

Možnosti statistického hodnocení hybridních parametrů povrchů získaných nekonvenční technologií

Bc. Lucie Otépková

Diplomová práce
2023



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Lucie Otépková
Osobní číslo:	T21444
Studijní program:	N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Řízení jakosti
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Možnosti statistického hodnocení hybridních parametrů povrchů získaných nekonvenční technologií

Zásady pro vypracování

1. Vypracování rešerše na zadané téma
2. Proměření vzorků danou technikou měření
3. Nalezení vhodných statistických nástrojů, včetně důkazu jejich vhodnosti

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ. *Kompendium statistického zpracování dat*. Praha: Karolinum, 2012. ISBN 978-80-246-2196-8.

WHITEHOUSE, D. J. *Handbook of surface and nanometrology*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2011. ISBN 978-1-4200-8201-2.

BRANDT, Siegmund. *Data analysis: statistical and computational methods for scientists and engineers*. 4th ed. Přeložil Glen COWAN. Cham: Springer, c2014. ISBN 978-3-319-03761-5.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Dr. Ing. Vladimír Pata**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2023**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 7. února 2023

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce je zaměřena na možnosti statistického hodnocení heterogenního povrchu získaného obráběním laserového paprsku. Teoretická část je orientována na pochopení principů nekonvenčních technologií a vyzdvižení efektivnosti a jiných kladných vlastností při obrábění. V této části jsou také popsány vlastnosti a vysvětlen charakteristický vznik heterogenního povrchu. Cílem této práce bylo zaměřeni na progresivní hodnocení drsnosti heterogenního povrchu. K tomu byly vybrány frekvenční a hybridní parametry popisující jakost povrchu. V experimentální části je popsán postup statistického hodnocení naměřených dat, který zahrnuje popis samotného měření na bezkontaktním profilometru Talysurf CLI 500 a práci s daty. Výsledkem diplomové práce je charakterizace povrchu pomocí vybraných parametrů a nalezení funkční závislosti k popisu drsnosti heterogenního povrchu s využitím regresní analýzy.

Klíčová slova: nekonvenční technologie, laserový paprsek, heterogenní povrch, RSm, Rmr, R δ c, lineární regrese, nelineární regrese

ABSTRACT

The master thesis is focuses on the possibilities of statistical evaluation of heterogeneous surface obtained by laser beam machining. The theoretical part is oriented towards understanding the principles of unconventional technologies and highlighting the efficiency and other positive features in machining. Properties and the characteristic formation of heterogeneous surface is also explained in this section. The aim of this work was to focus on the progressive evaluation of the roughness of the heterogeneous surface. For this purpose, frequency and hybrid parameters describing the surface quality were selected. In the experimental part, the procedure for the statistical evaluation of the measured data is described, which includes a description of the actual measurement on a non-contact profilometer Talysurf CLI 500 and data work. The result of the thesis is the characterization of the surface using selected parameters and finding a functional dependence to describe the roughness of a heterogeneous surface using regression analysis.

Keywords: unconventional technology, laser beam, heterogeneous surface, RSm, Rmr, R δ c, nonlinear regression

Touto cestou bych ráda poděkovala panu prof. Dr. Ing. Vladimíru Patovi za cenné rady a čas, který mi věnoval při vypracování diplomové práce i po celou dobu studia. Dále děkuji své rodině, která mě neváhala podporovat od samého začátku mého studia na vysoké škole až po poslední řádky této práce.

„I kdyby má lyra hrála falešně a falešně zpíval sbor, který vedu, jednu věc nesmím nikdy dopustit – rozpor se sebou samým!“

Platón

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE	11
1.1 CHARAKTERISTICKÉ VLASTNOSTI	11
1.2 ROZDĚLENÍ.....	12
1.3 OBRÁBĚNÍ LASEROVÝM PAPRSKEM	15
1.3.1 Konstrukce laserového zařízení	15
1.3.2 Vlastnosti laseru	16
1.3.3 Dělení laserů.....	17
1.3.4 Aplikace laseru v průmyslu.....	21
1.3.5 Vliv laserového paprsku na kvalitu řezné plochy	22
2 HODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHU	26
2.1 STRUKTURA POVRCHU	26
2.1.1 Základní profil.....	26
2.1.2 Vlnitost.....	27
2.1.3 Drsnost	27
2.2 METODY MĚŘENÍ POVRCHU	28
2.2.1 Kontaktní snímání povrchu	28
2.2.2 Bezkontaktní snímání povrchu.....	29
2.3 PARAMETRY STRUKTURY POVRCHU	32
2.3.1 Amplitudové parametry	33
2.3.2 Frekvenční parametry.....	35
2.3.3 Hybridní parametry	35
2.4 HETEROGENNÍ POVRCH	36
2.4.1 Vznik heterogenního povrchu po laserovém řezání.....	37
2.4.2 Vlastnosti heterogenního povrchu.....	37
3 STATISTICKÉ HODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT.....	38
3.1 CHYBY MĚŘENÍ	38
3.2 TEORIE HYPOTÉZ	38
3.3 EXPLORATORNÍ DATOVÁ ANALÝZA.....	40
3.3.1 Kvalita dat	40
3.3.2 Grafické zobrazení dat	41
3.3.3 Metody hodnocení dat.....	42
3.4 REGRESNÍ ANALÝZA.....	43
3.4.1 Tvorba regresního modelu	43
3.4.2 Lineární regrese.....	44
3.4.3 Nelineární regrese	45
4 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI.....	46

II PRAKTICKÁ ČÁST	47
5 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE	48
6 SPECIFIKACE VZORKŮ	49
6.1 MATERIÁL.....	49
6.1.1 Chemické složení	49
6.2 LASEROVÁ TECHNOLOGIE	50
6.2.1 Řezné parametry vláknového laseru	50
7 MĚŘENÍ VZORKŮ	51
7.1 TALYSURF CLI 500.....	51
7.1.1 Kalibrace přístroje	52
7.1.2 Nastavení odrazivosti	52
7.1.3 Nastavení parametrů měření	52
7.2 ÚPRAVA NAMĚŘENÝCH DAT	53
7.2.1 Vyrovnání povrchu.....	54
7.2.2 Rozdělení povrchu na jednotlivé profily	56
7.2.3 Vygenerování statistických parametrů	56
7.2.4 Export naměřených dat	57
8 ANALÝZA NAMĚŘENÝCH DAT	58
8.1 OVĚŘENÍ HETEROGENITY	58
8.1.1 Optický mikroskop Zeiss	58
8.2 VIZUALIZACE DAT PARAMETRU RMR	59
8.3 VIZUALIZACE DAT PARAMETRU R Δ C	61
8.4 REGRESNÍ ANALÝZA PARAMETRU R Δ C	64
8.4.1 Lineární regrese R δ c	64
8.4.2 Nelineární regrese R δ c	67
8.5 VIZUALIZACE DAT PARAMETRU RSM	70
8.6 REGRESNÍ ANALÝZA PARAMETRU RSM.....	71
8.6.1 Lineární regrese RSm.....	71
8.6.2 Nelineární regrese RSm	73
ZÁVĚR	75
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	77
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	80
SEZNAM OBRÁZKŮ	82
SEZNAM TABULEK	84

ÚVOD

Proces neustálého zlepšování výroby je v dnešní době součástí snad všech dobře fungujících výrobních procesů. Dle managementu jakosti je v souladu s tímto přesvědčením například i implementace progresivních metod do technologických postupů obrábění. Vývoj konstrukčních materiálů leteckého či automobilového průmyslu nebo také požadavky přesného strojírenství s sebou přináší otázku zpracování těžkoobrobitelných materiálů. Konvenční způsoby zde naráží na strop možné obrobitelnosti, nepostačují kvalitativně a rovněž nevyhovují ani z hlediska ekonomického.

Zejména pro vysokou tvrdost, pevnost či houževnatost obráběných materiálů nastupují nekonvenční metody obrábění. V teoretické části diplomové práce je rozebrána problematika těchto technologií se zaměřením na obrábění laserovým paprskem. Dále jsou v první kapitole zmíněny výhody, které aplikace nekonvenčních technologií ve výrobě přináší oproti běžně využívaným metodám. Teoretická studie se také věnuje podrobnému popisu hodnocení jakosti heterogenního povrchu, jehož charakteristický vznik plyne právě z aplikace nekonvenčního způsobu obrábění. Pro hodnocení jakosti heterogenního povrchu jsou zde uvedeny následující parametry:

Průměrná šířka prvků profilu R_{Sm} , materiálový poměr R_{mr} a rozdíl výšky úseku profilu $R_{\delta c}$.

Teoretickou část uzavírají možnostmi statistického hodnocení dat heterogenních povrchů jako je například regresní analýza.

