odfiltrování prvků typu rýh, škrábanců atp. Po aplikaci tohoto operátoru vznikne takzvaný SF povrch, také nazývaný jako primární povrch [2, 56].

V případě potřeby může být na primární povrch aplikován L–filtr, který z SF povrchu vytěsí prvky s velkou vlnovou délkou a vzniká tzv. SL povrch [56]. Grafické znázornění jednotlivých druhů filtrů je na obrázku 47, znázornění povrchu před a po Gaussovou filtrací na obrázku 48.



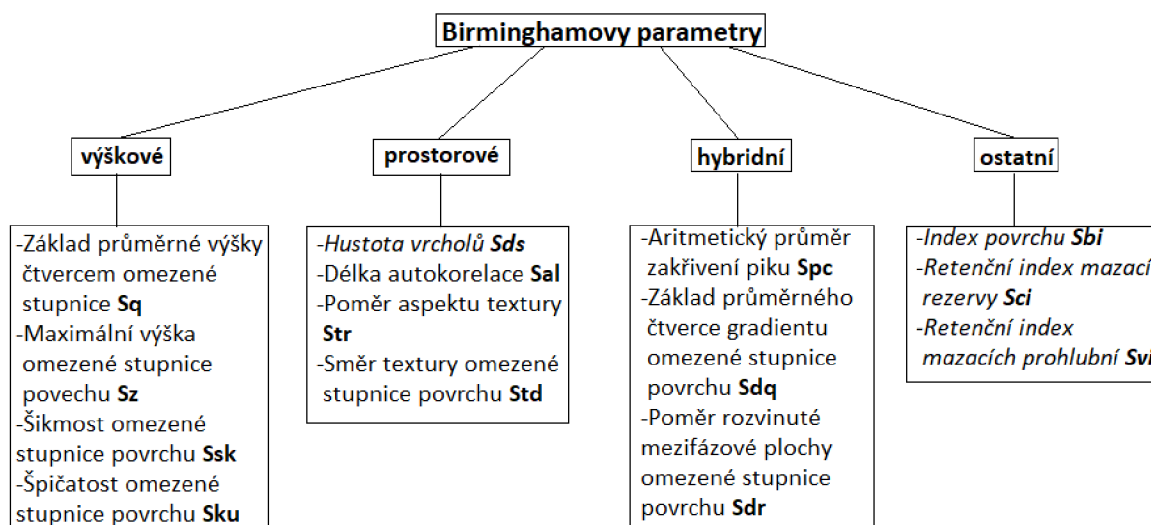
Obr. 47 Filtry ve vztahu k vlnové délce–podle [2].



Obr. 48 Frézovaný povrch po aplikaci Gaussových filtrů [2]. a) naměřený povrch, b) SL povrch

2.2.2 Birminghamovy parametry

První sada parametrů, pomocí které bylo možné charakterizovat a kvantifikovat topografii 3D povrchu, byla sestavena v roce 1990 velkou skupinou vědců zapojených do projektu s názvem SURFSTAND, kteří pomocí mnoha experimentů vyvíjeli jednotlivé parametry. Tato sada parametrů je nazývána jako Birminghamovy parametry. Je dělena do čtyř podoblastí a těmi jsou skupiny parametrů výškových, prostorových, hybridních a funkčních [57]. Přehled těchto parametrů je na obrázku 49. Parametry na obrázku 49 psané kurzívou jsou mými návrhy českého překladu, neboť nebylo možné české překlady dohledat.



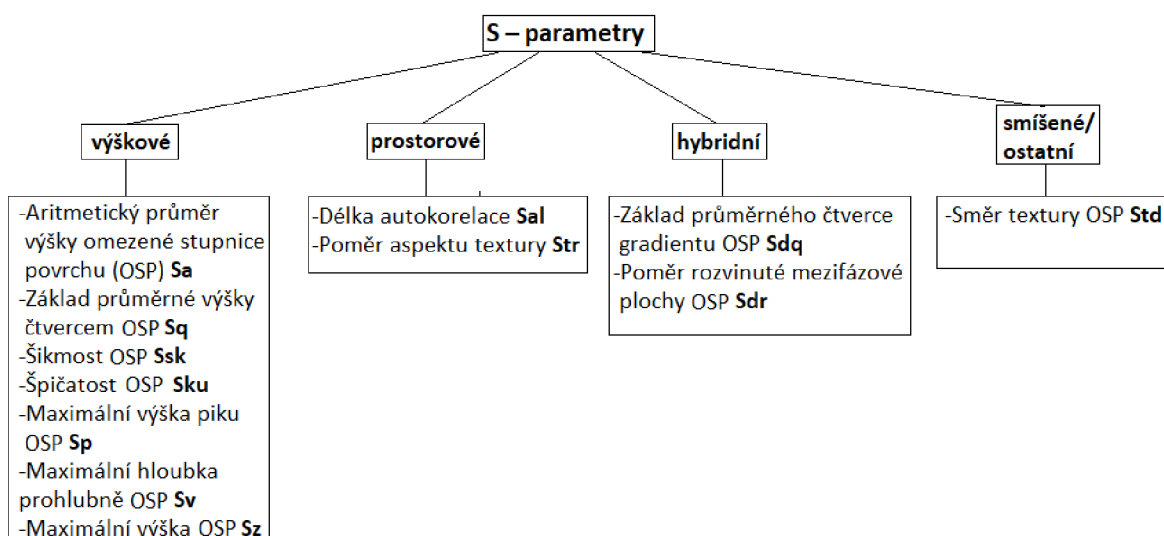
Obr. 49 Birminghamovy parametry podle [18].

U těchto parametrů však byly problémy s definicemi některých parametrů, které byly matematicky nejednoznačné. Projekt SURFSTAND proto pokračoval a v roce 2001 vznikla vylepšená sada parametrů, která je dělena na parametry pole a parametry prvku. Tato nová sada parametrů byla převzata mezinárodními normalizačními organizacemi a je do dnešních dnů využívána [18, 57].

2.2.3 Parametry pole

Parametry pole jsou parametry vzniklé vývojem z Birminghamových parametrů a jsou definovány normou ČSN EN ISO 25172–2 [55]. Tato norma je dělí na parametry výškové, prostorové, hybridní a funkční a související. Mnoho z těchto parametrů také vyplývají z profilových parametrů definovaných v normě ČSN EN ISO 4287 [41].

Parametry pole se rozdělují na S-parametry a V-parametry. S-parametry jsou parametry stanovené na základě výšky amplitud a prostorové rozteči, V-parametry udávají informace založené na křivce materiálového poměru, Abbott–Firestoneově křivce [18].



Obr. 50 S – parametry podle [2, 18, 55].

Aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu Sa

Anglický název: arithmetical mean height of the scale limited surface

Definice dle [55]: Aritmetický průměr absolutních hodnot koordinace uvnitř určené plochy A.

Informace o parametru Sa a jeho aplikace je uvedena souhrnně s následujícím parametrem Sq níže. Výpočet hodnoty Sa naznačuje vzorec (13).

$$S_a = \frac{1}{A} \cdot \iint_A |z(x, y)| dx dy \quad (13)$$

Základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu Sq

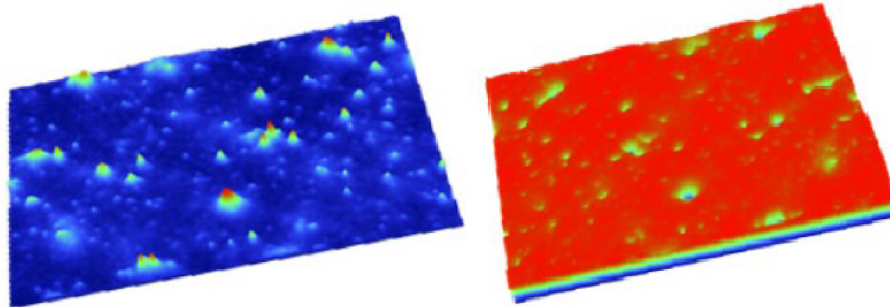
Anglický název: root mean square height of the scale-limited surface

Definice dle [55]: Vymezení průměrné hodnoty čtverce hodnot koordinace uvnitř plochy definice A.

Výpočet hodnoty Sq naznačuje vzorec (14).

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \cdot \iint_A z^2(x, y) dx dy} \quad (14)$$

Parametry Sa a Sq společně reprezentují celkovou strukturu povrchu. Tyto parametry nejsou příliš citlivé na extrémní výchylky. Nevýhodou těchto dvou parametrů je podobně jako u profilových parametrů Ra a Rq to, že dva povrchy mohou mít stejné hodnoty, a přesto mohou být poměrně dosti odlišné, což může mít v jejich funkci velmi špatné následky. Tento rozdíl je demonstrován na obrázku 51. Parametr Sq se často používá u optických povrchů a parametr Sa je používán u povrchů obráběných [56].



Obr. 51 Dva povrchy se stejnými parametry $S_a=16,03$ nm, $S_q=25,4$ nm [56].

Šikmost omezené stupnice povrchu S_{sk}

Anglický název: Skewness of the scale-limited surface

Definice dle [55]: Kvocient průměrné hodnoty koordinační krychle a hodnot a krychle S_q uvnitř určené plochy A .

Tento parametr lze efektivně použít k popisu rozložení výšky topografie povrchu a popisuje tak míru symetrie výškových výchylek povrchu ve směru osy Z . Pokud mají na povrchu převahu vrcholy, tzv. piky, hodnota S_{sk} je větší, než nula a v opačném případě, pokud převládají prohlubně, hodnota S_{sk} je záporná. Pro Gaussův povrch, jehož výškové rozložení je symetrické je hodnota S_{sk} rovna nule [18]. Výpočet hodnoty S_{sk} naznačuje vzorec (15).

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \cdot \left[\frac{1}{A} \cdot \iint_A z^3(x, y) dx dy \right] \quad (15)$$

Špičatost omezené stupnice povrchu S_{ku}

Anglický název: Kurtosis of the scale-limited surface

Definice dle [55]: Kvocient průměrné čtvrté mocniny hodnoty koordinace a hodnoty čtvrté mocniny S_q uvnitř určené plochy A .

Parametr S_{ku} dokládá přítomnost neobvykle vysokých výchylek povrchu, jinak řečeno výchylku vysokých piků, či hlubokých prohlubní v textuře povrchu. V případě normálního rozložení povrchových výchylek je hodnota S_{ku} rovna 3. Povrchy, jež nemají rysy s extrémními piky, či prohlubněmi mají hodnotu S_{ku} menší, než 3 a povrchy, jež obsahují více extrémních výchylek v ose Z mají S_{ku} větší, než 3 [56]. Výpočet hodnoty S_{ku} naznačuje vzorec (16).

$$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \cdot \left[\frac{1}{A} \cdot \iint_A z^4(x, y) dx dy \right] \quad (16)$$

Maximální výška piku omezené stupnice povrchu S_p

Anglický název: Maximum peak height of the scale-limited surface

Definice dle [55]: Největší hodnota výšky piku uvnitř určené plochy.

Maximální hloubka prohlubně omezené stupnice povrchu S_v

Anglický název: Maximum pit height of the scale-limited surface

Definice dle [55]: Hloubka prohlubně uvnitř určené plochy zmenšená o její nejmenší hodnotu.

Maximální výška omezené stupnice povrchu S_z

Anglický název: Maximum height of the scale-limited surface

Definice dle [55]: Součet maximální hodnoty výšky piku a maximální hodnoty hloubky prohlubně uvnitř určené plochy.

Výpočet hodnoty S_z naznačuje vzorec (17).

$$S_z = S_p - S_v \quad (17)$$

Parametry S_p , S_v a S_z jsou měřeny z jednotlivých bodů na ploše, a proto je zde tendence k neopakovatelnosti měření. Parametr S_p je vhodné předepisovat u případů, kde bude vyráběná součást používána v kluzném kontaktu s jinou součástí. Parametr S_v se předepisuje v případech, kdy mohou hloubky prohlubní hrát roli v zadržování tekutin, konkrétně například v udržení maziva na povrchu součásti, či při efektivitě povlakování [56].

Délka autokorelace S_{al}

Anglický název: Autocorrelation length

Definice dle [55]: Horizontální vzdálenost autokorelační funkce $f_{ACF}(t_x, t_y)$, u které dochází nejrychlejšímu rozpadu specifikované hodnoty s , $s < 1$.

K určení tohoto parametru je nutné uplatnit na povrch autokorelační funkci, konkrétně její grafické vyjádření v podobě typického autokorelačního vrcholu, který je zobrazen na obrázku 52b. Tímto vrcholem je nutné provést řez ve výšce 0,2násobku výšky vrcholu a z plochy tohoto řezu je možno analyzovat parametr S_{al} , který ve grafickém vyjádření prahu autokorelace představuje nejkratší vzdálenost od středu autokorelačního vrcholu k hranici řezu, tedy se jedná o vzdálenost R_{min} [19, 55, 58]. Vzdálenost R_{max} a R_{min} je zobrazena na obrázku 52c. Výpočet hodnoty S_{al} naznačuje vzorec (18).

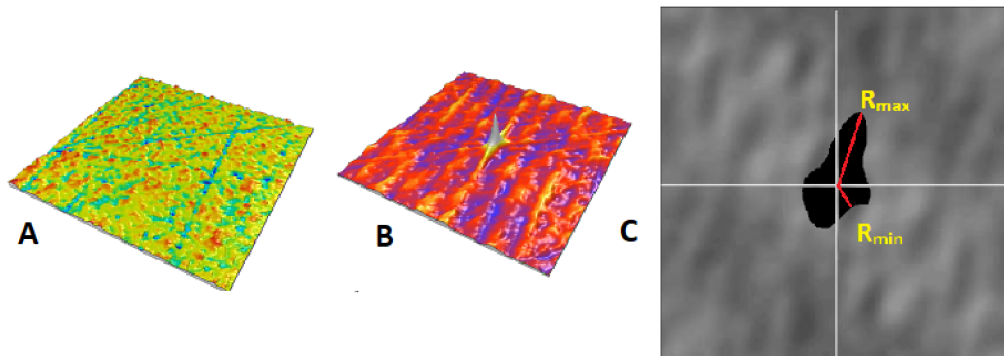
$$S_z = \min_{t_x, t_y \in R} \sqrt{t_x^2 + t_y^2}, \text{ kde } R = \{(t_x, t_y) : f_{ACF}(t_x, t_y) < s\} \quad (18)$$

Poměr aspektu textury Str

Anglický název: Texture aspect ratio

Definice dle [55]: Poměr horizontální vzdálenosti autokorelační funkce $f_{ACF}(t_x, t_y)$, u které dochází k nejrychlejšímu rozpadu specifikované hodnoty vzhledem k horizontální vzdálenosti $f_{ACF}(t_x, t_y)$, která má nejpomalejší rozpad k s, $0 < s < 1$.

Poměr aspektu textury vyjadřuje míru prostorové izotropie a jednotnosti povrchu. Tento parametr je rovněž získáván pomocí autokorelační funkce a jejího prahu autokorelace. Konkrétně se tento parametr získá poměrem minimální vzdálenosti středu autokorelačního vrcholu k hranici řezu R_{min} a maximální touto vzdáleností R_{max} . U anizotropních povrchů se hodnota bude blížit k nule, zatím co u povrchů, podobajících se izotropnímu povrchu budou hodnoty R_{min} a R_{max} velmi podobné a hodnota Str se bude blížit jedné [19, 55, 56, 58].



Obr. 52 a) původní povrch, b) autokorelace, c) řez vrcholem autokorelace–podle [55, 58].

Základ průměrného čtverce gradientu omezené stupnicí povrchu S_{dq}

Anglický název: Root mean square gradient of the scale-limited surface

Definice dle [55]: Základ průměrného čtverce povrchu gradientu uvnitř určené plochy A omezené stupnicí povrchu.

Parametr S_{dq} zohledňuje počet šikmých ploch po celém měřeném povrchu. Může být použit například pro rozlišení povrchů s podobnou hodnotou S_a . Parametr může být předepsán u součástí v těsnících sestavách, při nutnosti zdokonalení vzhledu povrchu, nebo může na tento parametr být brán potaz s ohledem na stupeň smáčivosti kapaliny, která je s povrchem v kontaktu. Jak již bylo naznačeno, parametr S_{dq} bývá v úzkém spojení s parametrem R_a kvůli konkretizaci finální textury povrchu. Hodnota S_{dq} pro zcela rovný a hladký povrch je nula, se stoupajícím výskytem šikmých ploch na povrchu se hodnota S_{dq} zvětšuje [56, 59]. Výpočet hodnoty S_{dq} naznačuje vzorec (19).

$$S_{dq} = \sqrt{\frac{1}{A} \cdot \iint_A \left[\left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy} \quad (19)$$

Poměr rozvinuté mezifázové plochy omezené stupnicí povrchu Sdr

Anglický název: Developed interfacial area ratio of the scale-limited surface

Definice dle [55]: Poměr přírůstku mezifázové plochy omezené stupnice povrchu uvnitř určené plochy A v rozsahu určené plochy.

Parametr Sdr vyjadřuje procento dodatečné plochy povrchu, kterou vytváří textura, ve srovnání s rovnou plochou o stejné velikosti měřené oblasti. Používá se podobně jako Sdq pro dodatečné rozlišení plochy s podobnou hodnotou Sa. Pokud se zvýší prostorová různorodost a rozmanitost, Sdr se zvětšuje, přestože Sa může zůstat stejné. Parametr je vhodné předepsat na povrchy součástí, kde dochází k nanášení povlaků, či na součásti, kde přichází v úvahu možný výskyt adheze. Může také hrát roli při kvantifikaci povrchů, na které jsou aplikovány maziva a podobně [55, 56]. Výpočet hodnoty Sdq naznačuje vzorec (20).