V praktické části diplomové práce byla pro statistické hodnocení využita sada 10 ocelových vzorků, které byly podrobeny laserovému obrábění. Průběh hodnocení heterogenních povrchů sestává z lineární a nelineární regresní analýzy. Na základě provedených analýz byl předložen návrh vhodných modelů k popisu heterogenního povrchu. Cílem diplomové práce je tedy nalezení a doložení funkční závislosti k popisu drsnosti heterogenního povrchu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 NEKONVENČNÍ TECHNOLOGIE

S využitím nekonvenčních metod lze dosáhnout efektivnějšího procesu obrábění nejen u běžných konstrukčních materiálů, ale otevírají možnosti pro obrábění materiálů se zvýšenými fyzikálně mechanickými vlastnostmi, jako jsou slinuté karbidy, rychlořezné oceli nebo též řezná keramika. [3]

Obráběný materiál není limitován svými vlastnostmi. Tvarová složitost, mikroobrobky ani vysoké nároky na odolnost proti opotřebení obráběného materiálu nepředstavují problém pro dosažení kvalitní výroby s dodržением rozměrové přesnosti napříč tvarem i velikostí. [1]

Nekonvenční způsoby dnes umožňují obrábět širokou škálu materiálů a tvořit nespočet druhů výrobků. Efektivní výroba je sice vykoupena vyšší ekonomickou náročností procesu, ale v dnešní době jsou nekonvenční způsoby obrábění absolutně nenahraditelnou volbou v mnoha odvětvích průmyslu (při výrobě forem a zápusťek pro automobilový průmysl nebo při výrobě prototypů). Stávají se jasnou volbou pro obrábění miniaturních součástí elektronického průmyslu, a také pro tvorbu hlubokých a tvarově složitých dutin nebo výrobu úzkých drážek a vrtání drobných otvorů. [2]

1.1 Charakteristické vlastnosti

Uvedené průmyslové aplikace představují jen zlomek toho, co je možné pomocí nekonvenčních technologií vyrábět. Pro lepší představu nenahraditelnosti těchto technologií je třeba uvést srovnání s konvenčními metodami.

Nekonvenční technologie obrábění se od konvenčních metod liší v mnoha ohledech. Při obrábění se netvoří klasická tříska, důvodem je převládající mechanismus úběru materiálu.

Úběr materiálu je dán:

- chemicky – postupným odleptáváním jednotlivých vrstev.
- mechanicky – brusným účinkem abrazivních zrn v brusné suspenzi, stlačeném plynu nebo vodním paprsku.
- tepelně – jiskrovými výboji mezi nástrojovou elektrodou a obrobkem, kinetickou energií urychlených elektronů, paprskem plazmy nebo laseru.

Další výhodou je, že se nástroj a obrobek nedostávají do přímého vzájemného kontaktu a nevzniká tak mechanické namáhání, které by způsobovalo řezný odpor. Eliminují se vibrace, které u konvenčních metod vedou k nadměrnému opotřebení nástroje. [1,3]

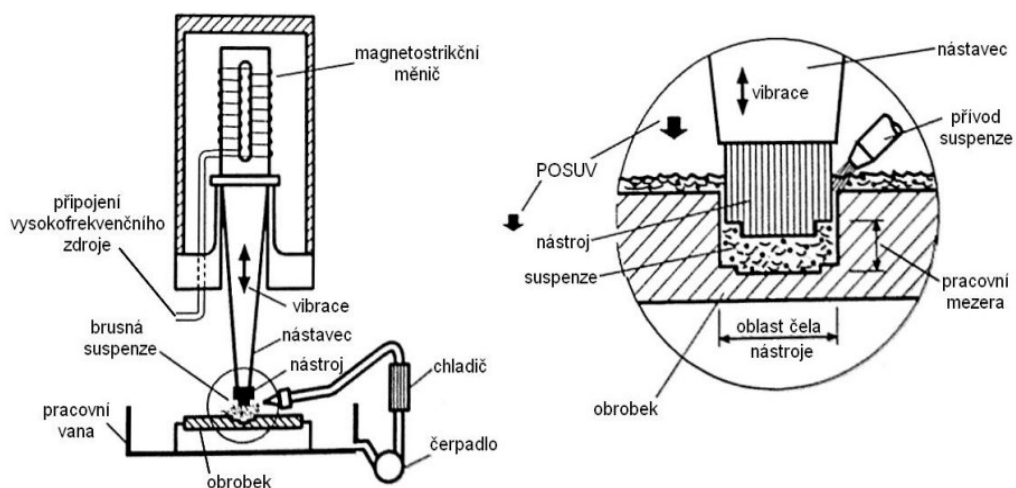
Každá technologie s sebou nese pochopitelně i nějaké nevýhody. Z hlediska zaměření diplomové práce na řezání laserem, jsou zde uvedeny rozměrové přesnosti a nevýhody nekonvenčních technologií s tepelným účinkem. Společným nežádoucím znakem všech elektrotepelných procesů je tepelně ovlivněná vrstva. Nejvíce patrný je tento jev při řezání paprskem plazmy. Obrobek je viditelně opálený a může docházet k tepelným deformacím na jeho povrchu. Technologie řezání plazmou dosahuje též nízké rozměrové přesnosti dílů (do 0,5 mm). Naproti tomu řezání drátovou elektrodou umožňuje dosáhnout vysoké přesnosti (0,002 mm), ale nevýhoda spočívá v tom, že nelze tuto metodu využít pro nevodivé materiály. Univerzální řešení poskytuje řezání laserovým paprskem, který je vhodný pro obrábění širokého spektra materiálů, jako je ocel, nerez, hliník, ale také PVC nebo keramika, s přijatelnou rozměrovou přesností 0,05 mm. [3, 4]

1.2 Rozdělení

Nekonvenční procesy obrábění můžeme dělit podle převládajícího účinku úběru materiálu:

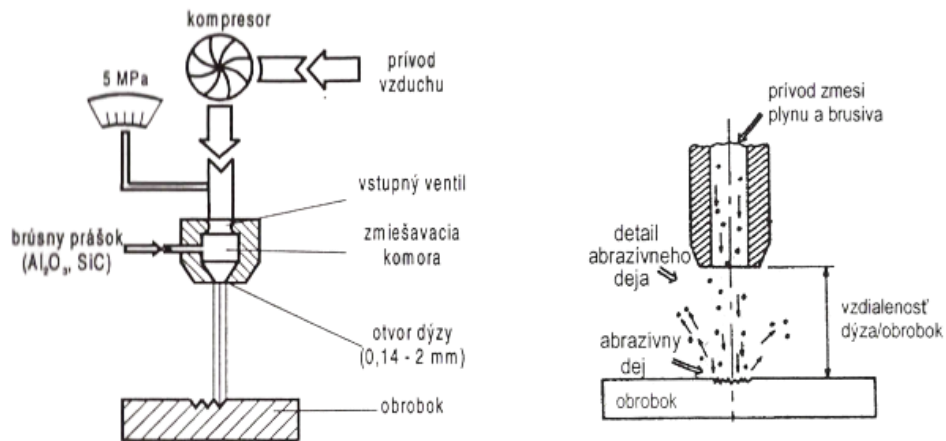
- Mechanický účinek (brusný nebo erozivní)
- Chemický a elektrochemický účinek
- Tepelný účinek [1]

Brusný účinek úběru materiálu nastává při USM (angl. ultrasonic machining) neboli obrábění ultrazvukem. Využívá se mechanicko – akustické vlnění o frekvenci 20 až 30 kHz, které je přivedeno na nástroj. Jak je zřejmé z *Obr. 1*, nástroj kmitá kolmo na obráběný povrch a přenáší kmitavý pohyb na brusnou suspenzi, která proudí mezi nástrojem a obrobkem. Částice jemného brusiva v brusné suspenzi narážejí na povrch obrobku a tvoří brusný účinek. [1, 2]



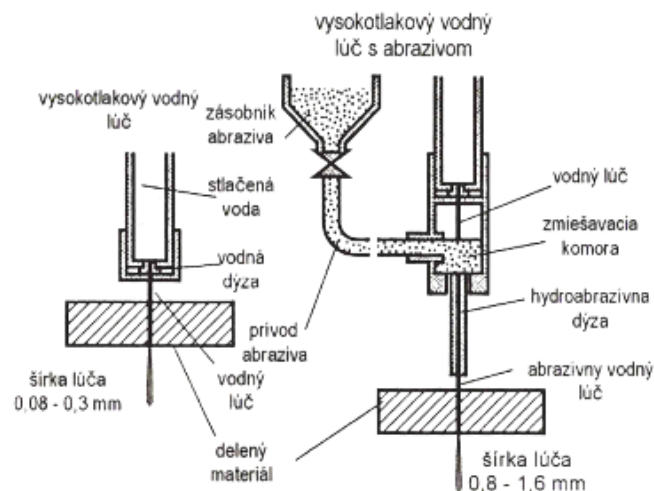
Obr. 1 Obrábění ultrazvukem [4]

Brusného účinku se též využívá u technologie AJM (angl. abrasive jet machining) neboli obrábění proudem brusiva ve stlačeném plynu. Jak je zobrazeno na *Obr. 2*, stlačený plyn se ve směšovací komoře mísí s brusným práškem, který je nejčastěji tvořen Al_2O_3 . V konvergentní části trysky se zvýší tlak směsi až na 800 MPa a paprsek abraziva dopadá na obráběný povrch s rychlostí až 300 m/s. [4]



Obr. 2 Obrábění proudem brusiva ve stlačeném plynu [4]

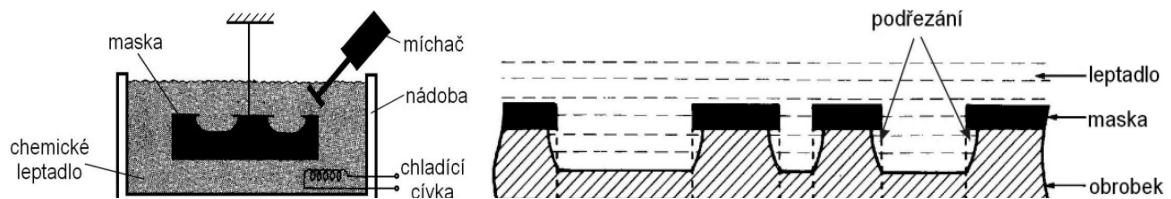
Erozivního účinku docílíme použitím technologie WJM (angl. water jet machining) neboli obrábění vodním paprskem. Při řezání může být použit jak čistý vodní paprsek, tak s příměsí abrazivních částic. Na *Obr. 3* je provedeno srovnání těchto dvou modifikací s přihlédnutím k tloušťce řezného paprsku. Erozivní proces s účinností okolo 80 % je dán především vysokým tlakem cca 400 MPa a rychlostí 1000 m/s vodního paprsku, který dopadá na povrch obrobku s vysokou kinetickou energií. [1, 4]



Obr. 3 Obrábění vodním paprskem [4]

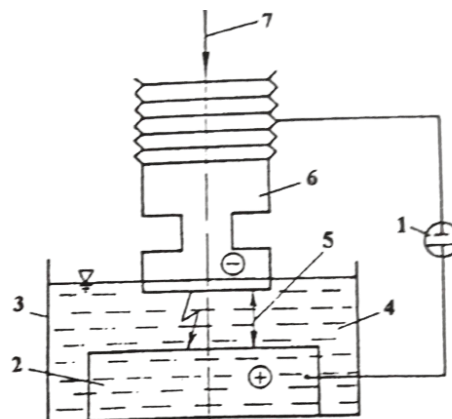
Co se týče chemického účinku úběru materiálu, jde o řízený proces postupného úběru materiálu leptáním povrchu kovového obrobku až do hloubky několika mm. Vrstvy leptaného materiálu se rozpouštějí vlivem působení chemické látky. Využívají se jak kyseliny (ocel nebo hliník) tak zásady (měď či nikl). [1, 4]

V levé části *Obr. 4* je znázorněn princip CM (chemical machining) neboli chemického obrábění a v pravé části téhož obrázku je uveden nežádoucí jev podřezání, který vzniká jako typický defekt chemicky frézovaných dílů. [1, 4]



Obr. 4 Princip chemického obrábění (vlevo), nežádoucí jev (vpravo) [4]

Poslední oblastí jsou nekonvenční technologie s tepelným účinkem úběru materiálu. Primárním zdrojem tepelné energie jsou vysokoenergetické paprsky urychlených elektronů, fotonů, iontů nebo plazmy. Rovněž do této skupiny můžeme zařadit také EDM (angl. Electrical discharge machining) neboli elektroerozivní obrábění. Princip této technologie je znázorněn na *Obr. 5* a spočívá v častých periodických impulzech jiskrového nebo obloukového výboje mezi katodou 2 a anodou 6 (obrobek). Obě kovové elektrody jsou umístěny v pracovní vaně 3 ponořeny v dielektriku 4. Generátorem stejnosměrného proudu I je na elektrody přivedeno napětí. Posuv nástrojové elektrody 7 zapříčiní přiblížení elektrod na jiskrovou mezeru 5, která činí (1–100) μm a vzniku výboje v místě nejsilnějšího napěťového pole. Vzniklý napěťový kanál umožňuje přechod jiskry mezi nástrojem a obrobkem. Dochází k prudkému narůstání teploty (při jiskrovém výboji až na 10000 °C), materiál obrobku se taví a zároveň odpařuje. Na povrchu poté zůstávají mikroskopické krátery. [1,4]

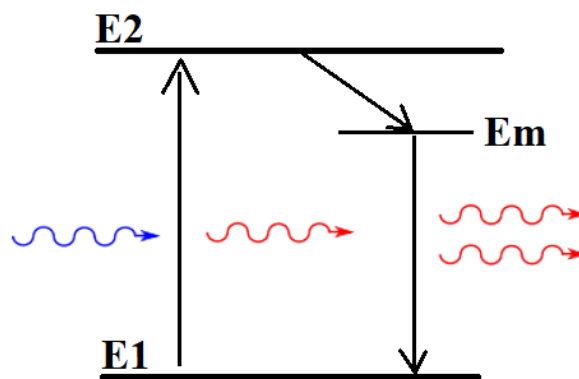


Obr. 5 Princip elektroeroze [1]

1.3 Obrábění laserovým paprskem

Pojem LASER vznikl z prvních písmen anglických slov Light Amplification by stimulated emission of radiation. V překladu hovoříme o zesilovači světla na základě stimulované emise záření. [2]

Princip stimulované emise a vzniku laserového paprsku je možné vysvětlit na základě Bohrova modelu atomu. Elektron se za normálních podmínek nachází v základní energetické hladině $E1$, dokud není vnějším působením vybuzen do excitované energetické hladiny $E2$. Vybuzení elektronu může být způsobeno intenzivními světelnými záblesky, jejichž energii elektrony absorbují a vlivem toho jsou nuceny přejít do vyšších energetických hladin. Při spontánní emisi se elektron vrací z energetické hladiny $E2$ rovnou do $E1$ za vyzáření fotonu s náhodnou vlnovou délkou a jeho směr je rovněž náhodný, zatímco při stimulované emisi elektron setrvává v desetinách sekundy na metastabilní hladině E_m a při vrácení z E_m do základní energetické hladiny $E1$ vyzáří další foton se shodnou vlnovou délkou i směrem, jako u absorbovaného fotonu budícího záření. [3, 5]

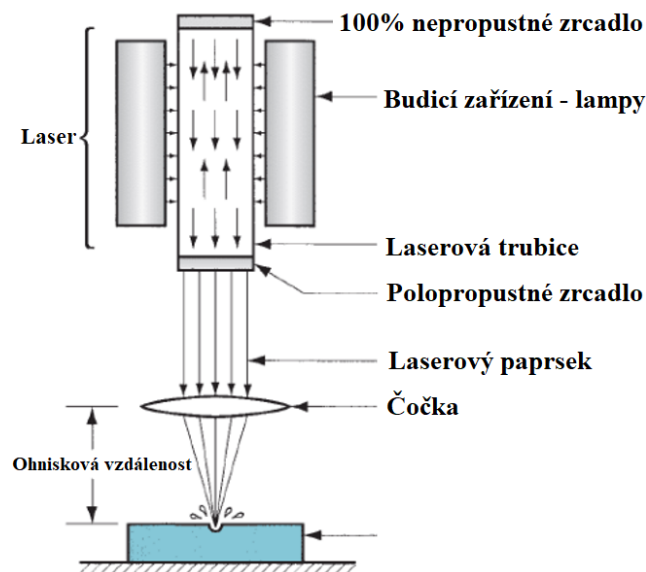


Obr. 6 Stimulovaná emise záření [autor]

1.3.1 Konstrukce laserového zařízení

Samotný laserový paprsek je nutné zesílit a zaostřit na co nejmenší plochu, aby bylo možné jej použít pro obrábění. K zesílení paprsku se využívá optický rezonátor uložený v laserové hlavici. Ten je tvořen aktivním prostředím laserového média umístěným mezi polopropustným zrcadlem a nepropustným zrcadlem (s odrazivostí až 99,99 %). Aktivní prostředí udává vlnovou délku záření. Fotony se díky zrcadlům neustále odrážejí, dokud se nenahromadí určité množství energie potřebné k vyzáření elektronového svazku polopropustným zrcadlem. [3, 5]