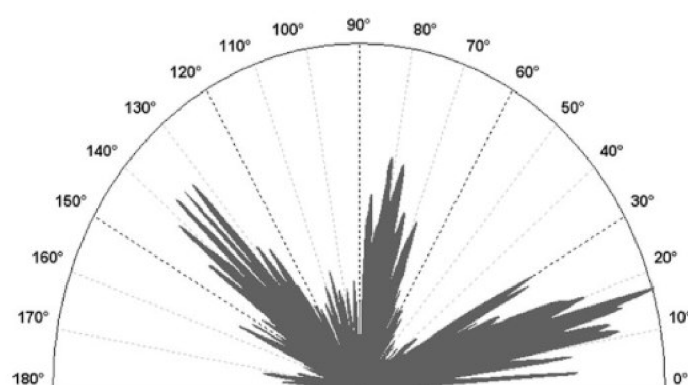
$$S_{dr} = \frac{1}{A} \cdot \left[\iint_A \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z(x,y)}{\partial y} \right)^2} - 1 \right) dx dy \right] \quad (20)$$

Směr textury omezené stupnice povrchu Std

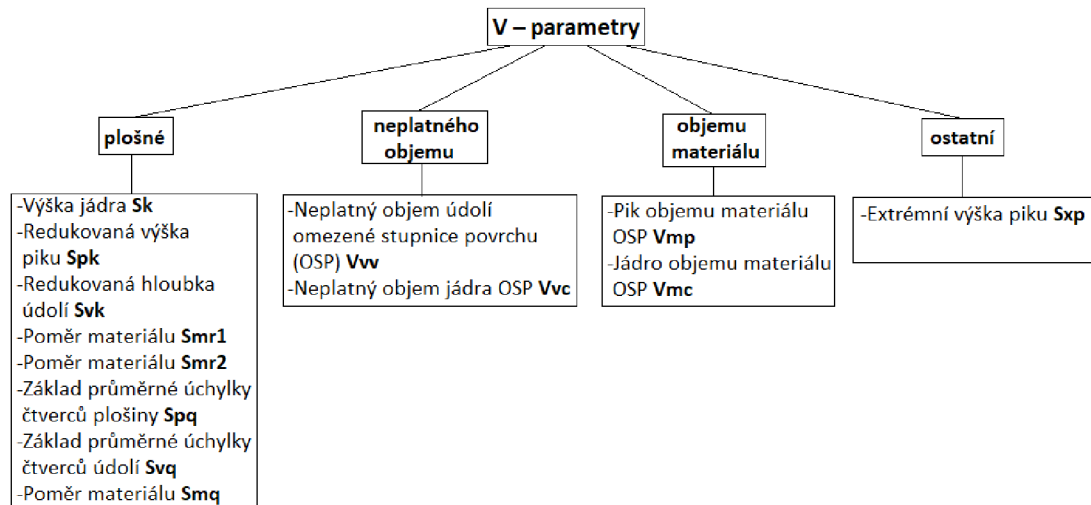
Anglický název: Texture direction of the scale-limited surface

Definice dle [55]: Úhel, s ohledem na specifikovaný směr θ absolutní minimální hodnoty úhlového spektra.

Parametr Std určuje míru směru dominantní vrstvy povrchu a je hodnocen pomocí Fourierova spektra povrchu. Fourierovo spektrum povrchu určuje energetický obsah každé prostorové frekvence na měřeném povrchu a po transformaci do polárních souřadnic zobrazuje významné směry textury povrchu. Polární souřadnice mají rozsah 0° – 180° a hodnota významného směru udaného ve stupních je rovna hodnotě Std [60]. Příklad Fourierova polárního spektra je zobrazen na obrázku 53.



Obr. 53 Fourierovo polární spektrum [60].



Obr. 54 V – parametry podle [2, 55].

V – parametry jsou parametry, které jsou na rozdíl od S – parametrů definovány díly vyhodnocení objemu materiálu textury povrchu. K této analýze slouží křivka nosného podílu definována normou ČSN EN ISO 13565-2 [53], avšak je z dvourozměrného provedení implementována do prostoru.

Výška jádra Sk

Anglický název: Core height

Definice dle [55]: Vzdálenost mezi nejvyšší a nejnižší úrovní povrchu jádra.

Výška jádra je svislá vzdálenost mezi průsečíky náhradní přímky a svislých os v 0% a 100% materiálového poměru a reprezentuje parametr Rk implementován do plošné analýzy. Tato část povrchu odpovídá ploše, která po počátečním opotřebením nese zátěž a je nejvíce v kontaktu s okolní stykovou plochou. Tento parametr bývá občas označován jako hrubost jádra [18]. Znázornění výšky jádra Sk je zobrazeno na obrázku 55.

Redukovaná výška piku Spk

Anglický název: Reduced peak height

Definice dle [55]: Průměrná výška vystupujících piků nad povrch jádra.

Jak je podle definice zřejmé, tento parametr vyjadřuje průměrnou výšku vrcholů nad jádrem drsnosti. Tyto vrcholy jsou opotřebené během počátečního cyklu chodu součásti [18]. Je vhodné, aby parametr Spk byl co nejmenší, neboť čím je hodnota větší, tím jsou větší odlomené vrcholy během chodu a tím vzniká větší riziko poškození součásti, či sestavy. Znázornění redukované výšky piku je zobrazeno na obrázku 55.

Redukovaná hloubka údolí SvK

Anglický název: Reduced valley height

Definice dle [55]: Průměrná hloubka vystupujících údolí pod povrch jádra.

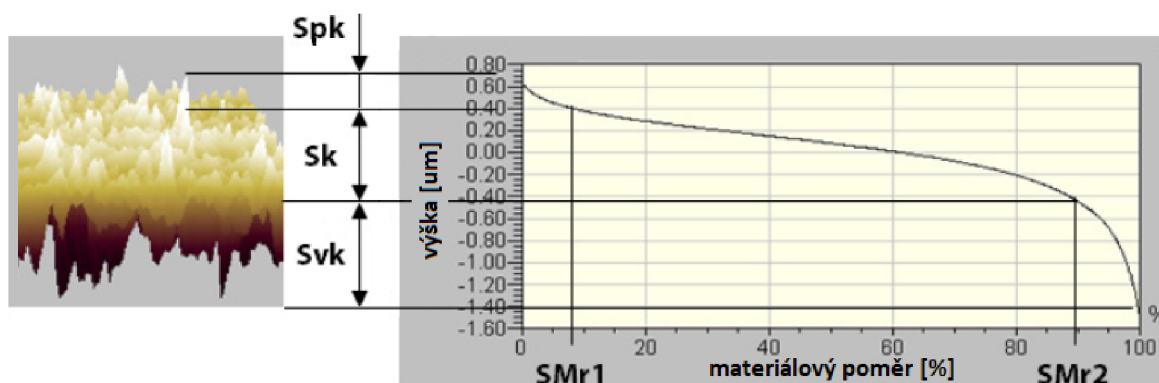
Tento parametr udává informaci o průměrné hloubce prohlubni pod povrchem jádra a tyto informace lze využít k analýze množství maziva, které je schopno přilnout a udržet se na povrchu součásti. Znázornění redukované hloubky údolí je zobrazeno na obrázku 55.

Poměr materiálu Smr1, Smr2

Anglický název: Material ratio

Definice dle [55]: Poměr plochy materiálu v průsečiku přímkou, která odděluje vystupující vrchy, resp. údolí od jádra povrchu k hodnocené ploše.

Hodnota Smr1 je zjištěna tak, že z průsečiku náhradní přímkou a svislé osy v 0 % materiálového objemu je vedena vodorovná úsečka do vzdálenosti průsečiku s křivkou nosného podílu. Velikost této úsečky udává hodnotu Smr1 vyjádřenou v procentech. Hodnota Smr2 je poté zjištěna obdobným způsobem. Znázornění materiálových poměrů Smr1 a Smr2 je zobrazeno na obrázku 55.



Obr. 55 Křivka nosného podílu s vyznačenými parametry Spk, Sk, Svk, Smr1, Smr2 [56].

Základ průměrné úchytky čtverců údolí Svq

Anglický název: Dale root mean square deviation

Definice dle [55]: Sklon lineární regrese provedený přes oblast údolí.

Základ průměrné úchytky čtverců plošiny Spq

Anglický název: Plateau root mean square deviation

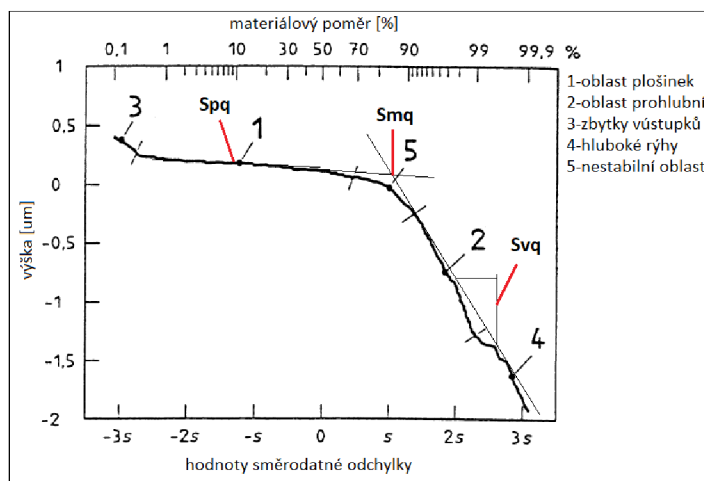
Definice dle [55]: Sklon lineární regrese provedený přes oblast plošiny.

Poměr materiálu Smq

Anglický název: Material ratio

Definice dle [55]: Poměr materiálu plochy v průsečiku plošina-údolí.

Parametry Svq, Spq a Smq jsou znázorněny na pravděpodobnostní křivce materiálu na obrázku 56.



Obr. 56 Pravděpodobnostní křivka materiálu podle [61].

Neplatný objem údolí omezené stupnice povrchu V_{vv}

Anglický název: Dale void volume of the scale-limited surface

Definice dle [55]: Objem údolí a poměru materiálu p.

Parametr V_{vv} představuje objem prostoru ohraničený texturou povrchu ve výšce odpovídající úrovni materiálového poměru p. Výchozí hodnota p bývá 80 %, ale tato hodnota může být měněna [62]. Znázornění neplatného objemu údolí omezené stupnice povrchu je zobrazeno na obrázku 57.

Neplatný objem jádra omezené stupnice povrchu V_{vc}

Anglický název: Core void volume of the scale-limited surface

Definice dle [55]: Rozdíl v neplatném objemu mezi poměrem materiálu p a q.

Neplatný objem jádra omezené stupnice povrchu představuje rozdíl mezi objemem prostoru odpovídající úrovni materiálového poměru p a objemem prostoru odpovídající úrovni materiálového poměru q. Standardní hodnota p a q bývá 10 % a 80 % [56, 62]. Znázornění neplatného objemu jádra omezené stupnice povrchu je zobrazeno na obrázku 57.

Parametry V_{vv} a V_{vc} udávají informace o prázdném objemu, který má povrch k dispozici v různých mezích materiálového poměru. Jinak řečeno, parametry jsou schopny říct informace o tom, kolik tekutiny by bylo schopno vyplnit dutiny v povrchu mezi hodnotami určitého materiálového poměru. Například hodnota $V_{v(20\%)} = 0,4 \mu\text{m}^3 / \mu\text{m}^2$ říká, že vrstva kapaliny o tloušťce 0,4 μm je schopna zaplnit dutiny prostoru povrchu do výšky o materiálové hodnotě rovné 20%. Tyto parametry jsou vhodné při zvažování možnosti nanášení povlaků, proudění tekutin, či zachycení nečistot. Je možné se rovněž setkat se specifikací parametru $V_{v(0\%)}$ což znamená, že je určen počáteční objem dutin textury[56].

Pik objemu materiálu omezené stupnicí povrchu V_{mp}

Anglický název: Peak material volume of the scale-limited surface

Definice dle [55]: Objem materiálu v p.

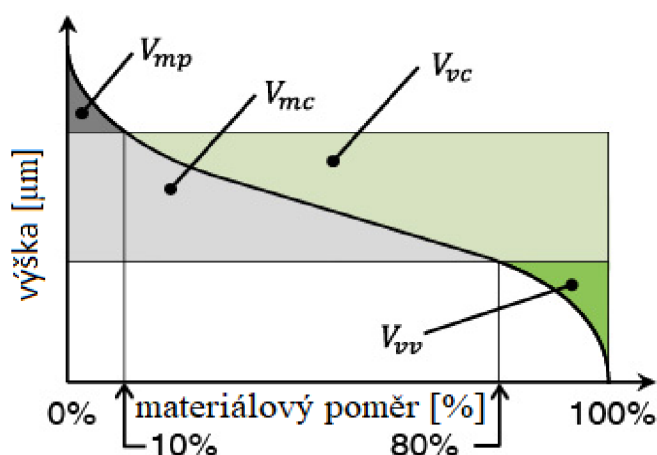
Jedná se o parametr představující objem materiálu odpovídající úrovni materiálového poměru p. Znázornění piku objemu materiálu omezené stupnicí povrchu je zobrazeno na obrázku 57.

Jádro objemu materiálu omezené stupnicí povrchu V_{mc}

Anglický název: Core material volume of the scale-limited surface

Definice dle [55]: Rozdíl v objemu materiálu mezi poměrem materiálu p a q.

Parametr V_{mc} představuje objem materiálu, který obsahuje textura vyskytující se mezi výškami objemového materiálu p a q. Výchozí hodnota pro tyto materiálové poměry je opět 10% a 80%, ale hodnoty je možno měnit [62]. Znázornění jádra objemu materiálu omezené stupnicí povrchu je zobrazeno na obrázku 57.



Obr. 57 Křivka nosného podílu s vyznačenými objemovými parametry [62].

Extrémní výška piku S_{xp}

Anglický název: Peak extreme height

Definice dle [55]: Rozdíl ve výšce mezi poměrem materiálu p a q.

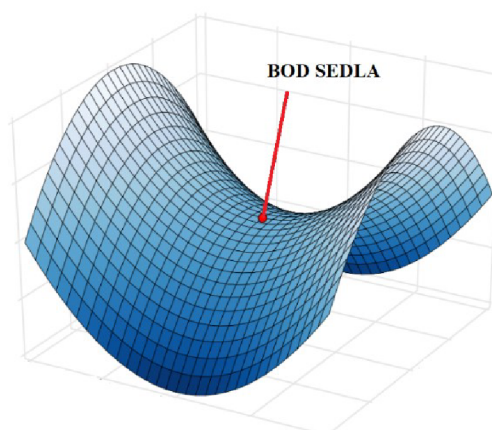
S_{xp} představuje rozdíl mezi vrcholy poté, co dojde k odstranění extrémů a průměrnou rovinou. Konkrétně to znamená to, že jde o rozdíl výšek odpovídajících hodnotám 2,5% a 50% materiálového poměru na grafu křivky nosného podílu [62].

2.2.4 Parametry prvku

Parametry prvku jsou chápány jako parametry analyzované z takových prvků, které jsou určeny na základě analýzy podmnožiny již definovaných topografických prvků z omezené stupnice povrchu [55].

Topografické prvky se dělí do tří skupin, a to do prvků bodových, čárových a prostorových [2]. Jednotlivé prvky jsou charakterizovány normou ČSN EN ISO 25 178-2 [55] a definice použité v následujícím odstavci jsou převzaty právě z této normy.

Mezi bodové topografické prvky patří pik, prohlubeň a bod sedla. Pik je definován jako bod na povrchu, který je vyšší, než všechny ostatní body v jeho okolí, prohlubeň je nejnižší bod na povrchu, který je nižší, než všechny ostatní body v jeho okolí a bod sedla je jeden bod příslušného sedla. Sedlo je znázorněno na obrázku 58. Mezi čárové topografické prvky je řazena přímka kurzu a hřebenová přímka. Přímka kurzu je definována jako křivka oddělující přilehlé vrchy a hřebenová přímka je křivka oddělující přilehlá údolí. K prostorovým prvkům je řazen vrch a údolí, přičemž vrch je definován jako oblast okolo piku taková, že směr všech maximálních cest končí v piku a údolí je oblast okolo prohlubně taková, že směr všech maximálních cest končí v prohlubni [2, 55].

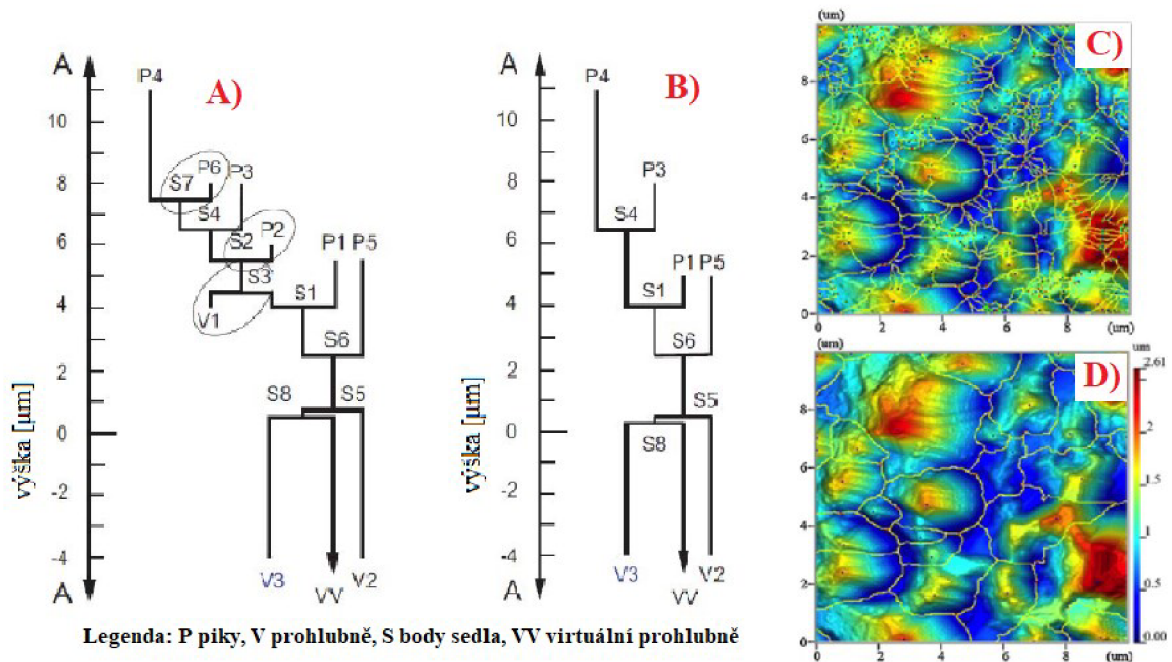


Obr. 58 Znázornění sedla a bodu sedla [63].

Pro analýzu pomocí parametrů prvku je třeba nejdříve provést segmentaci povrchu, tedy povrch rozdělit na jednotlivé části určené topografickými prvky. První způsob rozdělení byl navrhnut Maxvellem, který rozděloval povrch na vrchy a údolí. Toto dělení se však postupem času stalo nepraktické, neboť povrch byl po tomto dělení diferenciován na mnoho malých prvků, které nebyly pro analýzu příliš významné a daly by se sloučit do jednoho většího, významnějšího prvku. Proto byl zaveden pojem strom změny, který reprezentuje vztahy mezi kritickými body vrchů, údolí a obrysovými přímkami a poskytuje relevantní informace o povrchu. Výška je představována vertikálním směrem stromu. Jednotlivé obrysové přímky jsou reprezentovány body, které tvoří přímku stromu, jež se mění s výškou vrstevnice. Sloučením dvou, či více přímek do jedné vzniká bod sedla, přičemž ukončení přímky značí vrchy a údolí [19, 64]. Strom změny je zobrazen na obrázku 59a, 59b.

Pro relevantnější výsledky je třeba provést filtraci povrchu, kdy dojde k odstranění méně významných prvků. Je tedy potřeba, aby došlo k pročištění stromu změny. Toto pročištění se ve většině případů provádí Wolfovým pročištěním, které je založeno na

odstranění prohlubní a piků s nejmenšími výškovými rozdíly. Tuto hranici pročištění je nutné volit tak, aby výsledná síť segmentace nebyla příliš jemná, či příliš hrubá [2, 18]. Segmentace povrchu před a po provedení Wolfova pročištění je znázorněna na obrázku 59c a 59d.



Obr. 59 a) strom změny, b) strom změny po pročištění, c) původní segmentace, d) segmentace po 5% Wolfově pročištění podle [18, 65].

Po segmentaci povrchu a jeho pročištění je nyní možné analyzovat jednotlivé parametry povrchu.

Hustota piků Sp_d

Anglický název: Density of peaks

Definice dle [55]: Počet piků na jednotku plochy.

Aritmetický průměr zakřivení piků Sp_c

Anglický název: Arithmetic mean peak curvature

Definice dle [55]: Aritmetický průměr principu zakřivení piků uvnitř definované plochy.

Deset bodů výšky povrchu $S10_z$

Anglický název: Ten point height of surface

Definice dle [55]: Průměrná hodnota výšky pěti piků s největší globální výškou piků přidáno k průměrné hodnotě hloubky pěti prohlubní s největší globální hloubkou uvnitř určené plochy (upraveno).

Pět bodů výšky piku S5p

Anglický název: Five point peak height

Definice dle [55]: Průměrná hodnota výšky pěti piků s největší globální výškou piku uvnitř určené plochy.

Pět bodů hloubky prohlubně S5v

Anglický název: Five point pit height

Definice dle [55]: Průměrná hodnota výšky pěti prohlubní s největší globální hloubkou prohlubně uvnitř určené plochy.

Střední plocha údolí/vrchu Sda(c)/Sha(c)

Anglický název: Mean dale area/mean hill area

Definice: Průměrná plocha údolí/vrchů na dané výšce c.

Střední objem údolí/vrchu Sdv(c)/Shv(c)

Anglický název: Mean dale volume/mean hill volume

Definice: Průměrný objem údolí/vrchů od dané výšky c.

3. APLIKACE VYBRANÉ TECHNOLOGIE NA KVALITU OPRACOVÁNÍ

První část praktické části této práce se zabývá analýzou řezaných a tvářených závitů z hlediska jejich profilů. Bylo změřeno vzorků 8 profilů řezaných a 8 vzorků tvářených vnitřních metrických závitů M10 a poté jsou plochy jejich profilů porovnávány s plochou ideálního profilu metrického závitu téhož rozměru. Druhá část praktické části je zaměřena na analýzu tlakové síly a momentu síly při výrobě těchto závitů. Údaje o materiálech a řezných podmínkách při výrobě jednotlivých druhů závitů jsou uvedeny v tabulce 3.

Tab. 3 Materiály a řezné podmínky

| | ŘEZANÝ ZÁVIT | TVÁŘENÝ ZÁVIT |
|-----------------|-------------------|-------------------|
| Materiál: | C45 | 42CrMo4V |
| Pevnost mat.: | 600 Mpa | 1100 Mpa |
| Průměr díry: | 8,52 mm | 9,36 – 9,375 mm |
| Vzdálenost děr: | 11 mm | 13 mm |
| Rychlost: | 20 m/min | 10 m/min |
| Počet otáček: | 637 /min | 318 /min |
| Posuv: | 1,5 mm | 1,5 mm |
| Chlazení: | 10% bez obsahu Cl | 10% bez obsahu Cl |

3.1 Záznam a analýza dat průřezů

Nejdříve bylo naměřeno 8 vzorků profilů řezaných závitů a 8 vzorků profilů tvářených závitů viz tabulka 4.

Tab. 4 značení měřených závitů.

| ŘEZANÝ ZÁVIT | | | | | | | | TVÁŘENÝ ZÁVIT | | | | | | | |
|--------------|---|---|---|---|---|---|---|---------------|---|---|---|---|---|---|---|
| A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N | O | P |

3.1.1 Měřené vzorky

Jednotlivé měřené vzorky je možno vidět na obrázku 60 a 61.



Obr. 60 Měřené vzorky řezaných závitů.

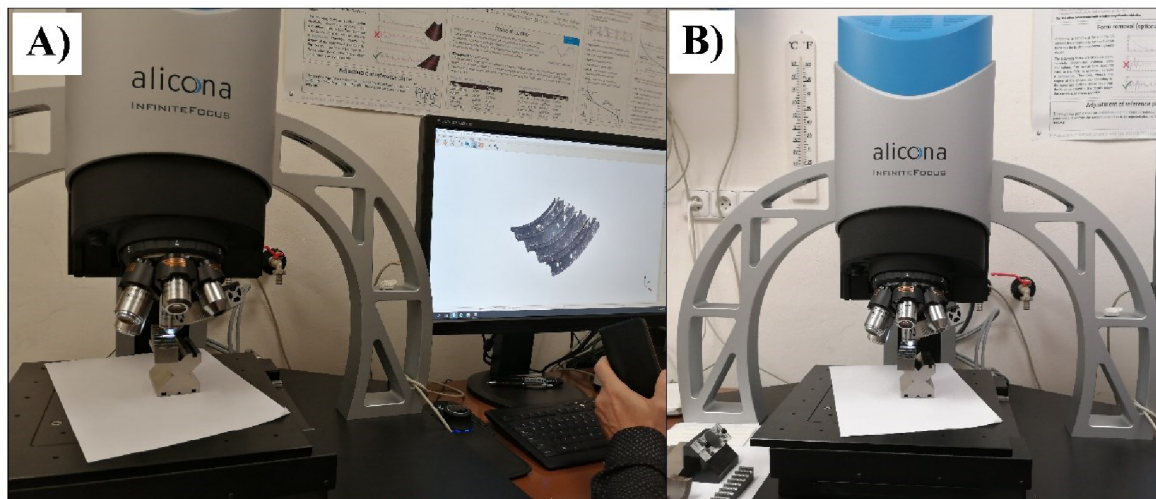


Obr. 61 Měřené vzorky tvářených závitů.

3.1.2 Přístroj použitý pro měření

Vzorky byly měřeny bezdotykovou metodou na přístroji IFM 5. generace, jejímž výrobcem je společnost Alicona. Princip měření je popsán v kapitole 1.4.4. Ukázka přístroje IFM, na kterém byly vzorky měřeny je na obrázku 62a, 62b.

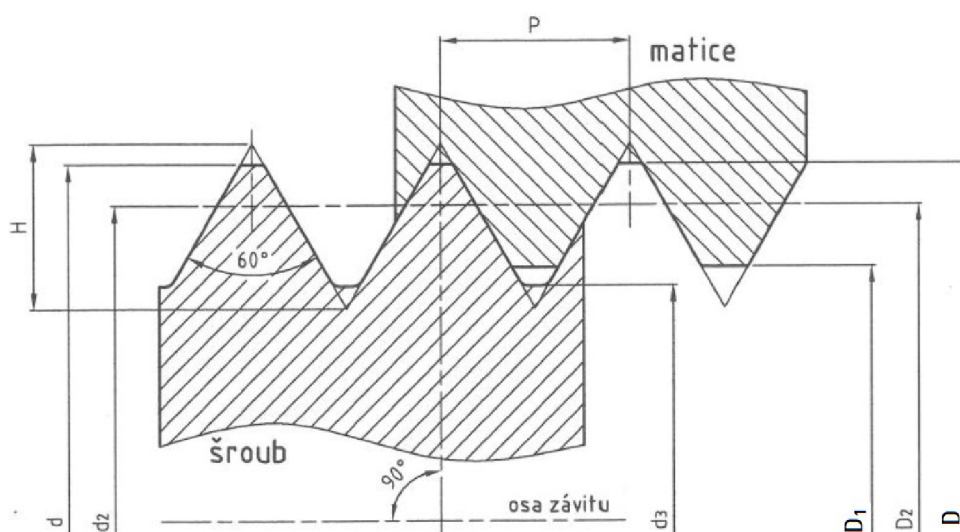
Při měření nastával problém s obtížným nasvícením vzorků, jelikož dna závitů nebyly dostatečně nasvíceny, a naopak hřbety závitů přesvíceny, tím pádem přístroj prováděl měření nepřesně. Při nastavování vzorku před měřením musel proto být kladen velký důraz na jeho vhodné nasvícení.



Obr. 62a) Alicona IFM 5G se softwarem pro vyhodnocení, b) Alicona IFM 5G – čelní pohled.

3.1.3 Normalizovaný metrický závit M10

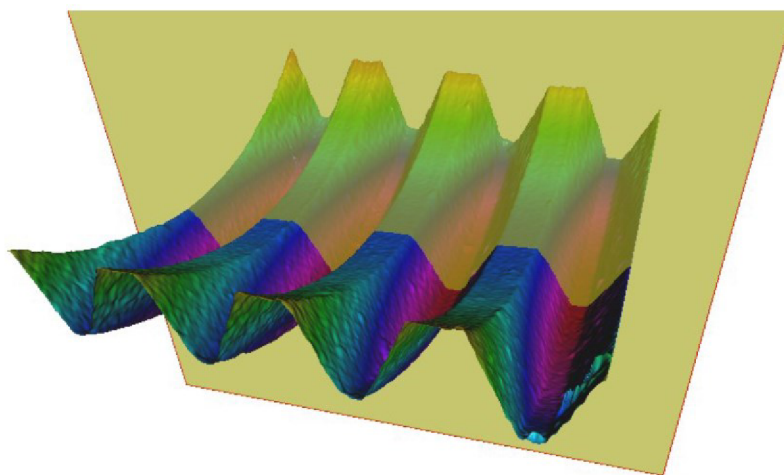
Vyhodnocené rozměry z naměřených vzorků budou porovnávány s teoretickými rozměry téhož druhu a rozměru závitů, tedy se základním profilem vnitřního závitů M10 s hrubou roztečí 1,5 mm. Rozměry metrických závitů a jejich toleranční pole jsou definovány normou ČSN ISO 261. Profil metrického závitů se zakótovanými základními rozměry je zobrazen na obrázku 63. Profil vnitřního závitů M10 je zobrazen na obrázku 63.



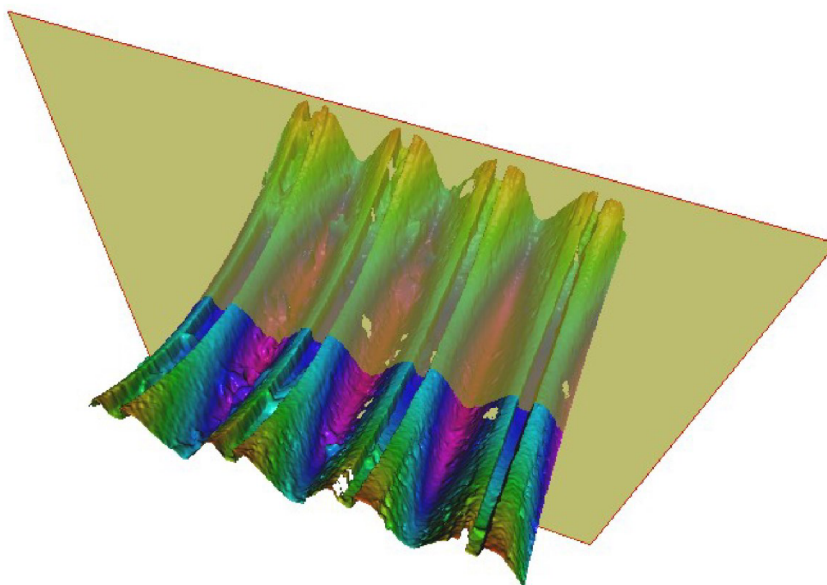
Obr. 63 Základní profil metrického závitů podle [66].

3.1.4 Zaznamenaná data

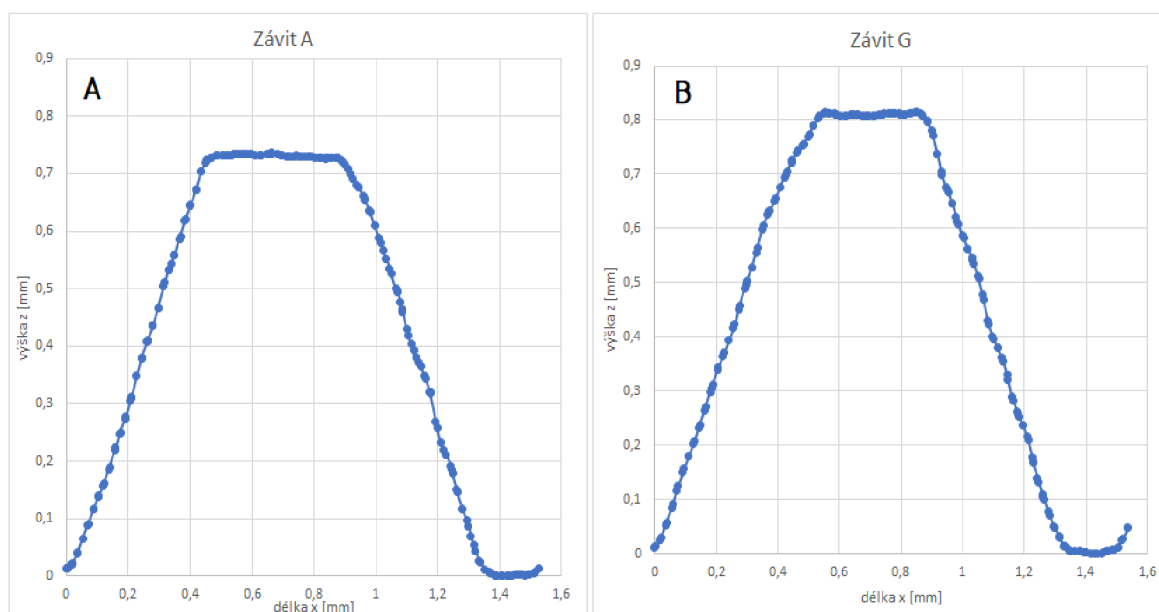
Po dokončení snímání měřícím přístrojem byl v přidruženém softwaru k dispozici 3D obraz reprezentující skutečný povrch měřeného závitu. Tímto povrchem byl poté veden řez, jehož rovina byla umístěna tak, aby řez zobrazil průřez závitu. Naměřenou plochu společně s rovinou řezu lze vidět na obrázcích 64 a 65. Po vytvoření řezu byla k dispozici data, která tvořila řez naměřeného obrazu, tedy 2D profil zkoumaných závitů. Tyto data bylo nutné dále upravit v dalším softwaru tak, aby bylo možné s grafy průřezů dále pracovat. Příklady naměřených grafů průřezu závitů je možno vidět na obrázcích 66a,b a 67a,b. Po každém měření byl k dispozici taktéž protokol tohoto měření. Příklady protokolů jsou součástí přílohy.



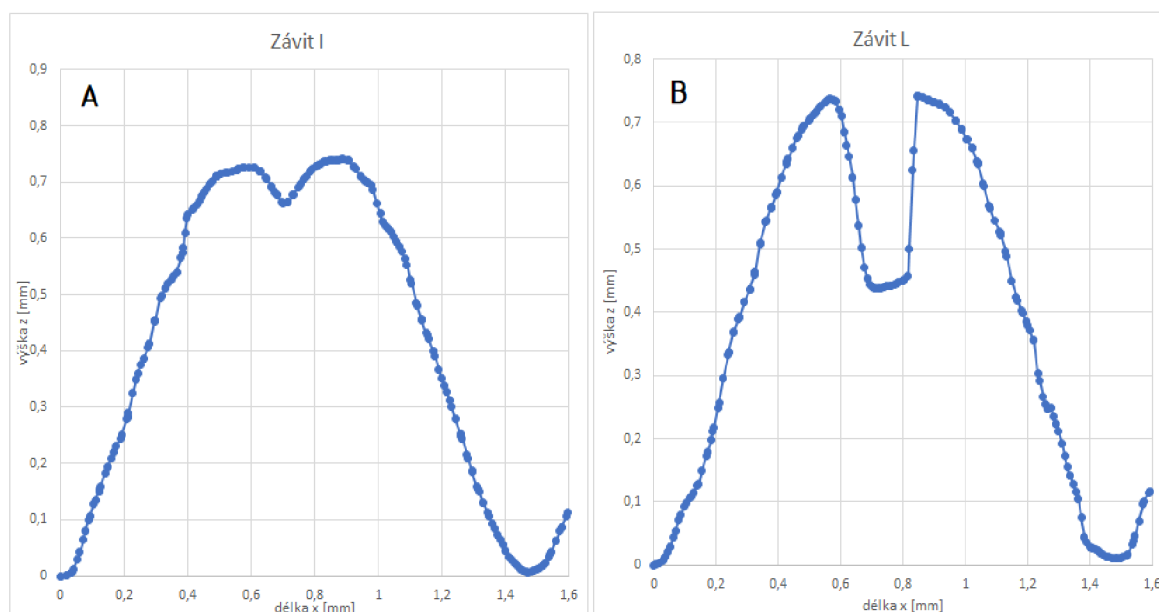
Obr. 64 Povrch řezaného závitu.



Obr. 65 Povrch tvářeného závitu.

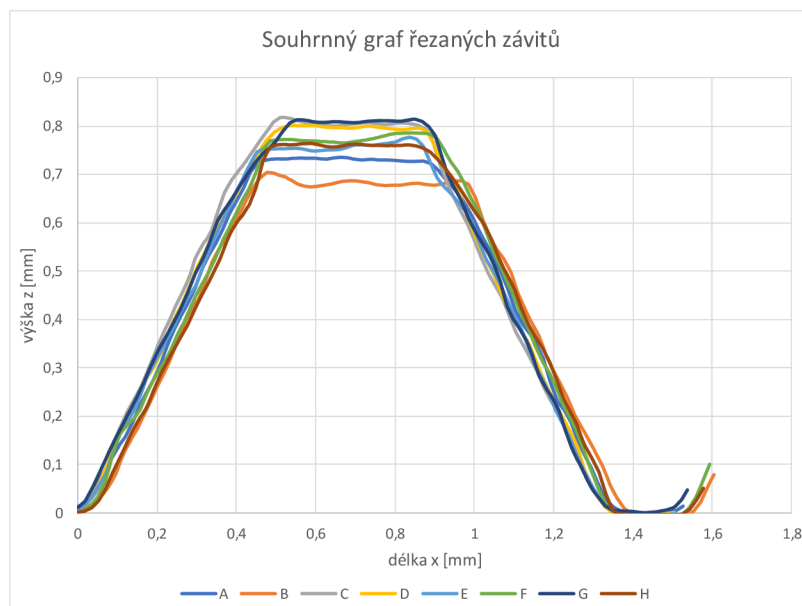


Obr. 66a,b Vybrané grafy průřezů řezaných závitů. a) závit A, b) závit G.

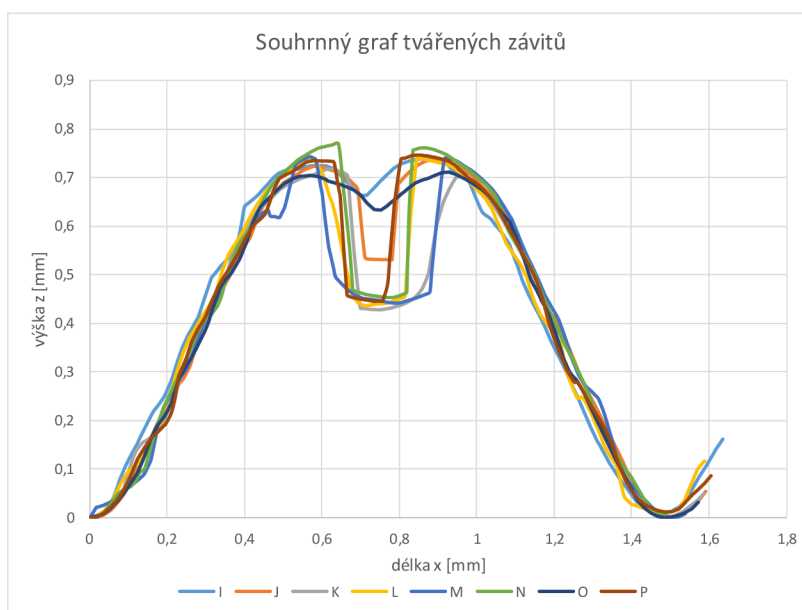


Obr. 67a,b Vybrané grafy průřezů tvářených závitů a) závit I, b) závit L.