Na z Obr. 7 jsou znázorněny jednotlivé části laserové hlavičky a laserový paprsek, který je zaostřen optickou čočkou na malou plochu obrobku (řádově 0,01 až 0,001 mm). Kromě hlavičky je součástí laserového zařízení také zdroj energie buzení, budicí zařízení a chladicí systém. Pro odvod tepelné energie se využívá nejčastěji vodní chlazení. Zdroj buzení se liší podle zvoleného laserového média. Helium neonový laser používá elektrický výboj, YAG laser je buzen lampami a excimerový laser pomocí chemické reakce. [2, 3, 9]

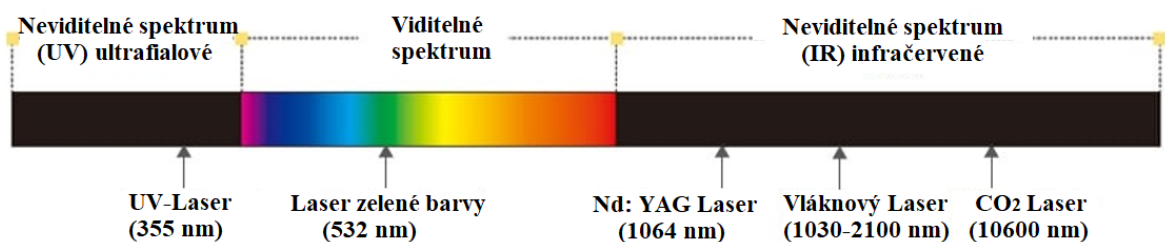


Obr. 7 Princip obrábění laserovým paprskem [16]

1.3.2 Vlastnosti laseru

Princip obrábění laserovým paprskem spočívá v tepelném účinku úběru materiálu. Zaostřený laserový paprsek dopadne na malou plochu obrobku, světelná energie se mění na tepelnou, dochází tak k prudkému nárůstu teploty v místě řezu a materiál obrobku se taví a odpařuje. [2]

Laserový paprsek je vysoce monochromatický, což znamená, že v jednom paprsku se vyskytují pouze urychlené fotony se shodnou vlnovou délkou, přičemž vlnové délky jednotlivých druhů laserů se mohou lišit, jak je patrné z Obr. 8. [3]



Obr. 8 Vlnové délky laserového paprsku [17]

Kromě shodné vlnové délky mají fotony v laserovém paprsku i stejnou fázi, paprsek je tedy vysoce koherentní. Vlivem pulzování laserového paprsku roztavený materiál působí na povrch obrobku a vzniká kombinace dalšího odpařování a tání materiálu. Laserový paprsek vede značné množství energie ve formě elektromagnetického záření, které se při interakci s povrchem obrobku mění na tepelnou energii s vysokou výstupní intenzitou. Výstupní energie laseru se udává v jednotkách $[W/cm^2]$. Minimální rozbíhavost spolu s ostatními vlastnostmi laserového paprsku umožňuje jeho fokusaci optickými čočkami na určitý bod s rozlišitelností v setinách milimetrů. [3, 4, 16]

1.3.3 Dělení laserů

Jelikož je rozmanitost dostupných laserů v dnešní době čím dál vyšší, je nutné kategorizovat lasery pro průmyslové aplikace podle následujících kritérií.

- Aktivní prostředí (skupenství)
- Vlnová délka
- Pracovní režim
- Oblast použití

Podle skupenství aktivního prostředí se lasery dělí na pevnolátkové, polovodičové, kapalinové a plynové.

Aktivním prostředím pevnolátkových laserů jsou krystalické látky. Jde o stabilní lasery s možností práce v pulzním či kontinuálním režimu. Typickým příkladem je rubínový laser, jehož aktivní prostředí je tvořeno oxidy chromu a hliníku. Vlnová délka činí 694,3 nm. Kvůli velmi nízké účinnosti (0,1 %) nachází tento typ uplatnění v holografii při měření vzdáleností. Pro technologické operace strojírenského průmyslu je vhodnou variantou Nd: YAG laser s účinností až 10 %. Využívá se při řezání, značení nebo svařování. Aktivním prostředím je neodymium (kovový prvek ze skupiny lantanoidů). Stále častěji se také můžeme setkat s vláknovými lasery, které v současnosti zaznamenávají výrazný vzestup. [2, 3, 4]

Typickým představitelem polovodičových laserů je GaAs laser používaný v informačních technologiích a spotřebitelské elektronice jako jsou CD a DVD. [3]

U kapalinových laserů je aktivním prostředím roztok organického barviva ve vodě. Umožňují širokou přeladitelnost v rozmezí 300 až 1500 nm, což je jejich výhoda. Své využití

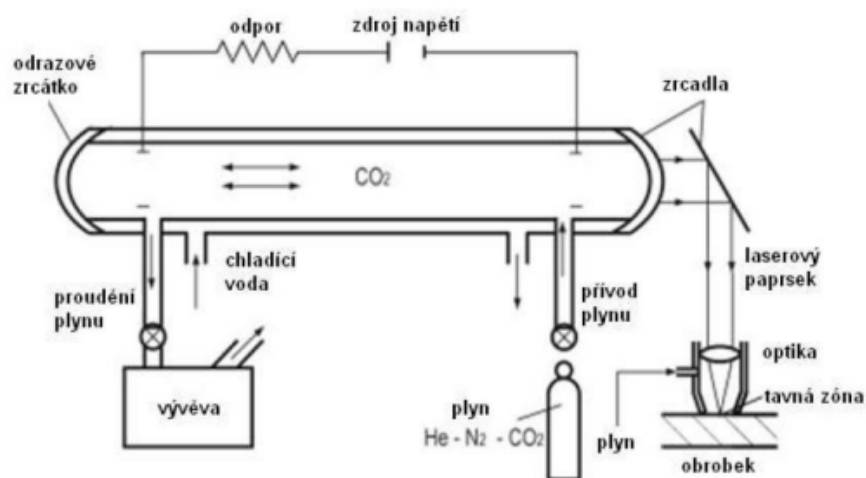
nacházejí ve spektroskopii. Značnou nevýhodou je však omezená životnost aktivní látky, která se snižuje působením tepla a světla. Dochází k rozkladu média. [3]

Široké uplatnění ve strojírenském průmyslu a metrologii mají lasery jejichž aktivní prostředí je tvořeno atomy, ionty, popřípadě molekulami plynu. Velmi rozšířený je helium neonový laser s vlnovou délkou 632,8 nm na úrovni viditelného spektra. Využívá se všude tam, kde postačuje výkon 0,1 % (holografie, geodézie). [3]

1.3.3.1 CO₂ laser

Nejvýkonnější z plynových laserů produkuje světlo z infračerveného spektra s vlnovou délkou 10600 nm. Účinnost CO₂ laseru se pohybuje mezi 10 a 18 %. Aktivní prostředí je tvořeno směsí CO₂ a přídavnými plyny (N, H, He). Ty jsou voleny také na základě druhu obráběného materiálu. Při řezání kovů nebo ocelí je volen kyslík a tam, kde je nutné řezné plochy chránit před spálením (plasty), je nejčastěji přidáván dusík. [3, 4]

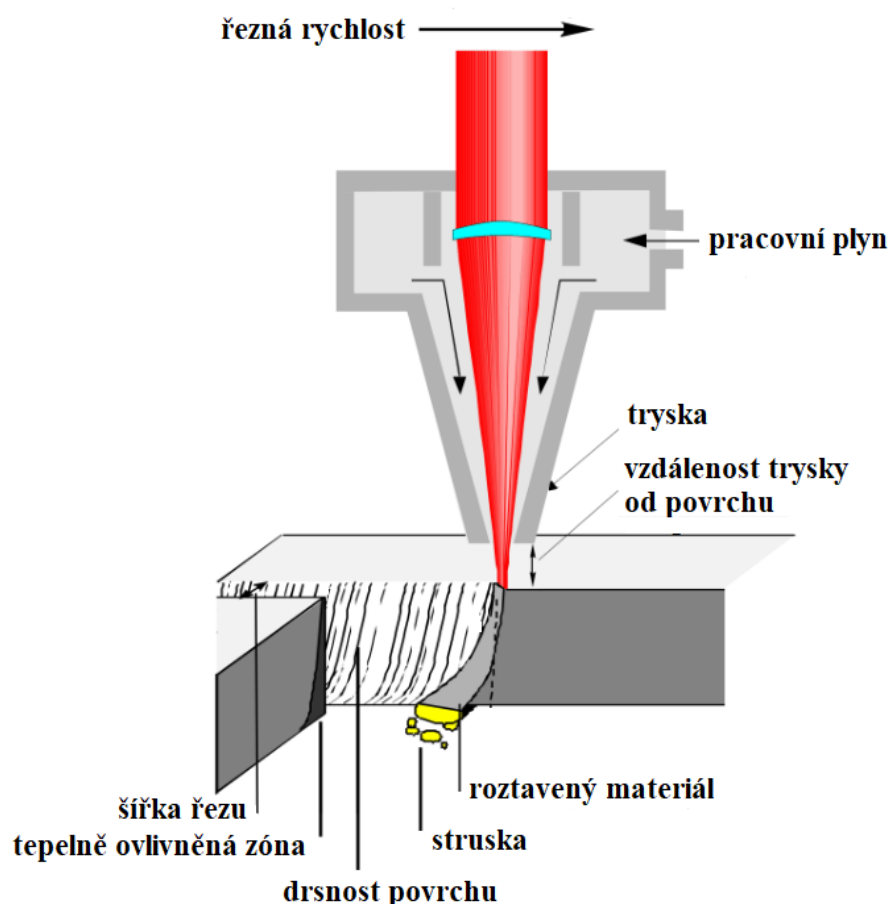
V optickém rezonátoru naplněném pracovním plynem proudí elektrický proud, který excituje molekuly dusíku. Dusík udržuje excitovaný stav po dlouhou dobu a přenáší jej na molekuly oxidu uhličitého. Ale jakmile se dusík dostane do kontaktu s chladným héliem, dojde k poklesu energetického stavu a dusík uvolní energii ve formě fotonů. V optickém rezonátoru je toto záření zesilováno opakovanými odrazy od zrcadel, kterými je ohraničen optický rezonátor a záření nabývá na intenzitě, dokud není vyzářeno jako elektronový paprsek polopropustným zrcadlem. Tento paprsek je poté nutné zaostřit optickou soustavou na povrch obrobku, aby jej bylo možné využít pro obrábění. [5, 18]