Pro komplexnější vizuální zhodnocení tvarů závitů byly vyhotoveny souhrnné grafy, jež znázorňují křivky všech řezaných, resp. tvářených závitů v jednom grafu. Souhrnný graf všech měřených řezaných závitů je zobrazen na obrázku 68 a souhrnný graf všech měřených tvářených závitů na obrázku 69.



Obr. 68 Souhrnný graf měřených řezaných závitů.



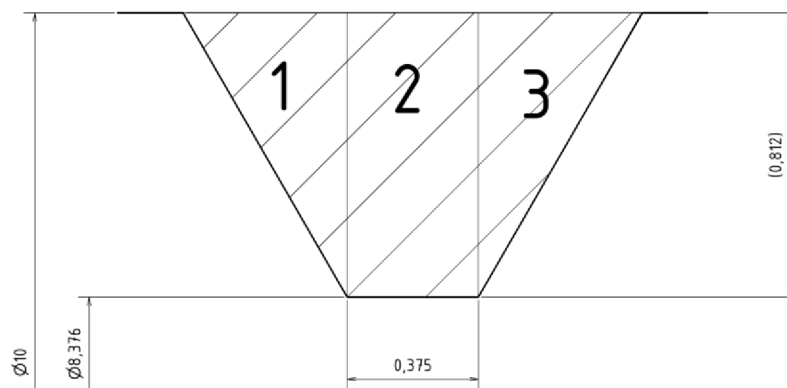
Obr. 69 Souhrnný graf měřených tvářených závitů.

Z grafu na obrázku 68 lze vidět, že zkoumané řezané závity nevykazují žádné známky extrémních vychylek, jak mezi sebou, tak od teoretického tvaru daného normou. V případě tvářených závitů na obrázku 69 lze vidět vzniklé prohlubně způsobené vedlejším efektem při tváření, které by se při porovnání s teoretickým tvarem neměly na závitech v ideálním případě vyskytovat a tyto prohlubně se navíc mezi sebou poměrně značně liší svými velikostmi. Analýza velikostí těchto prohlubní bude zhotovena níže v práci.

3.1.5 Analýza ploch průřezů

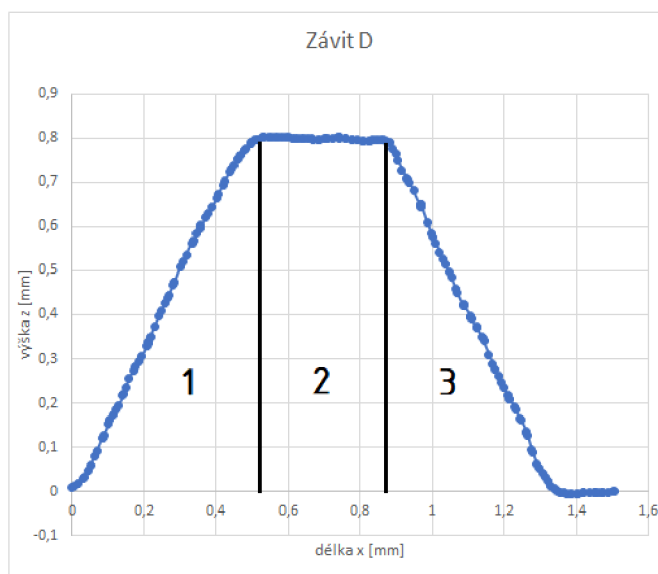
Jelikož z naměřených vzorků budou počítány plochy jejich průřezů, je třeba vypočítat plochu průřezu ideálního normovaného závitu, aby bylo možné hodnoty porovnávat.

Pro výpočet byl průřez na obrázku 70 rozdělen na 3 plochy, přičemž plocha 1 je stejná, jako plocha 3. Výsledná plocha průřezu byla spočítána jejich součtem. Obsah plochy 1 i plochy 3 je $0,1903 \text{ mm}^2$ a obsah plochy 2 je $0,3045 \text{ mm}^2$. Celková plocha průřezu je tedy $0,6851 \text{ mm}^2$.



Obr. 70 Profil vnitřního metrického závitu M10.

Výpočet obsahů ploch průřezů naměřených závitů probíhal tak, že celková plocha průřezu byla taktéž rozdělena na dílčí plochy omezené jednotlivými křivkami, které byly proloženy skrz naměřené hodnoty. Tyto funkce poté byly integrovány v daných mezích a celková plocha průřezu vznikla součtem těchto dílčích ploch zjištěných pomocí určitých integrálů. Obrázky 71 a 72 znázorňují rozdělení řezaného a tvářeného závitu na dílčí plochy, funkce omezující jednotlivé plochy jsou naznačeny v tabulkách 5 a 6 a poté je naznačen výpočet. U ostatních vzorků probíhal postup stejně.



Obr 71 Průřez řezaného závitu D.

Tab. 5 Funkce a meze křivek závitu D.

| Závit D | | | | | | |
|----------|---|----------|----------|----------|----------|-------|
| Plochy: | 1 | | 2 | | 3 | |
| Buňky: | 2 | 67 | 67 | 106 | 106 | 167 |
| x | 0 | 0,530972 | 0,530972 | 0,863867 | 0,863867 | 1,348 |
| Křivka 1 | $y = -4,1031x^3 + 2,7501x^2 + 1,2302x - 0,0028$ | | | | | |
| Křivka 2 | $y = 216,35x^5 - 750,53x^4 + 1034,1x^3 - 707,31x^2 + 240,1x - 31,554$ | | | | | |
| Křivka 3 | $y = 0,8844x^3 - 2,9063x^2 + 1,4175x + 1,1885$ | | | | | |

$$\int_0^{0,530} -4,1031x^3 + 2,7501x^2 + 1,2302x - 0,0028 dx =$$

$$= \left[\frac{-4,1031x^4}{4} + \frac{2,7501x^3}{3} + \frac{1,2302x^2}{2} - 0,0028x \right]_0^{0,530} = 22,08 - 0 = 0,2268 \text{ mm}^2$$

$$\int_{0,530}^{0,863} 216,35x^5 - 750,53x^4 + 1034,1x^3 + 707,31x^2 + 240,1x - 31,554 dx =$$

$$\left[\frac{216,35x^6}{6} - \frac{750,53x^5}{5} + \frac{1034,1x^4}{4} - \frac{707,31x^3}{3} + \frac{240,1x^2}{2} - 31,554x \right]_{0,530}^{0,863} =$$

$$= -2,91865 - (-3,18159) = 0,2629 \text{ mm}^2$$

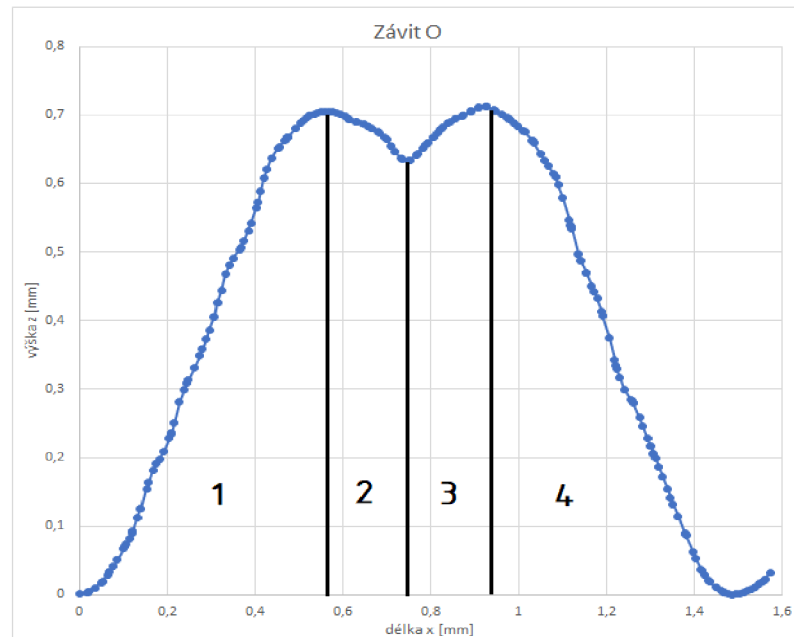
$$\int_{0,863}^{1,348} 0,8844x^3 - 2,9063x^2 + 1,4175x + 1,1885 dx =$$

$$= \left[\frac{0,8844x^4}{4} - \frac{2,9063x^3}{3} + \frac{1,4175x^2}{2} + 1,1885x \right]_{0,863}^{1,348} = 1,247 - 1,053 = 0,193 \text{ mm}^2$$

Výsledná plocha závitu D:

$$0,2268 + 0,2629 + 0,1935 = 0,6832 \text{ mm}^2$$

Vzhledem k povaze této práce není nutné popisovat proces výroby závitu řezáním, či tvářením. Nicméně co se výsledného průřezu týče, u tvářeného závitu se projevuje zásadní rozdíl, neboť u těchto vzniká na vrchu závitu prohlubeň, která je způsobena nedokonalým protečením materiálu do vrcholů. Tato prohlubeň může mít v případě příliš velkých rozměrů za následek způsobení mezního stavu a zhroucení závitu při zatížení, a proto není vhodné tento jev podceňovat. Na obrázku 72 je znázorněn jeden z naměřených tvářených závitů.



Obr. 72 Průřez tvářeného závitu O.

Tab. 6 Funkce a meze křivek závitu O.

| | | Závít O | | | | | | | |
|-----------|--|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Plochy: | | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | |
| Buňky: | | 2 | 76 | 76 | 93 | 93 | 112 | 112 | 183 |
| x: | | 0 | 0,613 | 0,613 | 0,753 | 0,753 | 0,928 | 0,928 | 1,486 |
| Křivka 1: | | $y = -7,1202x^3 + 5,8206x^2 + 0,2474x - 0,0054$ | | | | | | | |
| Křivka 2: | | $y = 1143,8x^4 - 3096x^3 + 3134,6x^2 - 1407,4x + 237,22$ | | | | | | | |
| Křivka 3: | | $y = -4,5134x^3 + 9,4688x^2 - 5,8618x + 1,6041$ | | | | | | | |
| Křivka 4: | | $y = 7,722x^3 - 28,319x^2 + 32,733x - 11,449$ | | | | | | | |

$$\int_0^{0,693} -7,1202x^3 + 5,8206x^2 + 0,2474x - 0,0054 dx =$$

$$= \left[\frac{-7,1202x^4}{4} + \frac{5,8206x^3}{3} + \frac{0,2474x^2}{2} - 0,0054x \right]_0^{0,693} = 0,2387 - 0 = 0,2387 \text{ mm}^2$$

$$\int_0^{0,693} 1143,8x^4 - 3096x^3 + 3134,6x^2 - 1407,4x + 237,22 dx =$$

$$= \left[\frac{1143,8x^5}{5} - \frac{3096x^4}{4} + \frac{3134,6x^3}{3} - \frac{1407,4x^2}{2} + 237,22x \right]_{0,613}^{0,753} =$$

$$= 32,27625 - 32,17866 = 0,0975 \text{ mm}^2$$

$$\int_{0,753}^{0,928} -4,5134x^3 + 9,4688x^2 - 5,8618x - 1,6041 dx =$$

$$= \left[\frac{-4,5134x^4}{4} + \frac{9,4688x^3}{3} - \frac{5,8618x^2}{2} - 1,6041x \right]_{0,753}^{0,928} = 0,1192 \text{ mm}^2$$

$$\int_{0,928}^{1,486} 7,722x^3 - 28,319x^2 + 32,733x - 11,449 dx =$$

$$= \left[\frac{7,722x^4}{4} - \frac{28,319x^3}{3} + \frac{32,733x^2}{2} - 11,449x \right]_{0,928}^{1,486} = 0,2078 \text{ mm}^2$$

Výsledná plocha závitu O:

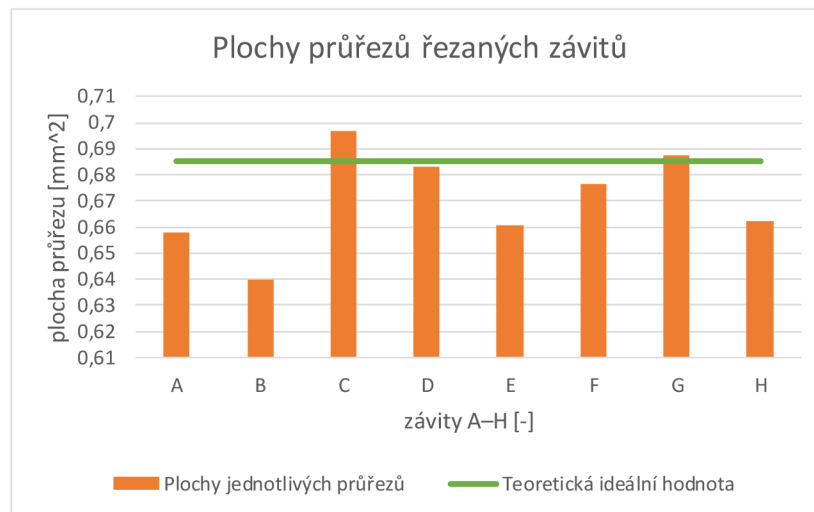
$$0,2387 + 0,0975 + 0,1192 + 0,2078 = 0,6632 \text{ mm}^2$$

Podle výše uvedeného postupu byly postupně vypočítány obsahy ploch průřezů všech měřených závitů. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 7. Jednotlivé funkce křivek a jejich meze, podle kterých byly plochy počítány jsou k dispozici v příloze práce.

Tab. 7 Výsledné obsahy ploch průřezů jednotlivých závitů.

| Řezané: | Plocha průřezu [mm ²]: | Tvářené: | Plocha průřezu [mm ²]: |
|---------|------------------------------------|----------|------------------------------------|
| A | 0,658 | I | 0,6783 |
| B | 0,64 | J | 0,6616 |
| C | 0,6969 | K | 0,5976 |
| D | 0,6832 | L | 0,6306 |
| E | 0,6608 | M | 0,6068 |
| F | 0,6767 | N | 0,6032 |
| G | 0,6877 | O | 0,6632 |
| H | 0,6622 | P | 0,6006 |

Grafy velikostí jednotlivých ploch řezaných a tvářených závitů v porovnání se zvažovanou teoretickou ideální hodnotou plochy jsou zobrazeny na obrázcích 73 a 74.



Obr. 73 Plochy průřezů řezaných závitů A–H.



Obr. 74 Plochy průřezů tvářených závitů I–P.

Z Grafů lze vidět, že obecně jsou plochy průřezů jak tvářených, tak řezaných závitů ve většině případů menší, než je jejich teoretická ideální hodnota, přičemž plochy průřezů tvářených závitů jsou menší o něco významněji, což je způsobeno již zmiňovanou prohlubní na hřbetu závitů. Všechny tyto hodnoty jsou však zcela přípustné v rámci tolerance s třídou přesnosti 6H, neboť nejmenší přípustná plocha průřezu metrického závitů M10 je 0,558 mm².

Odchytky obsahů průřezů jednotlivých závitů od teoretické ideální hodnoty znázorňují grafy na obrázcích 75 a 76.



Obr. 75 Odchylka obsahů průřezů řezaných závitů A–H.

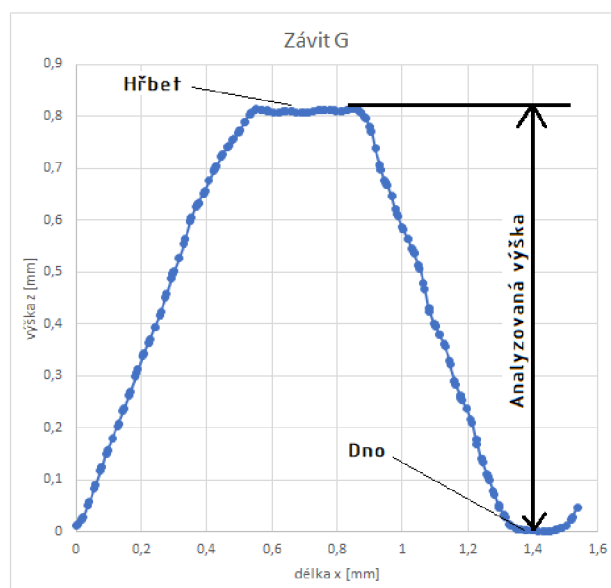


Obr. 76 Odchylka obsahů průřezů tvářených závitů I–P.

Z grafů na obrázcích 75 a 76 lze jasně vidět, že větší hodnotu obsahu, než je teoretická ideální hodnota má pouze závit C a G, přičemž tyto závity jsou větší pouze minimálně. Ostatní hodnoty řezaných závitů a všechny hodnoty tvářených závitů jsou oproti ideálu menší.

3.1.6 Analýza výšky závitu

Další parametr, který byl na naměřených průřezích závitů analyzován a porovnávána byla jeho výška. Touto výškou se rozumí kolmá výška závitu od jeho dna po hřbet. Viz obrázek 77. Výška závitů byla porovnána mezi sebou v rámci řezaných a tvářených závitů a také porovnána s teoretickou ideální hodnotou.

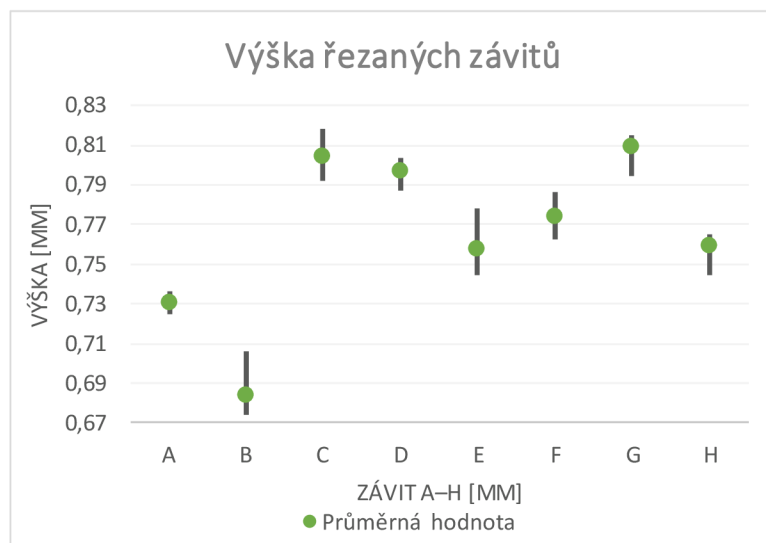


Obr. 77 Znárodnění analyzované výšky závitů.