Obr. 9 Princip CO₂ laseru [4]

Zaostřený paprsek CO₂ laseru je využíván nejčastěji k řezání mnoha druhů materiálů. Maximální obráběcí výkon umožňuje CO₂ laser pracující v kontinuálním režimu. Pro obrábění ocelí je volen výkon v rozmezí 25 až 100 W. K zajištění přesného povrchu s požadovanou drsností je nutné správně nastavit procesní parametry jako je vzdálenost trysky laserové hlavice od obrobku, řezná rychlost nebo výkon laseru. [5, 18]

Při řezání laserem dochází k několika různým procesům. Na *Obr. 10* je znázorněn princip laserového řezání s podrobným náhledem na řeznou plochu obráběného materiálu. Nejdříve laser prorazí materiál a poté dále rozrušuje povrch ve směru řezání. Materiál se taví a odpařuje, přesto je laserové řezání velmi přesný proces, při kterém je možné dosáhnout šířky řezné štěrbině 0,1 mm. Laserový paprsek zahřívá obráběný materiál na teplotu vznícení a následná struska je odváděna pomocným plynem. Sublimace materiálu nastává vlivem vysoké intenzity laserového záření v místě řezu. [5, 18]

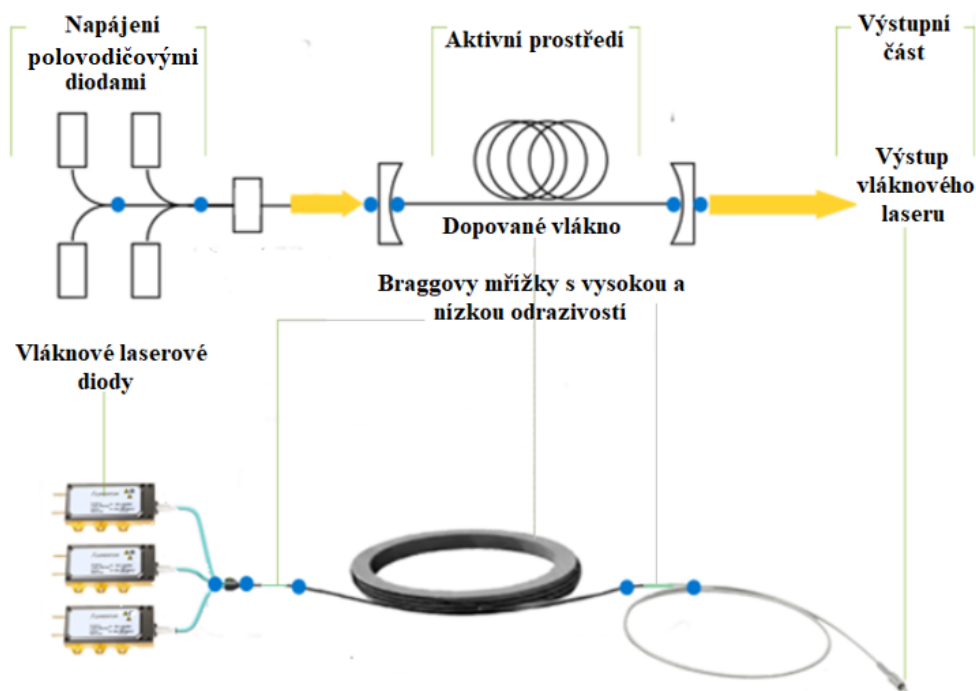


Obr. 10 Princip laserového řezání [18]

Po řezání laserem zůstává na obrobku patrná tepelně ovlivněná vrstva. To je hlavní nevýhoda všech nekonvenčních technologií s tepelným účinkem úběru materiálu.

1.3.3.2 Vláknový laser

V posledních letech dochází nejen při obrábění k nahrazování CO₂ laserů vláknovými lasery. Aktivní prostředí vláknového laseru je optické vlákno, které je dopováno prvky ze skupiny lantanoidů, jako je erbium nebo ytterbium. Optické vlákno je vyrobeno z křemičitého skla s přídavkem konkrétního prvku a plní funkci krystalu u pevnolátkových laserů. Je v něm vytvářen laserový paprsek a také funguje jako optický zesilovač. Napájení je řízeno prostřednictvím polovodičových diod, které emitují fotony. V jádře optického vlákna je potom generováno a zesilováno záření uzavřením těchto emitovaných fotonů. Optické vlákno vymezují Braggovy mřížky, které mají střídavou skleněnou strukturu s dvěma rozdílnými indexy lomu světla umístěnou přímo na jádře optického vlákna. Periodická změna struktury optického vlákna odráží pouze paprsek s vlnovou délkou optického záření. Při specifikaci požadovaného laseru je nutné uvažovat nad konkrétní aplikací vláknového laseru a podle toho volit průřez optického vlákna, to může mít kruhový, čtvercový nebo obdélníkový průřez. [3]



Obr. 11 Schéma vláknového laseru [19]

Jelikož jsou v optickém rezonátoru vynechána mechanická zrcadla, přináší to hned několik výhod. Zařízení není citlivé na mechanické poškození nebo vibrace. Velkou předností vláknového laseru je stabilita jeho paprsku. Laserový paprsek je generován uvnitř optického vlákna, které jej vede až ke skenovací hlavě, tudíž nevzniká požadavek na složitou přídavnou

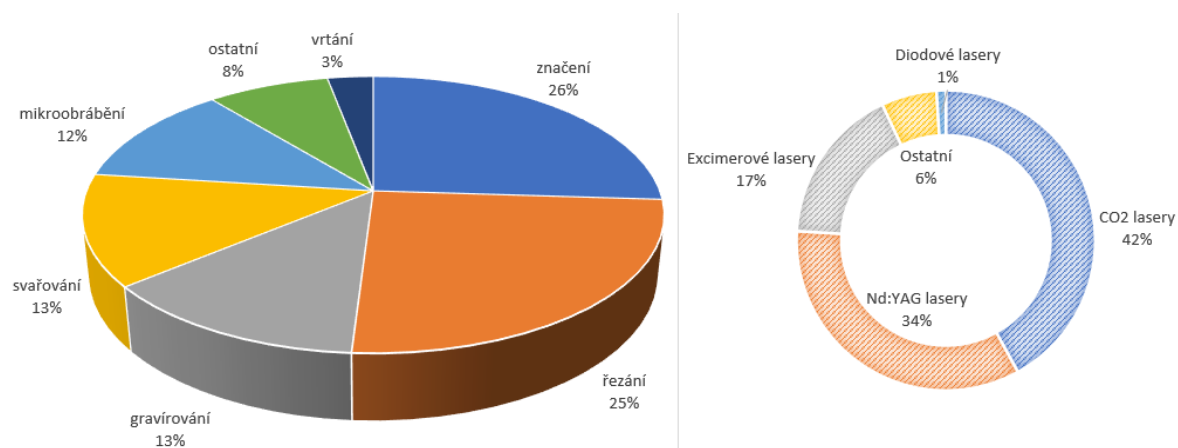
optiku. Schopnost fokusace paprsku i jeho účinnost (25 %) je též vysoká. Jelikož nehrozí významné tepelné ztráty, je možné chladit zařízení pouze vzduchem. Při nastaveném výkonu 100 W je možné dosáhnout zaostření paprsku na plochu menší než 5 μm s intenzitou záření více než 100 W/cm^2 . Životnost je mnohonásobně vyšší než u ostatních pevnolátkových laserů (150 000 hodin), kde je nutné měnit budicí diody nebo optický rezonátor s křehkými zrcadly. [3, 19]