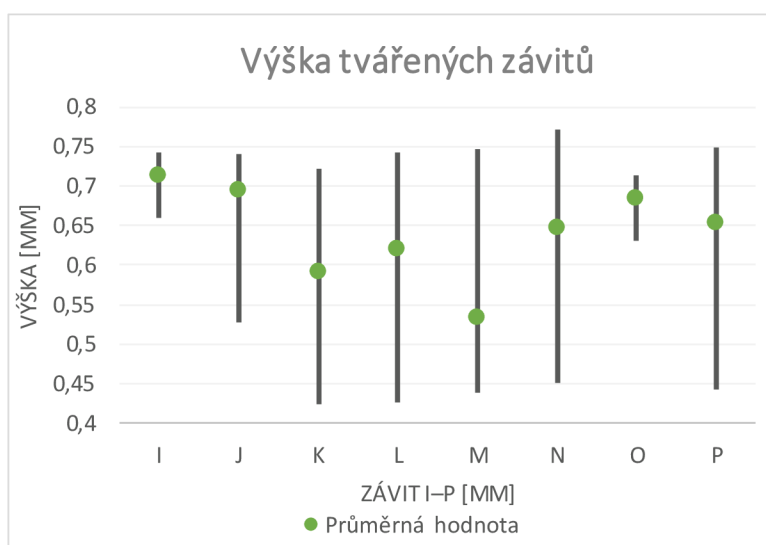
Jak u řezaných, tak u tvářených závitů byla zjišťována jejich maximální, minimální a průměrná výška. Zjištěné hodnoty zobrazuje tabulka 8, graf průměrné výšky s její maximální a minimální hodnotou u řezaných závitů zobrazuje graf na obrázku 78, u tvářených závitů poté graf na obrázku 79.

Tab. 8 Naměřené hodnoty [mm].

| Výška závitů | | | | | | | |
|--------------|---------|---------|--------|---------------|---------|---------|--------|
| řezané závit | | | | tvářené závit | | | |
| značení | maximum | minimum | průměr | značení | maximum | minimum | průměr |
| A | 0,735 | 0,726 | 0,731 | I | 0,74 | 0,662 | 0,712 |
| B | 0,705 | 0,675 | 0,684 | J | 0,737 | 0,53 | 0,694 |
| C | 0,817 | 0,793 | 0,805 | K | 0,718 | 0,428 | 0,59 |
| D | 0,802 | 0,788 | 0,797 | L | 0,74 | 0,43 | 0,62 |
| E | 0,777 | 0,746 | 0,758 | M | 0,743 | 0,441 | 0,532 |
| F | 0,785 | 0,764 | 0,774 | N | 0,769 | 0,453 | 0,647 |
| G | 0,814 | 0,796 | 0,81 | O | 0,711 | 0,633 | 0,684 |
| H | 0,764 | 0,746 | 0,76 | P | 0,746 | 0,445 | 0,653 |

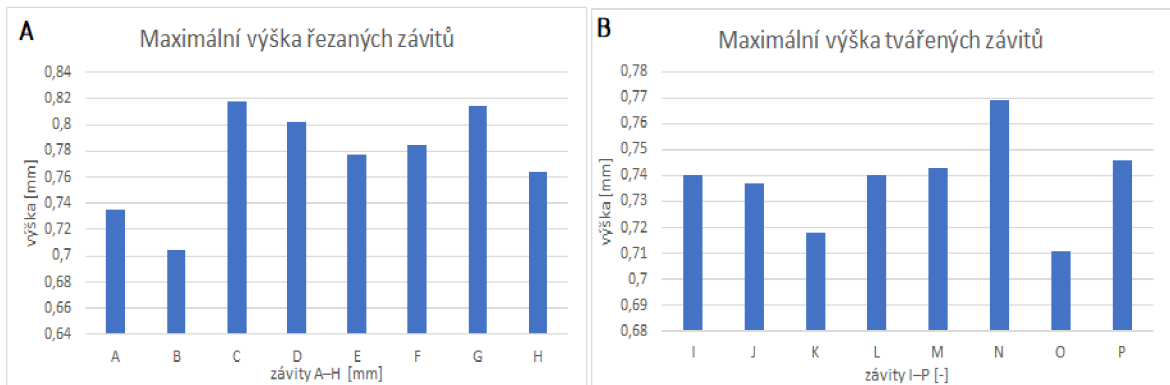


Obr. 78 Graf průměrných, minimálních a maximálních výšek řezaných závitů.

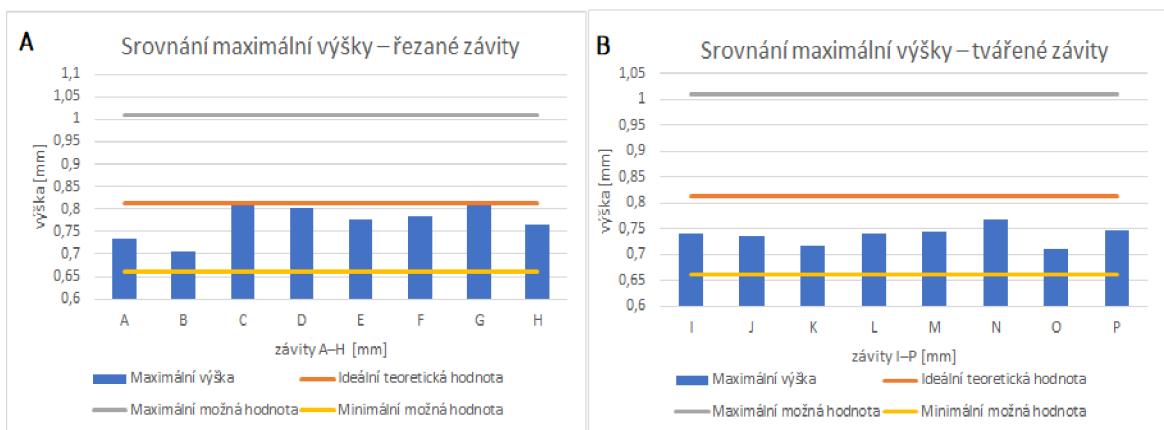


Obr. 79 Graf průměrných, minimálních a maximálních výšek tvářených závitů.

U výšek řezaných závitů jde vidět, že rozptyl hodnot se pohybuje okolo dvou setin milimetru, jelikož hřbet řezaného závitu má téměř konstantní výšku po celé své délce, kdežto u výšek tvářených závitů je rozptyl daleko větší, konkrétně se pohybuje až okolo tří desetín milimetru. Velké výchylky jsou zde z důvodu přítomnosti zmiňovaných prohlubní, které jsou poměrně velké. Proto je průměrná výška u tvářených závitů ne tolik relevantním údajem. Údaj, který by mohl mít větší informační hodnotu je maximální výška těchto závitů, která je zobrazena na grafech 80a, 80b. Porovnání maximálních výšek s ideální teoretickou hodnotou, maximální teoretickou hodnotou a minimální teoretickou hodnotou lze vidět na obrázcích 81a, 81b.

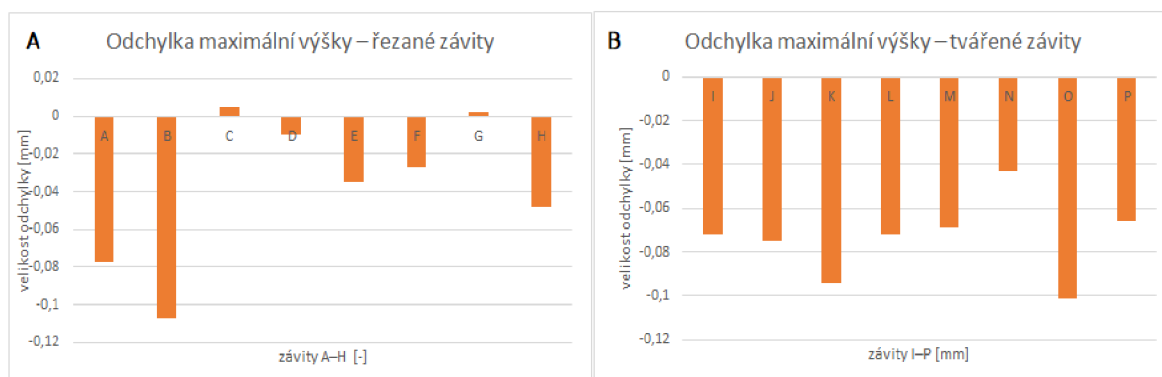


Obr. 80 Maximální výška a) řezaných závitů, b) tvářených závitů.



Obr. 81 Srovnání výšek s teoretickými hodnotami a) řezané závity, b) tvářené závity.

Z grafů výše lze vypočítat, že hodnoty maximálních výšek jak u řezaných, tak u tvářených závitů jsou spíše menší než jejich teoretická ideální hodnota, avšak ani jeden není menší než minimální možná hodnota. Minimální a maximální možná hodnota byla určena z mezních hodnot malého a velkého průměru vnitřního metrického závitu M10 x 1,5. Z těchto informací tedy plyne, že ani jeden závit nespadá mimo toleranci v rámci toleranční třídy 6H. Je vhodné podotknout, že žádný ze závitů neprokazoval známky extrémní hodnoty výšky oproti okolním hodnotám výšky na tomto závitu, jež by mohly hodnotu maximální výšky výrazněji zkreslit. Grafy průřezů všech závitů jsou k dispozici jako součást přílohy. Grafy na obrázcích 82a, 82b znázorňují odchylky maximálních výšek měřených závitů od jejich ideální teoretické hodnoty.



Obr.82 Odchylka maximální výšky a) řezaných závitů, b) tvářených závitů.

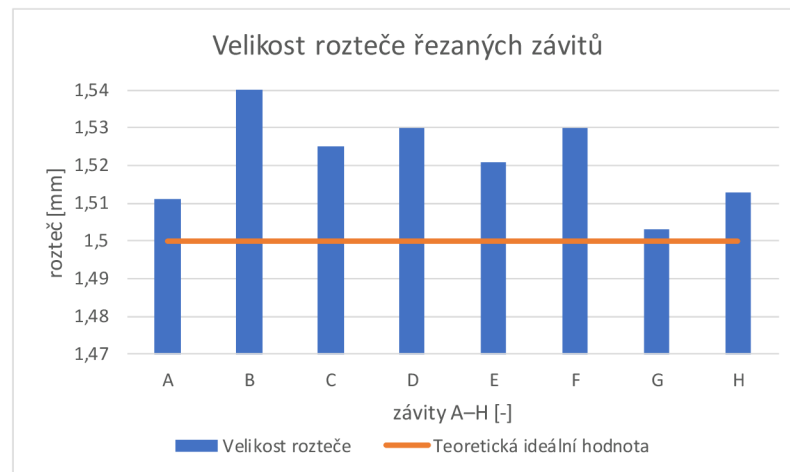
Z grafů 82a, 82b lze vypočítat, že u řezaných závitů je maximální záporná velikost odchyly zaznamenána u závitů B a to 0,107 mm, největší kladná odchyly u závitů C s velikostí 0,005 mm. U tvářených závitů je maximální záporná velikost odchyly u závitů O a to 0,101, přičemž všechny ostatní odchyly jsou taktéž záporné.

3.1.7 Analýza roztečí

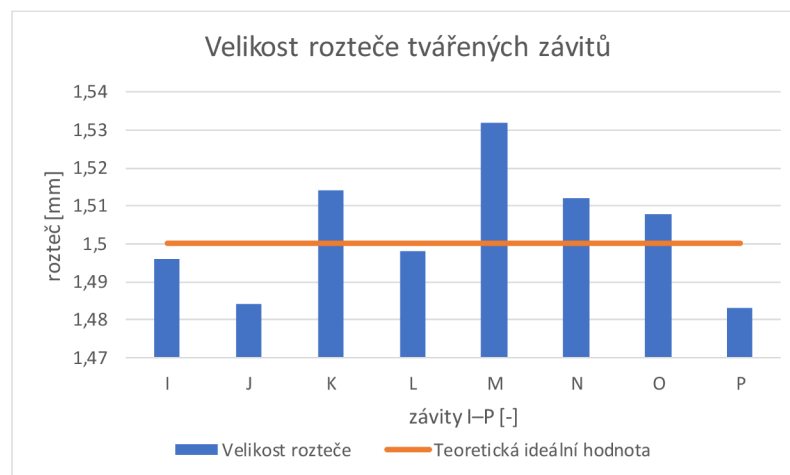
V této kapitole jsou analyzovány velikosti roztečí, jež byly odečteny z grafů průřezů závitů. Zároveň jsou tyto hodnoty srovnány s ideální teoretickou hodnotou, tedy 1,5 mm. Odečtené hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 9. Grafické znázornění těchto hodnot je zobrazeno na obrázcích 83 a 84.

Tab. 9 Naměřené hodnoty [mm].

| Velikost roztečí | | | |
|------------------|--------|---------|--------|
| řezané | | tvářené | |
| značení | rozteč | značení | rozteč |
| A | 1,511 | I | 1,496 |
| B | 1,544 | J | 1,484 |
| C | 1,525 | K | 1,514 |
| D | 1,53 | L | 1,498 |
| E | 1,521 | M | 1,532 |
| F | 1,53 | N | 1,512 |
| G | 1,503 | O | 1,508 |
| H | 1,513 | P | 1,483 |



Obr 83 Rozteče řezaných závitů.



Obr. 84 Rozteče tvářených závitů.

Z grafů 83 a 84 je patrné, že u měřených řezaných závitů jsou rozteče u všech vzorků větší, než je jejich teoretická ideální hodnota. Průměrná velikost odchylky je 0,022 mm. Kdežto u měřených tvářených závitů lze vidět, že rozteče u vzorků nabývají oproti teoretické ideální hodnotě hodnot jak větších, tak menších, avšak odchylky od této hodnoty jsou menší, než u řezaných závitů a rozteč u závitů tvářených je tedy přesnější, přičemž průměrná velikost odchylky je 0,013 mm.

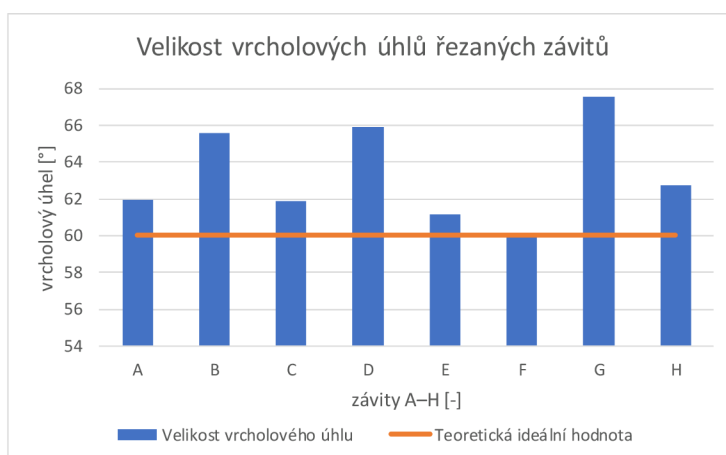
3.1.8 Analýza vrcholových úhlů

U každého závitu byla také změřena velikost vrcholových úhlů. Úhly byly měřeny jak početně z grafů průřezů závitů, tak odečteny graficky a tyto hodnoty porovnávány. Při početním měření úhlu byla spočítána polovina vrcholového úhlu pro každý bod na stoupající, resp. klesající křivce na začátku, resp. konci průřezu závitu a pro tyto hodnoty byl pro každou z částí vytvořen průměr a průměrné hodnoty sečteny. Výsledky však nemusí být přesné z důvodu občasné výraznější výchylny bodu na křivkách, které se zde mohou vyskytovat buď z důvodu mírné vady na závitu, či z důvodu nedokonalého nasvícení vzorku při měření

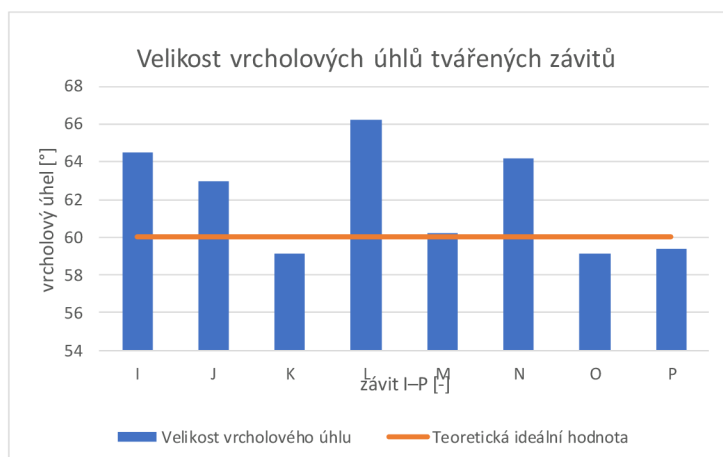
a tyto hodnoty poté ovlivňovaly výslednou velikost úhlu. Pro jistotu výsledků by bylo třeba závity opětovně změřit a výsledky porovnat. Naměřené hodnoty vrcholových úhlů jsou zaznamenány v tabulce 10. Grafické znázornění vrcholových úhlů je zobrazeno na obrázcích 85 a 86.

Tab. 10 Naměřené hodnoty.

| Vrcholové úhly | | | |
|----------------|--------------------|---------------|--------------------|
| řezaný závit | | tvářený závit | |
| značení | vrcholový úhel [°] | značení | vrcholový úhel [°] |
| A | 61,92 | I | 64,51 |
| B | 65,55 | J | 62,99 |
| C | 61,88 | K | 59,13 |
| D | 65,89 | L | 66,22 |
| E | 61,15 | M | 60,24 |
| F | 59,93 | N | 64,18 |
| G | 67,57 | O | 59,14 |
| H | 62,72 | P | 59,37 |



Obr. 85 Velikost vrcholových úhlů řezaných závitů.



Obr. 86 Velikost vrcholových úhlů tvářených závitů.

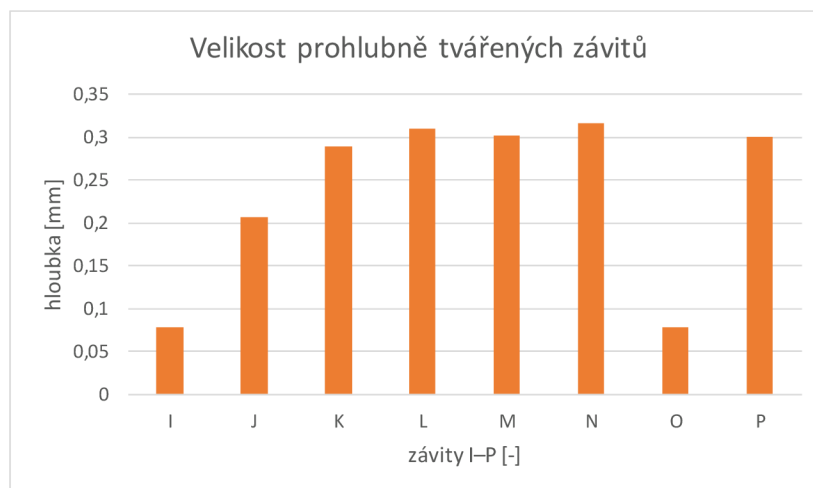
Vrcholové úhly u měřených vzorků řezaných závitů mají všechny větší velikost než teoretická ideální hodnota s tím, že průměrná velikost vrcholového úhlu u této skupiny vzorků je $63,32^\circ$ a průměrná velikost odchyly je $3,34^\circ$. Měřené vzorky tvářených závitů vykazují ve třech případech hodnoty menší, než je teoretická ideální hodnota, avšak celkově se vrcholový úhel teoretické hodnotě přibližuje více než u závitů řezaných, jelikož průměrná velikost vrcholového úhlu je zde $61,97^\circ$ a průměrná velikost odchyly je $2,56^\circ$.