Laser s optickými vlákny má nízké provozní náklady a zároveň vysokou kvalitu laserového paprsku. Polovodičové diody jsou levným zdrojem záření o vlnové délce 980 nm. Atomy erbia jsou excitovány absorbováním fotonů a při stimulované emisi zaujímají energeticky výhodnou metastabilní hladinu, na níž vyzařují fotony s vyšší vlnovou délkou. Vláknový laser tedy produkuje energeticky mohutný laserový parsek s vlnovou délkou 1550 nm. [3]

1.3.4 Aplikace laseru v průmyslu

Z hlediska vývoje a neustálých inovací zaznamenává laserová technologie uplatnitelnost v mnoha odvětvích průmyslu i jiných oborech. Lasery se dnes mimo jiné objevují v medicíně, chemii, spektroskopii nebo také v metrologii pro měření vzdáleností. Příkladem by mohl být laser interferometr. S přirozeným vývojem technických oborů, je předmětem výzkumu také zlepšování technických možností a příznivý vliv na finanční stránku provozu laserů. [5]

Co se týče procentuálního zastoupení konkrétních technologických aplikací, nad ostatními jednoznačně převažuje laserové značení (popisování) a řezání, jak je patrné z *Obr. 12*. Největší podíl na trhu činí plynové CO₂ lasery a hned za nimi jsou pevnolátkové Nd:YAG lasery. [9]



Obr. 12 Využitelnost laserů v průmyslu [9]

K průmyslovému značení nebo gravírování se používají lasery s nízkým výkonem okolo desítek wattů. K popisování kovových povrchů je vhodné použít pevnolátkové lasery s nízkou vlnovou délkou, naproti tomu pro obrábění dřeva jsou vhodnější CO₂ lasery s vysokou vlnovou délkou. Podstata fokusovaného laserového paprsku umožňuje bezdotykové gravírování složitých tvarů s vysokými detaily v jednom nízkonákladovém procesu výroby. [5]

Dělení materiálu laserem je velmi přesný proces, který zahrnuje především proces řezání a vrtání. Omezení nepředstavují ani křehké materiály s nízkou mírou odrazivosti. Kvalita řezu závisí na dodržení konstantní vzdálenosti trysky laserové hlavičky od obráběného materiálu. Důležitou roli hraje tloušťka řezaného materiálu a jeho vlastnosti. K vrtání se využívají rubínové a Nd: YAG lasery, díky nimž je možné vrtat drobné otvory tenkých materiálů. [3]

Pevnolátkovými lasery je možné také svařovat, výkon se ale pohybuje ve stovkách wattů. Výsledný svár je hluboký a zároveň úzký. Pnutí v materiálu je nízké i tepelně ovlivněná vrstva materiálu je menší než při klasickém procesu svařování. Laserové svařování nachází uplatnění v automobilovém průmyslu, kde je kladen důraz na kvalitu svaru bez významných nežádoucích jevů. Umožňuje vysoký stupeň automatizace a možnost svařování v těžko dostupných místech. Využívá se také ke drobným opravám jako jsou prasklinky a vyplnění hran u forem a nástrojů. [5]

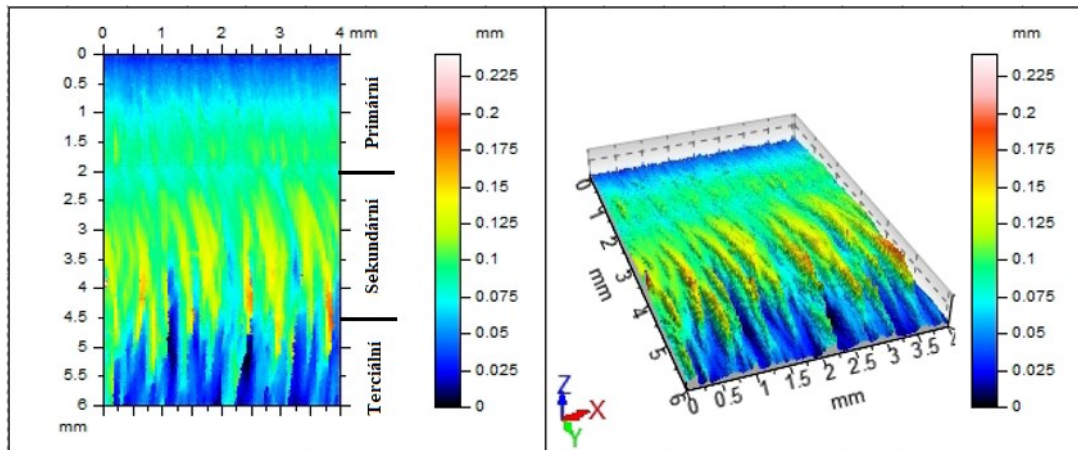
1.3.5 Vliv laserového paprsku na kvalitu řezné plochy

Pro dosažení požadované kvality řezné plochy je nutné brát v úvahu několik rozhodujících faktorů s přímým vlivem na kvalitu výsledného řezu a charakteristické chování laserového paprsku při interakci s řezaným materiálem.

Proces laserového řezání využívá vysokoenergetickou paprskovou technologii, která na řezné ploše zanechává stopy ve formě nepravidelného rýhování. Povrch není zcela hladký, a jeho členitost do značné míry negativně ovlivňuje jak kvalitu, tak i rozměrovou přesnost povrchu. Při bližším zkoumání nasnímaného povrchu na *Obr. 13* je patrné, že je možné kvalitu řezné plochy posuzovat v určité hloubce řezu podle dosahované drsnosti. Drsnost se výrazně mění a kvalita povrchu klesá kvůli postupné ztrátě intenzity laserového paprsku v průběhu řezání. [14]

Urychlené fotony laserového paprsku jsou fokusovány na malou plochu obrobku. V místě dopadu interagují s materiálem a dochází k přeměně světelné energie na tepelnou. Při rozrušování povrchu obrobku dochází ke ztrátě intenzity odevzdáním energie. Intenzita

laserového paprsku se dále snižuje s rostoucí hloubkou řezu. Díky tomu se paprsek v určité hloubce začne vychylovat a tím vytváří charakteristickou strukturu povrchu. Na povrchu je možné rozeznat přechod mezi primární a sekundární zónou, kde povrch začíná prudce hrubnout. [14]



Obr. 13 Primární, sekundární a terciální oblast drsnosti povrchu vzorku po laserovém řezání [autor]

Primární oblast se vyznačuje poměrně hladkým povrchem a je dána pouze řezným opotřebením. Sekundární, rýhovaná zóna je důsledkem deformačního opotřebením. V terciální oblasti je paprsek již natolik rozostřen z důvodu příliš nízké intenzity, že kvalita povrchu výrazně klesá a drsnost povrchu vykazuje náhodný charakter, který nelze statisticky hodnotit. [14]

Na základě prokázaného chování laserového paprsku je nutné se řídit doporučením maximální řezné tloušťky materiálu pro dosažení optimální kvality řezné plochy. Tab. 1 inspirovaná literaturou [4] udává pro jednotlivé materiály následující řeznou tloušťku. [14]

Tab. 1 Maximální doporučená tloušťka materiálu pro řezání CO₂ laserem [autor]

Řezání CO ₂ laserem s nastaveným výkonem 2 kW	
Řezaný materiál	Tloušťka [mm]
Nízkolegované ocele	18
Nerezavějící ocele	12
Hliník	6
Měď	4

Vlivy, které mají přímý dopad na kvalitu je možné rozdělit do několika kategorií na:

- Procesní parametry
- Charakter materiálu
- Kritéria pro hodnocení jakosti laserem řezaného povrchu

Procesní parametry zahrnují výkon paprsku, rychlost posuvu, šířku řezné mezery, úhel vychýlení paprsku a vliv přídavného plynu. Řezný materiál je charakterizován podle typu (sklo, keramika, kompozit, ocel, slitina) a podle termofyzikálních vlastností, jako je tepelná vodivost, povrchové napětí nebo schopnost absorbovat záření. [4]

Nejdůležitější skupinou jsou samotná kritéria pro hodnocení jakosti řezné plochy. Sleduje se úbytek materiálu, tvorba trhlin, zbytkové napětí nebo změna struktury povrchu materiálu. Nejčastěji je kvalita řezu hodnocena skrze tyto čtyři parametry: [4]

- šířka řezu
- rozsah tepelně ovlivněné vrstvy
- frekvence rýhování
- drsnost povrchu (nejčastěji vyjádřena amplitudovým parametrem Ra) [6,7]