3.1.9 Analýza prohlubní tvářených závitů

V tomto kroku byla věnována pozornost prohlubním vytvořených na hřbetech tvářených závitů. Konkrétně byla měřena a porovnávána jejich hloubka. Těmto prohlubním je třeba věnovat zvýšenou pozornost, neboť patří k nežádoucím efektům při výrobě tvářených závitů a v případě velkých prohlubní by mohlo hrozit až zborcení závitu při jeho zátěži. Velikosti naměřených hodnot jsou zaznamenány v tabulce 11. Graf hloubky prohlubně jednotlivých vzorků tvářených závitů je zobrazen na obrázku 87.

Tab. 11 Naměřené hodnoty [mm].

| Tvářené závity | | | | | | | | |
|----------------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| Značení: | I | J | K | L | M | N | O | P |
| Hloubka: | 0,078 | 0,207 | 0,29 | 0,31 | 0,302 | 0,316 | 0,078 | 0,301 |



Obr. 87 Velikost prohlubně tvářených závitů.

3.2 Energetická analýza

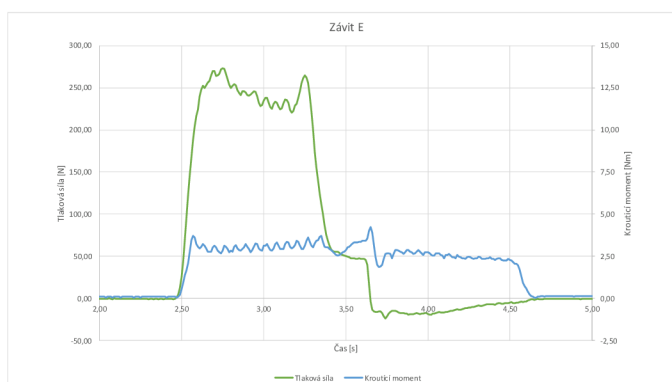
V druhé kapitole praktické části bude věnována pozornost analýze kroutícího momentu a tlakové síly vznikajících při výrobě závitů. Z každé skupiny, tedy z řezaných a tvářených závitů byly vybrány 4, u kterých byly tyto hodnoty měřeny. Každý závit byl vyráběn jiným závitníkem z rychlořezné oceli. Tabulka 12 udává přehled vybraných závitů a zobrazuje informace o druhu povlaku závitníků.

Tab. 12 Testované závity a údaje o závitnicích.

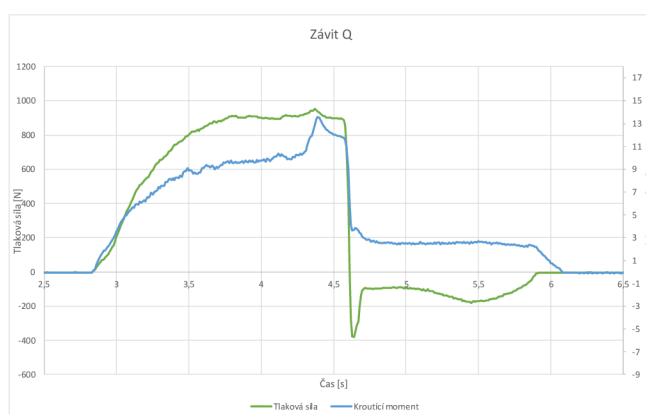
| řezané závity | | | | |
|--------------------|------------|---|---|--|
| značení závitu: | A | B | C | E |
| značení závitníku: | A | C | E | I |
| povlak závitníku: | TiN 3,5 um | AlTiN 2 um | TiN+TiCN 0,9 um TiCC 0,6 um TiCC2 0,65 um | TiN+TiCN 0,9 um TiCC 0,6 um TiCC2 1 um |
| tvářené závity | | | | |
| značení závitu: | J | K | M | O |
| značení závitníku: | O | Q | U | Y |
| povlak závitníku: | AlTiN 2 um | TiN+TiCN 0,9 um TiCC 0,6 um TiCC2 0,65 um | TiN+TiCN 1,3 um TiCC 0,5 um TiCC2 0,7 um | TiN+TiCN 1,7 um TiCC 0,9 um TiCC2 0,6 um |

3.2.1 Zaznamenaná data

Při výrobě byl pod materiál, do níž byl závit vytvářen umístěn dynamometr a pomocí tohoto dynamometru byla zaznamenána data velikosti točícího momentu a tlakové síly, vytvářené silou závitníku působícího na materiál. Tyto data bylo nutné zpracovat pomocí softwaru a výsledkem byly grafy těchto dvou veličin v závislosti na čase, přičemž jeden časový krok byl setina sekundy. Příklady těchto grafů zobrazují obrázky 88 a 89. Grafy všech osmi závitů jsou k dispozici v příloze.



Obr. 88 Tlaková síla a kroučící moment řezaného závitu E.



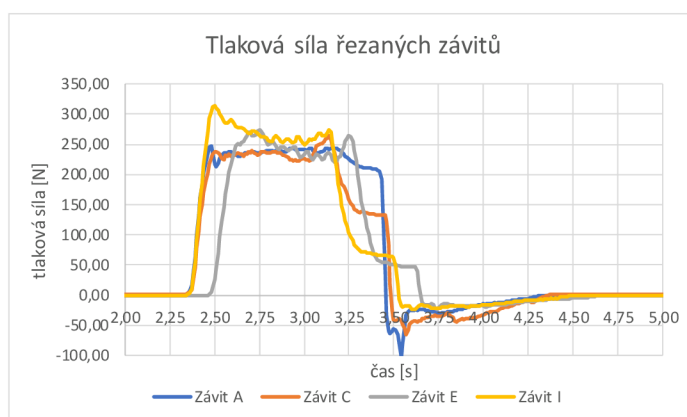
Obr. 89 Tlaková síla a kroučící moment tvářeného závitu Q.

3.2.2 Analýza tlakových sil

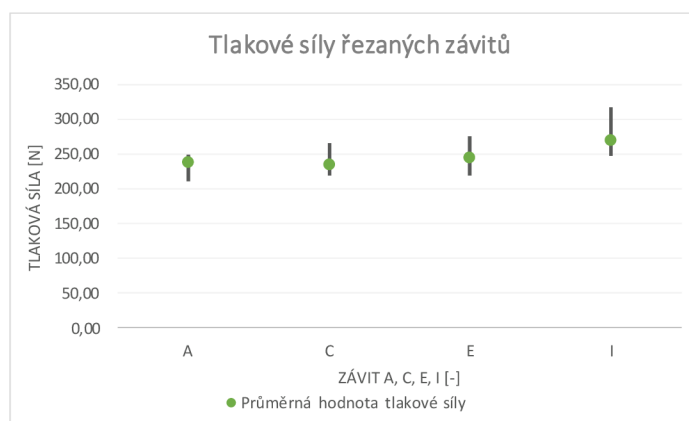
V této části budou porovnány tlakové síly, kterými působí závitník na vytvářený závit u řezaných závitů, u tvářených závitů a poté budou tyto síly porovnány mezi sebou. Hodnoty tlakových sil budou analyzovány v oblasti, kdy závitník koná pohyb dolů.

Řezané závity

Graf na obrázku číslo 90 zobrazuje souhrnný graf tlakových sil u čtyř měřených řezaných závitů. Obrázek 91 poté zobrazuje průměrnou velikost tlakové síly u každého závitu spolu s její maximální a minimální hodnotou.



Obr. 90 Průběh tlakových sil při výrobě řezaných závitů.

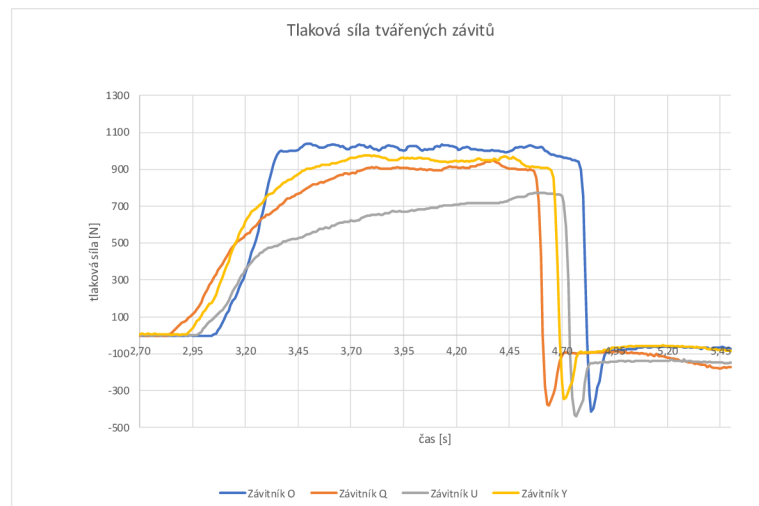


Obr. 91 Tlakové síly při výrobě řezaných závitů.

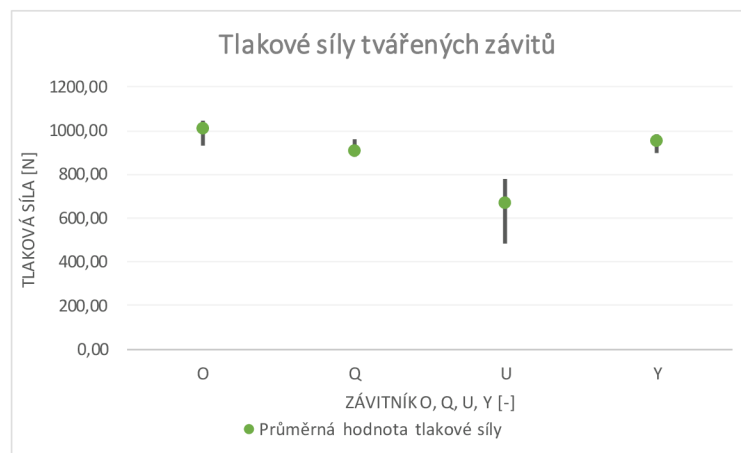
Z grafů lze vidět, že průběhy působení tlakových sil při výrobě řezaných závitů jsou téměř totožné, přičemž jejich průměrná hodnota se pohybuje v rozmezí 240–270 N. Maximální hodnota tlakové síly, jež byla zaznamenána byla 314 N. Tato hodnota však byla v měřeních vyhodnocena jako ojedinělý extrém.

Tvářené závity

Graf na obrázku číslo 92 zobrazuje souhrnný graf tlakových sil u čtyř měřených tvářených závitů. Obrázek 93 poté zobrazuje průměrnou velikost tlakové síly u každého závitu spolu s její maximální a minimální hodnotou.



Obr. 92 Průběh tlakových sil při výrobě tvářených závitů.



Obr. 93 Tlakové síly při výrobě tvářených závitů.

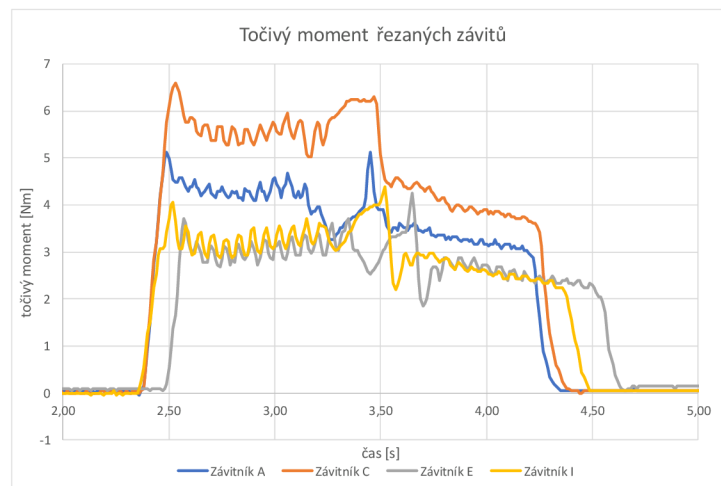
Z grafů vyplývá, že průběh tlakových sil u výroby tvářených závitů není totožný v takové míře, jako u výroby závitů řezáním, ale společné rysy se zde taktéž nachází. Výrazněji odlišný průběh má pouze závitník O. Tato odlišnost se však nezdá být natolik velká, aby jí musela být přikládána větší pozornost. Rozdíly hodnot jsou pravděpodobně způsobeny rozdílnou povrchovou úpravou závitníků. U závitníku O byla zaznamenána nejvyšší hodnota tlakové síly ze všech vzorků a to 1040 N. Celkově se průměrné hodnoty tlakových sil u měřených vzorků pohybují v rozmezí 909–1010 N. V porovnání s hodnotami u řezaných závitů lze zpozorovat, že hodnoty tlakových sil u tvářených závitů jsou zhruba trojnásobné, což je vzhledem ke způsobu a principu výroby závitů tvářením očekávané.

3.2.3 Analýza točivých momentů

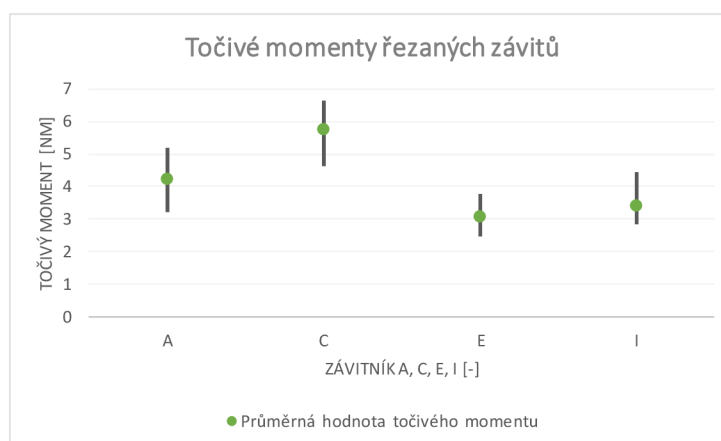
Podobně jako v předchozí části zde proběhne analýza dat získaných během výroby, avšak zde bude věnována pozornost točivým momentům vznikajících při působení závitníků na materiál. Hodnoty točivých momentů budou analyzovány v oblasti, kdy závitník koná pohyb dolů.

Řezané závity

Graf na obrázku číslo 94 zobrazuje souhrnný graf velikostí točivých momentů u čtyř měřených řezaných závitů. Obrázek 95 poté zobrazuje průměrnou velikost točivého momentu každého závitu spolu s její maximální a minimální hodnotou.



Obr. 94 Průběhy velikostí točivých momentů při výrobě řezaných závitů.



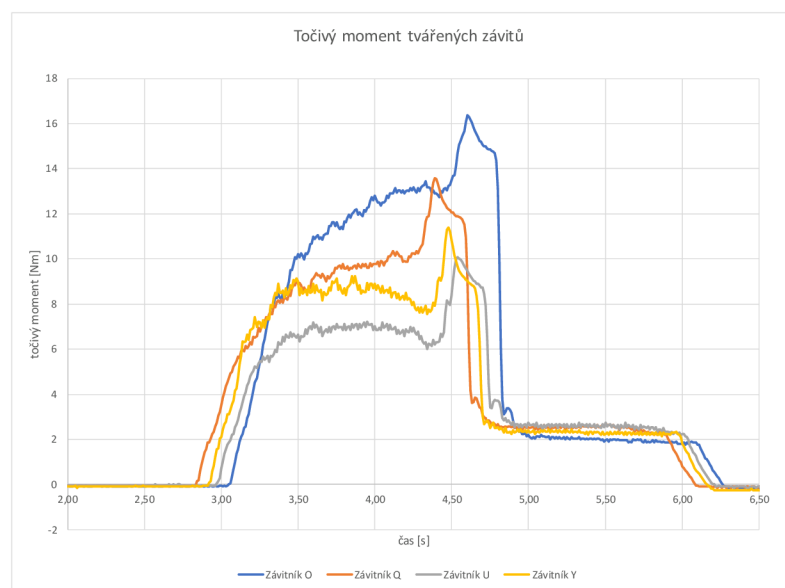
Obr. 95 Točivé momenty při výrobě řezaných závitů.

Z grafů vyplývá, že průběhy velikostí točivých momentů při výrobě řezaných závitů jsou velmi podobné, avšak nastávají zde rozdíly v jejich hodnotách. Závitník C vykazuje moment s nejvyšší hodnotou 6,52 Nm, kdežto závitník E má svou nejvyšší hodnotu na 3,71 Nm, což je téměř o polovinu méně oproti závitníku C. Na rozdíly těchto hodnot má

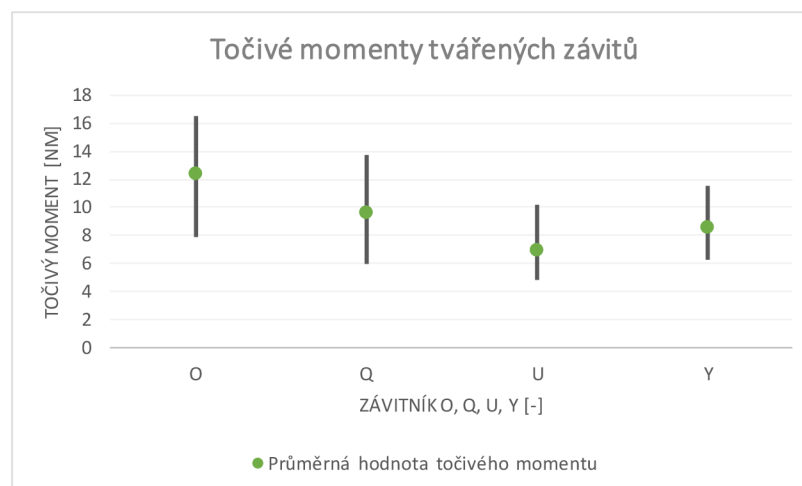
pravděpodobně vliv jejich povrchová úprava, která je popsána v tabulce 12 výše. Z toho plyne, že druh povrchové úpravy závitníků hraje značnou roli, co se velikosti vzniklého točivého momentu týče.

Tvářené závity

Graf na obrázku číslo 96 zobrazuje souhrnný graf točivých momentů u čtyř měřených tvářených závitů. Obrázek 97 poté zobrazuje průměrnou velikost točivého momentu u každého závitu spolu s její maximální a minimální hodnotou.



Obr. 96 Průběhy velikostí točivých momentů při výrobě tvářených závitů.



Obr. 97 Točivé momenty při výrobě tvářených závitů.

Z grafů výše lze stejně jako u řezaných závitů vypočítat totožné průběhy velikostí točivých momentů během tváření a rovněž i zde se vlivem druhu povrchové úpravy tvářecích závitníků vyskytnou odlišnosti maximálních hodnot točivých momentů u jednotlivých závitníků. Například závitník O má nejvyšší hodnotu točivého momentu 16,36 Nm, kdežto závitník U vykazuje maximální hodnotu pouhých 10 Nm. V porovnání s hodnotami točivých momentů u řezaných závitů jsou hodnoty u závitů tvářených zhruba dvojnásobné, což je vzhledem k principu výroby závitů pomocí tvářecích závitníků poměrně nepřekvapující.