Řezná rychlost a výkon laseru jsou stěžejní procesní parametry s přímým vlivem na kvalitu řezu. K nalezení optimálních procesních podmínek jsou nutná experimentální zkoumání, kde se zohlední vlastnosti vybraného materiálu, jeho tloušťka a konkrétní nastavené podmínky procesu řezání. Obecně ale platí, že při zvýšení výkonu a rychlosti posuvu dochází ke snížení drsnosti i snížení rozsahu tepelně ovlivněné vrstvy. Při požadavku zmenšení šířky zářezu, je nutné výkon snížit. Při vysokém výkonu totiž narůstá i příkon v místě řezu a oblast vznícení se tak rozšiřuje. [8]

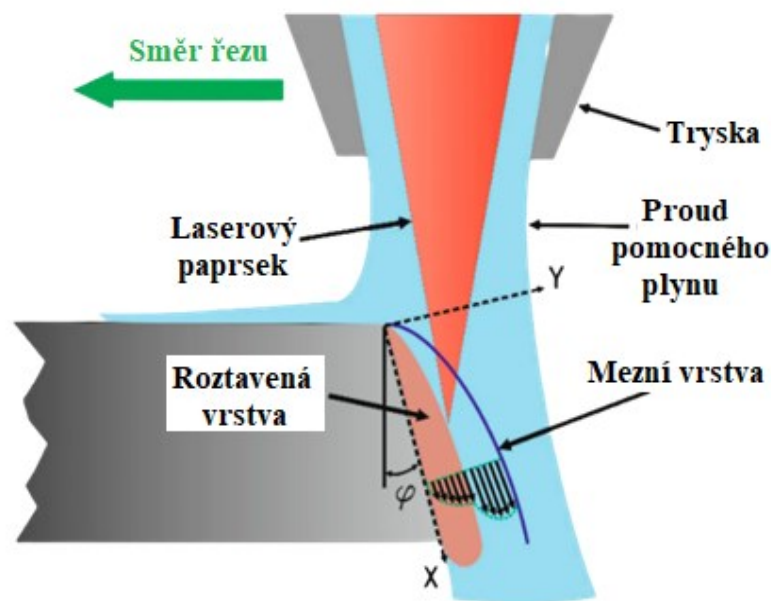
1.3.5.1 Současné trendy

Z nedávno publikovaných článků vyplývá, že je hojně diskutován vliv procesních parametrů na výslednou drsnost povrchu. Drsnost je určena především tvorbou kráterů a přilnavostí částic. Velikost kráterů je dána koncentrací laserového paprsku a jeho absorpcí obráběným povrchem. Kromě zvyšování výkonu spolu s rychlostí posuvu byly zkoumány také důsledky kombinace zvýšení výkonu s nižší vzdáleností trysky, které ukázaly vyšší hustotu energie laseru. Tento jev zapříčiňuje nižší drsnost díky tvorbě malých kráterů s nízkou přilnavostí částic. S rostoucí vzdáleností trysek při zachování vysokého výkonu hustota energie laseru klesá a tím drsnost roste. [6]

Samotné zvýšení výkonu laseru vede ke zlepšení tvorby toku taveniny. Jelikož se také zvyšuje teplota v oblasti řezání, roztavený kov déle chladne a tuhne, což vede k snadnějšímu odstranění z místa řezu. Tato výhoda je využívána hlavně při řezání plechů s tloušťkou nad 6 mm. S rostoucí tloušťkou obrobku vzniká na ploše řezu mírný profil tvaru V, jak se účinnost laserového paprsku snižuje. [7, 20]

Pozitivní vliv na drsnost a také na minimalizaci členitosti má zvýšení řezné rychlosti. Teplota řezné oblasti se tak sníží díky kratší interakci laserového paprsku s materiálem. Nevýhodou však zůstává obtížné odstranění roztaveného kovu z místa řezu. Čím vyšší je povrchové napětí i viskozita taveniny, tím víc se roztavený kov hromadí na dně řezné drážky, kde tuhne a vytváří povrchové zvlnění. Tento problém je možné eliminovat pouze opětovným snížením řezné rychlosti při níž ale narůstá teplota a zvyšuje se ulpívání strusky. [7, 20].

Nejen při řezání tlustých plechů je nutné maximální řeznou rychlost volit s ohledem na sílu vyvíjenou pomocným plynem uvnitř řezné spáry. Pokud není síla pomocného plynu dostatečná, dochází k nahromadění taveniny na čele řezu a hrozí vytvoření povrchového zvlnění. Pokud pomocný plyn správně proudí do řezné drážky, vytvoří se mezní vrstva, přes níž pomocný plyn přenáší svou hybnost na roztavený materiál. Na *Obr. 14* jsou znázorněny síly působící na roztavený materiál. [21]



Obr. 14 Laminární charakter mezní vrstvy [21]

Při řezání tenkých plechů je předpoklad zachování laminárního proudění v celém zářezu, protože malá hloubka zářezu nedovoluje mísení laserového paprsku s okolní atmosférou. Aby došlo k maximálnímu přenosu hybnosti pomocného plynu na taveninu u tlustých plechů je nutné zachovat mezní vrstvu v laminárním režimu. [21]

2 HODNOCENÍ JAKOSTI POVRCHU

Zásady pro hodnocení jakosti povrchů předepisuje Mezinárodní organizace pro normalizaci v technických normách ISO. Normy ČSN EN ISO 21920-2 a ČSN EN ISO 21920-3 popisují geometrické požadavky na výrobky. Jedná se o drsnost, vlnitost a základní profil povrchu. Normy stanovují termíny, definice a parametry pro určování struktury povrchu profilovou metodou. Geometrické parametry struktury zkoumaného povrchu se dělí do tří základních skupin: [22, 23]

- P parametr – vypočten ze základního profilu
- R parametr – vypočten z profilu drsnosti
- W parametr – vypočten z profilu vlnitosti

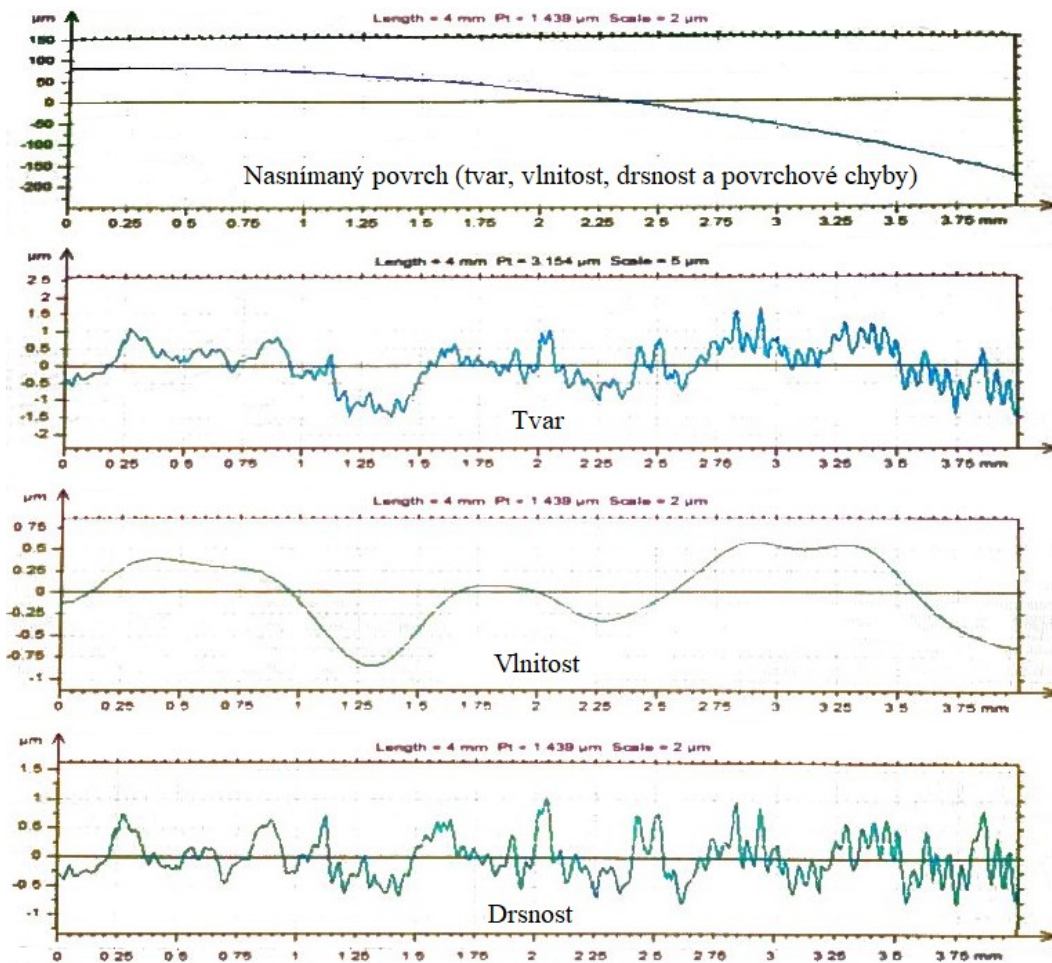
2.1 Struktura povrchu

Struktura povrchu nebo též textura je souhrnné označení pro opakující se geometrické odchylky povrchu od jeho ideálního tvaru. Tyto úchyly způsobuje deformace plynoucí z procesu obrábění. Příkladem je například špatná přímost vodicích ploch nebo nežádoucí teplo vznikající ze vzájemného kontaktu obrobku s nástrojem. Struktura povrchu je tvořena již zmíněným tvarem základního profilu, drsností a vlnitostí. Při praktickém zkoumání jakosti povrchu jsou parametry drsnosti a vlnitosti navzájem překryty v jednom snímku. Pro další analýzu je nutné, použitím vhodného filtru, parametry od sebe oddělit, jak znázorňuje *Obr. 15* na následující straně. [22, 34]