3.3 Ekonomické zhodnocení nákladů na výrobu jednoho kusu závitu

Při výrobě závitů je nutné vzít v potaz zejména počet vyráběných kusů a jejich požadovanou kvalitu. Od toho se poté odvíjí použití vhodných strojů, nástrojů a celkové technologie výroby. V této kapitole budou počítány přibližné celkové výrobní náklady na výrobu jednoho řezaného závitu. Výrobní náklady pro výrobu tvářeného závitu nejsou počítány zejména z důvodu, že nebylo možné zjistit relevantní informaci o průměrné životnosti tvářecího závitníku jak ve škole, tak z externích zdrojů.

Pro výpočet celkových výrobních nákladů je třeba provést součet dílčích nákladů, mezi které patří náklady na strojní práci, náklady na nástroj vztažené na jeden obrobek a náklady na vedlejší práci. Celkové výrobní náklady zaznamenává vzorec 21.

$$N_c = N_s + N_N + N_V \text{ [Kč]} \quad (21)$$

N_C – celkové náklady na jeden kus [Kč]

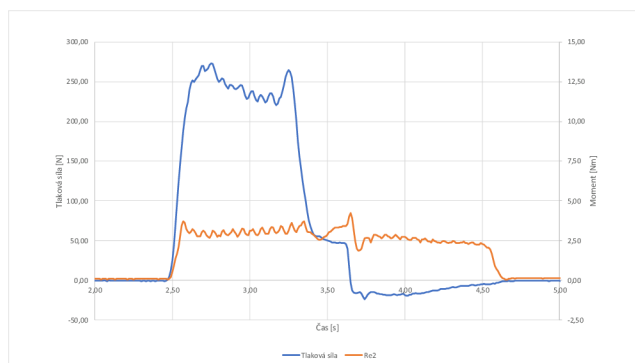
N_S – náklady na strojní práci [Kč]

N_N – náklady na nástroj vztažené na jeden kus [Kč]

N_V – náklady na vedlejší práci

3.3.1 Náklady na strojní práci

Náklady na strojní práci závisí na minutové sazbě stroje a na strojním čase t_{AS} . Strojní čas t_{AS} byl vyčten z energetického grafu, který byl vyhotoven při výrobě. Viz obr. 98. K tomuto odečtenému času byl přičten čas potřebný na přejezd nástroje. Vztah nákladů na strojní práci zachycuje vzorec 22.



Obr. 98 Graf tlakové síly a točivého momentu.

$$N_s = t_{AS} \cdot N_{sm} \text{ [Kč]} \quad (22)$$

$$t_{AS} = 2,22 + 1,5 = 3,72 \text{ s} = 0,062 \text{ min}$$

$$N_{sm} = \frac{N_{sn}}{60} = \frac{2000}{60} = 33,33 \text{ [Kč]} \quad (23)$$

N_{sm} – minutová sazba stroje [Kč]

N_{sn} – hodinová sazba stroje [Kč]

$$N_s = 0,062 \cdot 33,33 = 2,066 \text{ Kč} \quad (22)$$

3.3.2 Náklady na nástroj

Při výpočtu nákladů na nástroj hraje hlavní roli pořizovací cena jednoho nástroje a doba opotřebení do doby nutnosti jeho výměny, tedy jeho trvanlivost. Výpočet nákladů na nástroj N_N je poté dán vztahem 24.

$$N_N = \frac{t_s}{T} \cdot N_t \text{ [Kč]} \quad (24)$$

t_s – strojní čas záběru nástroje [min]

T – trvanlivost nástroje [min]

N_t – náklady na nástroj [Kč]

Strojní čas záběru nástroje byl odečten z energetického grafu na obrázku 98 a jeho hodnota je 2,2 sekundy, tedy 0,037 minuty, trvanlivost řezacího závitníku byla po konzultaci určena na 15 minut a náklady na pořízení nástroje byly určeny na 250 Kč [67].

$$N_N = \frac{0,037}{15} \cdot 250 = 0,6167 \text{ Kč} \quad (24)$$

3.3.3 Náklady na vedlejší práci

Do tohoto parametru jsou zahrnuty například náklady na seřízení stroje, režijní náklady dílny a podobně. Tato položka bývá ze všech tří druhů nákladů nejvyšší. Náklady na vedlejší práci N_v jsou vyjádřeny vzorcem 25.

$$N_V = t_{AV} \cdot N_{Vm} \text{ [Kč]} \quad (25)$$

t_{AV} – čas potřebný k provedení vedlejších prací [min] = 1 minuta

N_{Vm} – minutová sazba na vedlejší práce [Kč]

$$N_{Vm} = \frac{D_V}{60} = \frac{300}{60} = 5 \text{ Kč} \quad (26)$$

D_V – hodinová sazba na vedlejší práce [Kč]

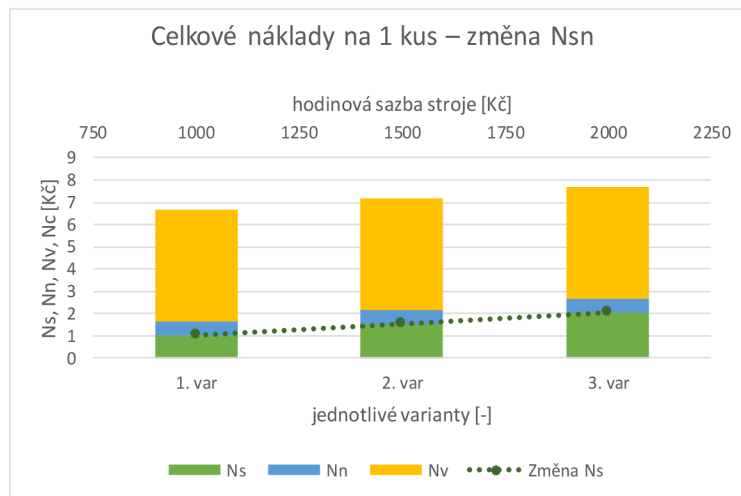
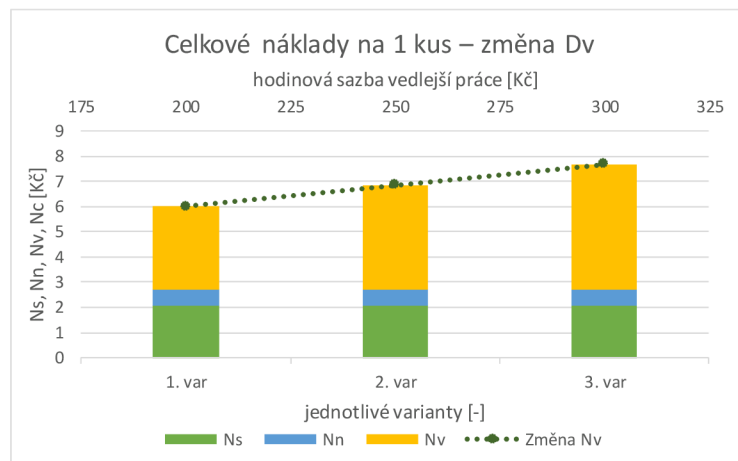
$$N_V = 1 \cdot 5 = 5 \text{ Kč} \quad (25)$$

$$N_c = 2,066 + 0,6167 + 5 = 7,68 \text{ Kč} \quad (21)$$

Z předchozího výpočtu vyplývá, že celkové náklady na výrobu jednoho kusu řezaného metrického závitu jsou 7,68 Kč. Jelikož ve výpočtu byla odhadována hodinová sazba stroje, která byla vhodně zvolena ve výši 2000 Kč a hodinová sazba na vedlejší práce ve výši 300 Kč, budou provedeny obdobné výpočty s různými změnami těchto hodnot. Změněné hodnoty a výsledné dílčí náklady jsou zaznamenány v tabulce 13 a hodnoty jsou zobrazeny v grafech 99 a 100.

Tab. 13 Hodnoty nákladů při změnách N_{sn} , D_v

| Změna hodinové sazby stroje N_{sn} | | | | |
|---|------------|------------|------------|------------|
| N_{sn} [Kč] | N_s [Kč] | N_n [Kč] | N_v [Kč] | N_c [Kč] |
| 1000 | 1,033 | 0,6166 | 5 | 6,6496 |
| 1500 | 1,55 | 0,6166 | 5 | 7,1666 |
| 2000 | 2,06666667 | 0,616667 | 5 | 7,683333 |
| změna hodinové sazby na vedlejší práce: | | | | |
| D_v [Kč] | N_s [Kč] | N_n [Kč] | N_v [Kč] | N_c [Kč] |
| 200 | 2,06666667 | 0,616667 | 3,333 | 6,016333 |
| 250 | 2,06666667 | 0,616667 | 4,166 | 6,849333 |
| 300 | 2,06666667 | 0,616667 | 5 | 7,683333 |

Obr. 99 Graf celkových nákladů na 1 kus při změně N_{Sn} .Obr. 100 Graf celkových nákladů na 1 kus při změně D_v .

Po zjištění celkových nákladů na jeden vyrobený kus při změnách hodinové sazby stroje v rozsahu 1000–2000 Kč a při změnách velikosti hodinové sazby vedlejší práce v rozsahu 200–300 Kč lze říci, že cena nákladů na jeden vyrobený kus se pohybuje v rozmezí 6,01–7,68 Kč. Pro zjištění konkrétní výše by bylo třeba zjistit tyto hodnoty v přesné částce pro konkrétní typ výroby.

ZÁVĚR

V teoretické části této práce jsou popsány základní způsoby, kterými je v dnešní době možné zaznamenat a analyzovat strukturu povrchu a taktéž jsou popsány jak tradiční, tak moderní přístroje, kterými lze tato měření realizovat. Druhá kapitola teoretické části se zabývá způsoby, jakými lze naměřená data kvantifikovat a tímto texturu povrchu analyzovat. Jsou zde popsány jak plošné, tak profilové parametry, které k těmto účelům slouží.

V rámci aplikace vybrané technologie záznamu textury povrchu v praktické části práce byly vybrány dvě sady vnitřních závitů M10, přičemž jedna byla vyrobena závitníkem řezacím a druhá závitníkem tvářecím. Povrch těchto závitů byl nasnímán metodou focus variation přístrojem IFM 5. generace od společnosti Alicona a ze získaných dat byly vytvořeny průřezy zkoumaných závitů, pomocí nichž byly na závitech měřeny a srovnávány různé parametry.

Analýza obsahů ploch průřezů závitů ukázala, že téměř všechny obsahy průřezů obou sad závitů vykazovaly menší hodnoty, než je jejich teoretická ideální hodnota, přičemž u tvářených závitů byly pozorovány prohlubně na hřbetu závitu způsobené nedokonalým protečením materiálu při tváření. Zaznamenaná hloubka těchto prohlubní se zdá být větší, než by v ideálním případě u tvářených závitů měla být, avšak na žádném z měřených závitů nebyla hloubka prohlubně natolik velká, aby ohrozila funkci závitu. Co se obsahů ploch týče, tak i přes menší, než teoretické ideální hodnoty byly všechny plochy v rámci tolerance zcela přípustné. Dále byla zkoumána a porovnávána kolmá výška závitů od jejich dna po hřbet. Všechny závity jak u tvářené, tak u řezané sady vykazovaly menší výšku, než je jejich teoretická ideální hodnota, přičemž 6 z 8 řezaných závitů se teoretické ideální hodnotě značně přiblížilo. Tvářený závit se svou maximální výškou k teoretické hodnotě výrazněji nepřiblížil ani jeden, avšak všechny hodnoty byly v rámci třídy přesnosti 6H svou výškou přípustné. Dále byla analyzována rozteč, přičemž tvářené závity vykazovaly menší odchylky hodnot od rozteče ideální, než závity řezané. Dalším parametrem, který byl analyzován byly vrcholové úhly. U tohoto parametru byly zaznamenány vhodnější hodnoty u závitů tvářených, avšak pro ověření tohoto měření je doporučeno měření opakovat a výsledky porovnat.

Druhá část praktické práce se zabývala analýzou tlakových sil a točivých momentů, které vznikaly při výrobě těchto závitů, přičemž každý ze závitů byl vyráběn závitníkem s jiným druhem povrchové úpravy. Porovnání tlakových sil při výrobě závitů řezáním přineslo téměř totožné průběhy a maximální hodnoty u všech závitů, kdežto u tvářených závitů se vliv povrchové úpravy závitníků na velikost tlakové síly nepatrně projevil. Při porovnání hodnot tlakových sil obou druhů výroby vyplynulo, že tlakové síly jsou při výrobě tvářených závitů téměř trojnásobné. U analýzy točivých momentů se vliv povrchové úpravy závitníků projevil již zřetelněji jak u řezaných, tak u tvářených závitů, přičemž hodnoty točivých momentů u závitů vyráběných tvářením byly oproti řezaným závitům přibližně dvojnásobné.

Poslední kapitola praktické části se zabývala ekonomickou stránkou a zhodnotovala náklady na výrobu jednoho kusu řezaného závitu a poté zde byly zaznamenávány a porovnávány jednotlivé varianty při změnách velikostí různých druhů nákladů, resp. sazeb. Při práci s původními hodnotami vyšly náklady na výrobu jednoho kusu 7,68 Kč, přičemž při vhodně měněných velikostech různých druhů sazeb se náklady na výrobu jednoho kusu pohybovaly v rozmezí 6,01–7,68 Kč.

Pro ověření dat a větší věrohodnost výsledků v oblasti analýzy parametrů na základě průřezů závitů by bylo vhodné měření opakovat a provádět na větším množství vzorků. Také by bylo vhodné věnovat více pozornosti zlepšení nasvícení vzorků při měření, aby vznikalo méně chybných dat. Jednou z nevýhod, která mohla mít vliv na dosažené výsledky je fakt, že při měření na přístroji od společnosti Alicona se nedařilo obraz reprezentující skutečný povrch proložit rovinou vytvářející průřez závitu tak, aby tato rovina tvořila zcela příčný řez závitu. Prokládající rovina byla takřka vždy, byť o minimální a téměř zcela zanedbatelný úhel nevhodně pootočená. Tento problém se nedařilo zcela vyřešit jak mně, tak mému panu vedoucímu práce, tak ani technické podpoře ze společnosti Alicona. Problém byl patrně zapříčiněn softwarem u nové generace přístroje.

V části zabývající se analýzou průřezů mě zaujalo pozorování prohlubní u závitů vyráběných tvářením a pomocí měření touto metodou by bylo možné lépe analyzovat tyto prohlubně u více vzorků s odlišnými parametry při výrobě (odlišné materiály, druhy povlaků závitníku atp.) v další práci. Co se týká energetické analýzy při výrobě závitů, velice mě zaujal vliv povrchové úpravy závitníků na měřené veličiny, i když tato oblast nebyla hlavní náplní praktické části, a proto by byla vhodná pro hlubší zaměření v další práci.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. E CHIFFRE, L., et al. Quantitative characterisation of surface texture. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2000, vol. 49, no. 2, p. 635-652. ISSN 0007-8506.
2. JIANG, X. and WHITEHOUSE, D. J. Technological shifts in surface metrology. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61(2). p. 815-836. 2012. ISSN 0007-8506.
3. LONARDO, P. M., LUCCA, D. A., DE CHIFFRE, L. Emerging trends in surface metrology. In: *CIRP Annals*, Vol. 51, No. 2, 2002. p. 701-723.
4. DE CHIFFRE, L., LONARDO, P. M., TRUMPOLD, H., LUCCA, D. A., GOCH, G., BROWN, C. A., RAJA, J., HANSEN, H. N. Quantitative Characterisation of Surface Texture. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 49, No. 2, 2000. p. 635-651.
5. DE CHIFFRE, L. Industrial survey on ISO surface texture parameters. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 48, No. 3, 1999. p. 74-77.
6. PETERSA, J. Contribution of CIRP to the Development of Metrology and Surface Quality Evaluation during the last fifty years. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. Volume 50, Issue 2, 2001. p. 471-488.
7. Vertical Scanning (Coherence Probe) Techniques [online]. In: . [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: https://wp.optics.arizona.edu/jcwyant/wp-content/uploads/sites/13/2016/08/05-4-Vertical_Scanning.pptx.pdf
8. Surface roughness parameters. Keyence [online]. 2019 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/line/maximum-height-of-profile.jsp>
9. NWAOGU, U. C., TIEDJE, N. S., HANSEN, H. N. A non-contact 3D method to characterize the surface roughness of castings, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 213, Issue 1, January 2013. p. 59-68. ISSN 0924-0136.
10. BOZDANA, Tolga. Engineering Metrology and Quality Control [online]. Gaziantep [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://studylib.net/doc/18425651/me-472-%E2%80%93-engineering-metrology-and-quality-control>. Mechanical Engineering University of Gaziantep.
11. Form Talysurf Intra Operator's Handbook. In: Taylor Hobson [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: https://www.taylor-hobson.com/-/media/ametektaylorhobson/files/learning%20zone/user%20guides/form%20talysurf%20intra%20handbook%201_5.pdf?la=en
12. METELKOVÁ, Jitka. Pokročilé metody vyhodnocování topografie povrchu. Brno 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 77 s. 4 příloh. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.

13. ČSN EN ISO 3274. Geometrické požadavky na výrobky (GPS)–Struktura povrchu: Profilová metoda–Jmenovité charakteristiky dotykových přístrojů. Praha: Český normalizační institut, 1999.
14. ČSN EN ISO 25178–601. Geometrické specifikace produktu (GPS)–Textura povrchu: Plocha–Část 601: Jmenovité charakteristiky dotykových přístrojů. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
15. ČSN EN ISO 25178–6. Geometrické specifikace produktu (GPS)–Textura povrchu: Plocha–Část 6: Klasifikace metod měření textury povrchu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
16. Měření drsnosti povrchu. Uzimex [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <http://www.uzimex.cz/Sortiment/Mereni-drsnosti-povrchu.html>
17. DURAKBASA, M.n., P.h. OSANNA a P. DEMIRCIUGLU. The factors affecting surface roughness measurements of the machined flat and spherical surface structures – The geometry and the precision of the surface. Measurement [online]. Elsevier, 2011, 44(10), 1986-1999 [cit. 2019-05-17]. DOI: 10.1016/j.measurement.2011.08.020. ISSN 0263-2241. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224111002831?via%3Dihub>
18. BLUNT, L. a Xiangqian JIANG. Advanced techniques for assessment surface topography: development of a basis for 3D surface texture standards "surfstand". Sterling, VA: Kogan Page Science, 2003. ISBN 1-903996-11-2.
19. Development of methods for the characterisation of roughness in three dimensions. Revised [ed.]. Editor K. J. STOUT. London: Penton Press, c2000. ISBN 1857180232.
20. DURAKBASA, M.n., P.h. OSANNA a P. DEMIRCIUGLU. The factors affecting surface roughness measurements of the machined flat and spherical surface structures – The geometry and the precision of the surface. Measurement [online]. Elsevier, 2011, 44(10), 1986-1999 [cit. 2019-05-17]. DOI: 10.1016/j.measurement.2011.08.020. ISSN 0263-2241. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224111002831?via%3Dihub>
21. DEMIRCIUGLU, P., DURAKBASA, M. N. Investigations on machined metal surfaces through the stylus type and optical 3D instruments and their mathematical modeling with the help of statistical techniques, Measurement, Volume 44, Issue 4, May 2011. p. 611-619. ISSN 0263-2241.
22. ČSN EN ISO 25178–604. Geometrické specifikace produktu (GPS)–Textura povrchu: Plocha–Část 604: Jmenovité charakteristiky bezdotykových přístrojů (spojité skenovací interferometry). Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.

23. HARČARÍK, MATEJ. *Měření parametrů textury povrchu výrobků kontaktní a bezkontaktní metodou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 81 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Róbert Jankovych, CSc.
24. DZIERWA, Andrzej. Influence of surface preparation on surface topography and tribological behaviours. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* [online]. Elsevier Urban & Partner Sp. z o.o, 2017, 17(3), 502-510 [cit. 2019-05-17]. DOI: 10.1016/j.acme.2016.12.004. ISSN 1644-9665. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S164496651630156X?via%3Dihub>
25. ČSN EN ISO 25178–602. Geometrické specifikace produktu (GPS)–Textura povrchu: Plocha–Část 60: Jmenovité charakteristiky bezdotykových přístrojů (konfokální chromatická sonda). Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
26. Konfokální mikroskopie. In: Ústav fyziky Stavební fakulty VUT v Brně [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: http://fyzika.fce.vutbr.cz/file/kusak/konfokalni_mikroskopie.pdf
27. Confocal microscope. In: Sociétés des Experts Chimistes de France [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.chimie-experts.org/var/secsf/storage/original/application/f29a601728638393f6e0f6d7529e5ba6>
28. Elektronová mikroskopie. In: Fakulta chemicko-inženýrská VŠCHT Praha [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010367/EM.pdf?redirected>
29. FIALA, Zdeněk. Experimentální metody–Opotřebení řezného nástroje + mikroskopie. Brno. Výuková prezentace. Vysoké učení technické v Brně.
30. Elektronová mikroskopie transmisní a rastrovací. In: Jointlab Společná laboratoř optiky [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: http://jointlab.upol.cz/~soubusta/OSYS/El_mikr/El_mikr.html
31. FIALA, Zdeněk. Experimentální metody–Opotřebení řezného nástroje + mikroskopie. Brno. Výuková prezentace. Vysoké učení technické v Brně.
32. ČSN EN ISO 25178–606. Geometrické specifikace produktu (GPS)–Textura povrchu: Plocha–Část 606: Jmenovité charakteristiky bezdotykových přístrojů (variace sond). Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
33. Analysis of secondary adhesion tool wear effects on surface roughness in dry turning process of UNS A92024 aluminium alloy. *Research Gate* [online]. , 22-39 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/317381773_Analysis_of_secondary_adhesion_tool_wear_effects_on_surface_roughness_in_dry_turning_process_of_UNSA92024_aluminium_alloy/download

34. AFM Mikroskop [online]. In: . [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: http://fyzika.fce.vutbr.cz/file/kusak/AFM_mikroskopie.pdf
35. Mikroskopie atomárních sil. In: Katedra fyziky Přf OU [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <http://artemis.osu.cz/biofyzika/Studium/Studmat/material/AFM.ppt>
36. Atomic Force Microscopy. Resonance [online]. 7.2010, , 622-642 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://link-springer-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/content/pdf/10.1007%2Fs12045-010-0047-z.pdf>
37. FRANK, Luděk a Jaroslav KRÁL, ed. Metody analýzy povrchů: iontové, sondové a speciální metody. Praha: Academia, 2002. ISBN 80-200-0594-3.
38. Scanning Tunneling Microscopy. Nano Science [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.nanoscience.com/techniques/scanning-tunneling-microscopy/>
39. Měření drsnosti povrchů. České Budějovice, 2014. Bakalářská práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. Vedoucí práce RNDr. Pavel Kříž, Ph.D.
40. ČSN EN ISO 8785. Geometrické požadavky na výrobky (GPS)–Nedokonalosti povrchu–Termíny, definice a parametry. Praha: Český normalizační institut, 2000.
41. ČSN EN ISO 4287. Geometrické požadavky na výrobky (GPS)–Struktura povrchu: Profilová metoda–Termíny, definice a parametry struktury povrchu. Praha: Český normalizační institut, 1999.
42. ČSN EN ISO 11562. Geometrické požadavky na výrobky (GPS)–Struktura povrchu: Profilová metoda–Metrologické charakteristiky fázově korigovaných filtrů. Praha: Český normalizační institut, 1999.
43. Kontrola struktury povrchu. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Pernikář, CSc.
44. Kontrola struktury povrchu bezkontaktní metodou. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Pernikář, CSc.
45. Workpiece surface measurement. Sandvik coromant [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/materials/pages/workpiece-surface-measurement.aspx>
46. Basic components & elements of surface topography. Yumpu [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/en/document/read/29573173/basic-components-elements-of-surface-topography>
47. ČSN 01 4005. Drsnost povrchu závitů. Praha: Český normalizační institut.
48. A different slice of surface finish. Quality mazaine [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.qualitymag.com/articles/92095-a-different-slice-of-surface-finish>
49. Surface topography. In: Distant production house university [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: http://www.dphu.org/uploads/attachements/books/books_2958_0.pdf

50. Search from the parameters list. Keyence [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/line/parameters.jsp>
51. LEACH, R. K. Fundamental principles of engineering nanometrology. Second edition. Amsterdam: Elsevier, William Andrew, 2014. Micro & nano technologies. ISBN 978-1-4557-7753-2.
52. Assessing Skewness and Kurtosis in the Returns Distribution. Evestment [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.evestment.com/resources/investment-statistics-guide/assessing-skewness-and-kurtosis-in-the-returns-distribution/>
53. ČSN EN ISO 13565–2. Geometrické požadavky na výrobky (GPS)–Struktura povrchu: Profilová metoda; Povrchy mající stratifikované funkční vlastnosti – Část 2: Výškové charakteristiky využívající křivku lineárního materiálového poměru. Praha: Český normalizační institut, 1999.
54. ČSN EN ISO 12085. Geometrické požadavky na výrobky (GPS)–Struktura povrchu: Profilová metoda–Parametry metody motif. Praha: Český normalizační institut, 1999.
55. ČSN EN ISO 25178–2. Geometrické specifikace produktu (GPS)–Textura povrchu: Plocha–Část 2: Termíny, definice a parametry textury povrchu. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
56. Michmet [online]. Michigan Metrology, 2019 [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://michmet.com/>
57. MANESH, K.k., B. RAMAMOORTHY a M. SINGAPERUMAL. Numerical generation of anisotropic 3D non-Gaussian engineering surfaces with specified 3D surface roughness parameters. Wear [online]. Elsevier B.V, 2010, 268(11), 1371-1379 [cit. 2019-05-17]. DOI: 10.1016/j.wear.2010.02.005. ISSN 0043-1648. Dostupné z: <https://www-sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S004316481000044X>
58. Areal Fields Parameters. Digital Surf [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://guide.digitalsurf.com/en/guide-areal-field-parameters.html>
59. Area Roughness Parameters. Keyence [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/surface/sdq-root-mean-square-gradient.jsp>
60. LEACH, Richard. Characterisation of areal surface texture. Heidelberg: Springer, [2013]. ISBN 978-3-642-36457-0.
61. ČSN EN ISO 13565–3. Geometrické požadavky na výrobky (GPS)–Struktura povrchu: Profilová metoda; Povrchy mající stratifikované funkční vlastnosti – Část 3: Výškové charakteristiky využívající pravděpodobnostní křivku materiálu. Praha: Český normalizační institut, 2001.
62. What is surface area roughness?. Keyence [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/surface/>
63. Hessians - A tool for debugging neural network optimization. Rohan Varma [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://rohanvarma.me/Optimization/>

64. SCOTT, Paul j. Feature parameters. *Wear* [online]. Elsevier B.V, 2009, 266(5), 548-551 [cit. 2019-05-17]. DOI: 10.1016/j.wear.2008.04.056. ISSN 0043-1648. Dostupné z: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0043164808003062>
65. WANG, Jian, Xiangqian JIANG, Elzbieta GURDAK, Paul SCOTT, Richard LEACH, Paul TOMLINS a Liam BLUNT. Numerical characterisation of biomedical titanium surface texture using novel feature parameters. *Wear* [online]. Elsevier B.V, 2011, 271(7), 1059-1065 [cit. 2019-05-17]. DOI: 10.1016/j.wear.2011.05.018. ISSN 0043-1648. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/256913296_Numerical_characterisation_of_biomedical_titanium_surface_texture_using_novel_feature_parameters
66. METRICKÝ ZÁVIT M0,25-M600. E–konstruktér [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/metricky-zavit-m0-25-m600-rozmary>
67. Metrický závit. FALTI [online]. [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.falti.cz/metricky-zavit-2>
68. DEMIRCI OGLU, P., DURAKBASA, M. N. Investigations on machined metal surfaces through the stylus type and optical 3D instruments and their mathematical modeling with the help of statistical techniques, *Measurement*, Volume 44, Issue 4, May 2011. p. 611-619. ISSN 0263-2241.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| Zkratka | Popis |
|----------------------|---|
| 2D | dvourozměrné |
| 3D | trojrozměrné |
| 6H | třída přesnosti závitu |
| AFM | atomic force microscopy |
| C | uhlík |
| CCD | druh snímače |
| Cl | chlor |
| Cr | chrom |
| CSI | koherenční skenovací interferometrie |
| D | velký průměr vnitřního závitu |
| D₁ | malý průměr vnitřního závitu |
| F–operátor | operátor eliminace vlivu tvaru |
| IFM | infinite focus microscopy |
| ISO | mezinárodní organizace pro normalizaci |
| L–filtr | plošný dlouhovlnný filtr |
| M10 | druh metrického závitu |
| Mo | molybden |
| P–parametr | parametr základního profilu |
| R–parametr | parametr profilu drsnosti |
| SEM | řádkovací elektronový mikroskop |
| SF povrch | povrch po aplikaci F–operátoru a S–filtru |
| S–filtr | plošný krátkovlnný filtr |
| SL povrch | SF po aplikaci L–filtru |
| S–parametry | plošné parametry |
| STM | řádkovací tunelový mikroskop |
| TEM | transmisní elektronový mikroskop |
| V | vanad |
| V–parametry | objemové parametry |
| W–parametr | parametr profilu vlnitosti |

| Symbol | Jednotka | Popis |
|-------------------------|-------------------|--|
| AR | [μm] | průměrná rozteč prvků motif drsnosti |
| AW | [μm] | průměrná rozteč prvků motif vlnitosti |
| D_v | [Kč] | hodinová sazba na vedlejší práce |
| E_k | [J] | kinetická energie |
| H | [mm] | výška hrotu |
| L | [mm] | délka ramena |
| Mr_{1,2} | [%] | materiálový podíl |
| N_c | [Kč] | celkové náklady na jeden kus |
| N_N | [Kč] | náklady na nástroj vztažené na jeden kus |

| | | |
|------------------------------|------------|---|
| N_s | [Kč] | náklady na strojní práci |
| N_{sm} | [min] | minutová sazba stroje |
| N_{sn} | [hod] | hodinová sazba stroje |
| N_t | [Kč] | náklady na nástroj |
| N_v | [Kč] | náklady na vedlejší práci |
| N_{vm} | [min] | minutová sazba na vedlejší práce |
| P | [mm] | rozteč závitů |
| PΔq | [-] | průměrný kvadratický sklon základního profilu |
| Pa | [μ m] | průměrná aritmetická úchylka základního profilu |
| Pc | [μ m] | průměrná výška prvků základního profilu |
| Pku | [-] | špičatost základního profilu |
| Pmr | [-] | materiálový poměr základního profilu |
| Pp | [μ m] | největší výška výstupku základního profilu |
| Pq | [μ m] | průměrná kvadratická úchylka základního profilu |
| Psk | [-] | šikmost základního profilu |
| PSm | [μ m] | průměrná šířka prvků základního profilu |
| Pt | [μ m] | celková výška základního profilu |
| Pv | [μ m] | největší hloubka prohlubně základního profilu |
| Pz | [μ m] | největší výška základního profilu |
| R | [μ m] | průměrná hloubka prvků motif drsnosti |
| RΔq | [-] | průměrný kvadratický sklon profilu drsnosti |
| Ra | [μ m] | průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti |
| Rc | [μ m] | průměrná výška prvků profilu drsnosti |
| Rk | [μ m] | jádro profilu drsnosti |
| Rku | [-] | špičatost profilu drsnosti |
| R_{max} | [μ m] | vzdálenost od středu autokorelačního vrcholu k hranici řezu |
| R_{min} | [μ m] | vzdálenost od středu autokorelačního vrcholu k hranici řezu |
| Rmr | [-] | materiálový poměr profilu drsnosti |
| Rp | [μ m] | největší výška výstupku profilu drsnosti |
| Rpk | [μ m] | redukovaná výška výstupků |
| Rq | [μ m] | průměrná kvadratická úchylka profilu drsnosti |
| RS | [-] | rozlišovací schopnost |
| Rsk | [-] | šikmost profilu drsnosti |
| RSm | [μ m] | průměrná šířka prvků profilu drsnosti |
| Rt | [μ m] | celková výška profilu drsnosti |
| Rv | [μ m] | největší hloubka prohlubně profilu drsnosti |
| Rvk | [μ m] | redukovaná hloubka prohlubně |
| Rx | [μ m] | největší hloubka profilu nerovnosti |
| Rz | [μ m] | největší výška profilu drsnosti |
| S10z | [μ m] | deset bodů výšky povrchu |
| S5p | [μ m] | pět bodů výšky piku |
| S5v | [μ m] | pět bodů hloubky prohlubně |
| Sa | [μ m] | aritmetický průměr výšky omezené stupnice povrchu |

| | | |
|------------------------------|------------------------|--|
| Sal | [-] | délka autokorelace |
| Sda(c) | [μm^2] | střední plocha údolí |
| Sdq | [-] | základ průměrného čtverce gradientu omezené stupnice povrchu |
| Sdr | [%] | poměr rozvinuté mezifázové plochy omezené stupnice povrchu |
| Sdv(c) | [μm^2] | střední objem údolí |
| Sha(c) | [μm^2] | střední plocha vrchu |
| Shv(c) | [μm^2] | střední objem vrchu |
| Sk | [μm] | výška jádra |
| Sku | [-] | špičatost omezené stupnice povrchu |
| Smq | [-] | poměr materiálu |
| Smr_{1,2} | [-] | poměr materiálu |
| Sp | [μm] | maximální výška piku omezené stupnice povrchu |
| Spc | [-] | aritmetický průměr zakřivení piku |
| Spd | [μm^{-1}] | hustota piku |
| Spk | [μm] | redukováná výška piku |
| Spq | [μm] | základ průměrné úchylky čtverců plošiny |
| Sq | [μm] | základ průměrné výšky čtvercem omezené stupnice povrchu |
| Ssk | [-] | šikmost omezené stupnice povrchu |
| Std | [-] | směr textury omezené stupnice povrchu |
| Str | [-] | poměr aspektu textury |
| Sv | [μm] | maximální hloubka prohlubně omezené stupnice povrchu |
| Svk | [μm] | redukováná hloubka údolí |
| Svq | [μm] | základ průměrné úchylky čtverců údolí |
| Sxp | [μm] | extrémní výška piku |
| Sz | [μm] | maximální výška omezené stupnice povrchu |
| T | [min] | trvanlivost nástroje |
| t_{AS} | [min] | strojní čas |
| t_{AV} | [min] | čas potřebný k provedení vedlejších prací |
| t_s | [min] | strojní čas záběru nástroje |
| U | [V] | napětí |
| V_{mc} | [ml/m ²] | jádro objemu materiálu omezené stupnicí povrchu |
| V_{mp} | [ml/m ²] | pik objemu materiálu omezené stupnice povrchu |
| V_{vc} | [ml/m ²] | neplatný objem jádra omezené stupnice povrchu |
| V_{vv} | [ml/m ²] | neplatný objem údolí omezené stupnice povrchu |
| W | [μm] | průměrná hloubka prvků motif vlnitosti |
| WΔq | [-] | průměrný kvadratický sklon profilu vlnitosti |
| Wa | [μm] | průměrná aritmetická úchylka profilu vlnitosti |
| Wc | [μm] | průměrná výška prvků profilu vlnitosti |
| Wku | [-] | špičatost profilu vlnitosti |
| Wmr | [%] | materiálový poměr profilu vlnitosti |

| | | |
|-------------------------------|--------------------------------------|--|
| W_p | [μm] | největší výška výstupku profilu vlnitosti |
| W_q | [μm] | průměrná kvadratická úchylka profilu vlnitosti |
| W_{sk} | [-] | šikmost profilu vlnitosti |
| W_{Sm} | [μm] | průměrná šířka prvků profilu vlnitosti |
| W_t | [μm] | celková výška profilu vlnitosti |
| W_{te} | [μm] | celková hloubka vlnitosti |
| W_v | [μm] | největší hloubka prohlubně profilu vlnitosti |
| W_x | [μm] | největší hloubka nerovnosti |
| W_z | [μm] | největší výška profilu vlnitosti |
| X | [-] | označení osy |
| Y | [-] | označení osy |
| Z | [-] | označení osy |
| Z_p | [μm] | nejvyšší výstupek profilu |
| Z_t | [μm] | průměrná hodnota výšek prvků profilu |
| Z_v | [μm] | hloubka nejnižší prohlubně profilu |
| dx | [μm] | horizontální chyba geometrie hrotu |
| dz | [μm] | vertikální posun |
| da | [$^{\circ}$] | úhel rotace okolo středu |
| f_{ACE} | [μm] | vzdálenost autokorelační funkce |
| h | [J·s] | Planckova konstanta |
| ln | [mm] | vyhodnocovaná délka |
| lp | [mm] | základní délka pro primární profil |
| lr | [mm] | základní délka pro profil drsnosti |
| lw | [mm] | základní délka pro profil vlnitosti |
| m | [kg] | hmotnost |
| n | [-] | index lomu |
| r_{tip} | [μm] | poloměr doteku |
| v | [$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$] | rychlost |
| γ | [$^{\circ}$] | úhel kužele doteku, vlnová délka |
| α | [$^{\circ}$] | polovina otvorného úhlu kužele paprsků |
| λ_c | [nm] | mezní vlnová délka |
| λ_f | [nm] | vlnová délka dlouhovlnného filtru |
| λ_s | [nm] | vlnová délka krátkovlnného filtru |
| θ | [$^{\circ}$] | úhel Fourierova polárního spektra |

SEZNAM PŘÍLOH

- | | |
|-----------|---|
| Příloha 1 | Tabulky s funkcemi křivek měřených závitů a jejich meze |
| Příloha 2 | Grafy průřezů všech měřených závitů |
| Příloha 3 | Energetické grafy všech vyhodnocovaných závitů |
| Příloha 4 | Příklady protokolů z měření závitů |