Při bližším zkoumání, je možné ve struktuře povrchu objevit i vady způsobené poškozením povrchu vzorku nesprávnou manipulací, nevhodně zvolenou obráběcí technologií nebo tepelným zpracováním apod. Nejčastěji se na povrchu objevují rýhy nebo otřepty, výjimkou nejsou ani praskliny nebo trhliny. Při analyzování struktury povrchu je nutné vždy vyjasnit, kam až sahá povrchová chyba, aby poškozená část povrchu negativně neovlivňovala například měření drsnosti, které se přes povrchové chyby neprovádí. [23, 34]

2.1.1 Základní profil

Základní profil se vyznačuje největší roztečí nerovností ve struktuře povrchu. Skutečný tvar základního profilu je možné získat odfiltrováním vlnitosti a drsnosti. K tomuto se využívá nejčastěji metoda nejmenších čtverců. Výsledkem je tvar, který se rozměrově shoduje s výkresovou dokumentací obrobku. [22]



Obr. 15 Nasnímaný povrch, filtrace tvaru základního profilu, vlnitosti a drsnosti [autor]

2.1.2 Vlnitost

Vlnitost povrchu je část textury, na které je nanesena drsnost. Je dána makronerovnostmi, které mohou být způsobeny například chvěním nebo vibracemi celé obráběcí soustavy, do níž spadá stroj, nástroj a obrobek. Tento negativní systematický vliv je možné eliminovat například pravidelnou kalibrací stroje nebo vhodně navrženou životností obráběcích nástrojů. Vlnitost lze odfiltrovat Gaussovým filtrem. [22, 24]

2.1.3 Drsnost

Drsnost povrchu se vyznačuje minimální roztečí nerovností. Je obrazem zvolené technologie obrábění. Stopy, které nástroj na povrchu zanechá, se řadí do kategorie mikronerovností. Na drsnost povrchu má přímý vliv charakter úběru materiálu, tvorba třísky a způsob jejího odvádění z obrobku, ale také materiál obrobku nebo použitá technologie. Proto jsou nekonvenční metody často voleny s ohledem na šetrný způsob obrábění, bez vzájemného kontaktu nástroje s obrobkem a dalších výhod, které z charakteru obrábění plynou. [22]

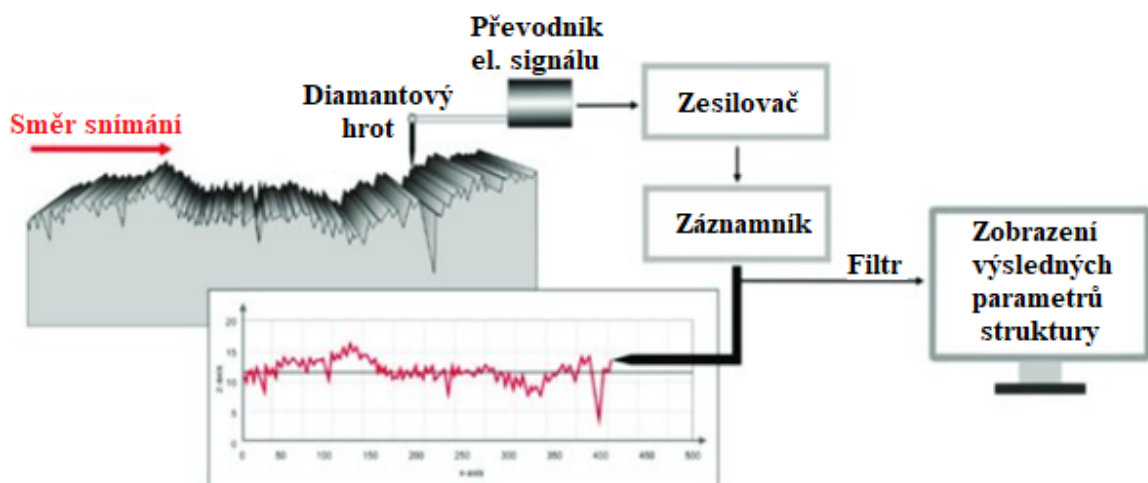
2.2 Metody měření povrchu

K měření povrchu je možné využít kvalitativní nebo kvantitativní metodu. V současné době zastaralá a málo využívaná je metoda kvalitativní. Hodnocení nasnímaného povrchu probíhá komparací s referenčním vzorkem, k čemuž se využívají povrchové vzorkovnice a komparačních mikroskopů. Metoda není přesná a je plně závislá na schopnostech obsluhy, na rozdíl od kvantitativní metody měření povrchu. Ta pracuje na principu matematického popisu povrchu, který je proveden optickým profilometrem. Výhodou profilometrů je schopnost analyzovat nejen drsnost povrchu, ale i jeho vlnitost a tvar. [15, 24, 34]

2.2.1 Kontaktní snímání povrchu

Kontaktní měřicí přístroje snímají povrchy speciálním diamantovým hrotem, který je přitlačnou silou přitahován a posouván po povrchu. Speciálně upravený hrot snímá souřadnice zkoumaného povrchu a úchylky jeho profilu. To, jakým způsobem mění hrot polohu na svislé ose, je způsobeno nerovnoměrnou strukturou povrchu. *Obr. 16* znázorňuje postup vyhodnocování nasnímaného povrchu. Změny polohy hrotu jsou převedeny na elektrický signál, který je zesílen, filtrován, a nakonec počítačově zpracován a vyjádřen pomocí zvolených parametrů struktury povrchu. [24, 34]

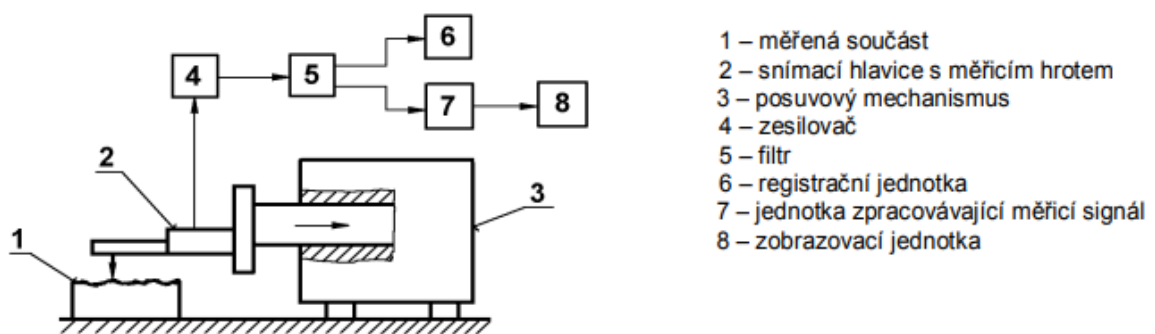
Pohyb snímacího hrotu musí být velmi přesný co do přímoty a konstantní rychlosti posuvu. Rychlost posuvu je volena s ohledem na dynamické změny ve vlastnostech snímaného povrchu. Na povrchu se mohou vyskytnout prudké změny povrchové drsnosti jako jsou krátery a rýhy nebo naopak otřepty a zbytkový materiál po nedokonalém obrábění. [25, 34]



Obr. 16 Princip měření drsnosti povrchu kontaktní metodou [24]

Kontaktní profilometr se skládá z elektrické a mechanické části. Jeho schématické uspořádání znázorňuje *Obr. 17*. Mechanická část obsahuje stůl, který slouží pro umístění měřené součásti, rameno se snímací hlavicí a upevněným hrotem. Podmínkou je dodržení konstantní rychlosti posuvu ramene a zajištění přímočarého vratného pohybu přidáním elektromotorkem. [25, 34]

Elektronická část slouží k transformaci mechanického signálu na elektrický. Tento mechanický signál je generován snímacím hrotem, který sleduje nerovnosti povrchu. Elektrický signál se zpracovává jako číselná hodnota příslušného parametru drsnosti nebo grafický záznam nerovnosti povrchu. [25]



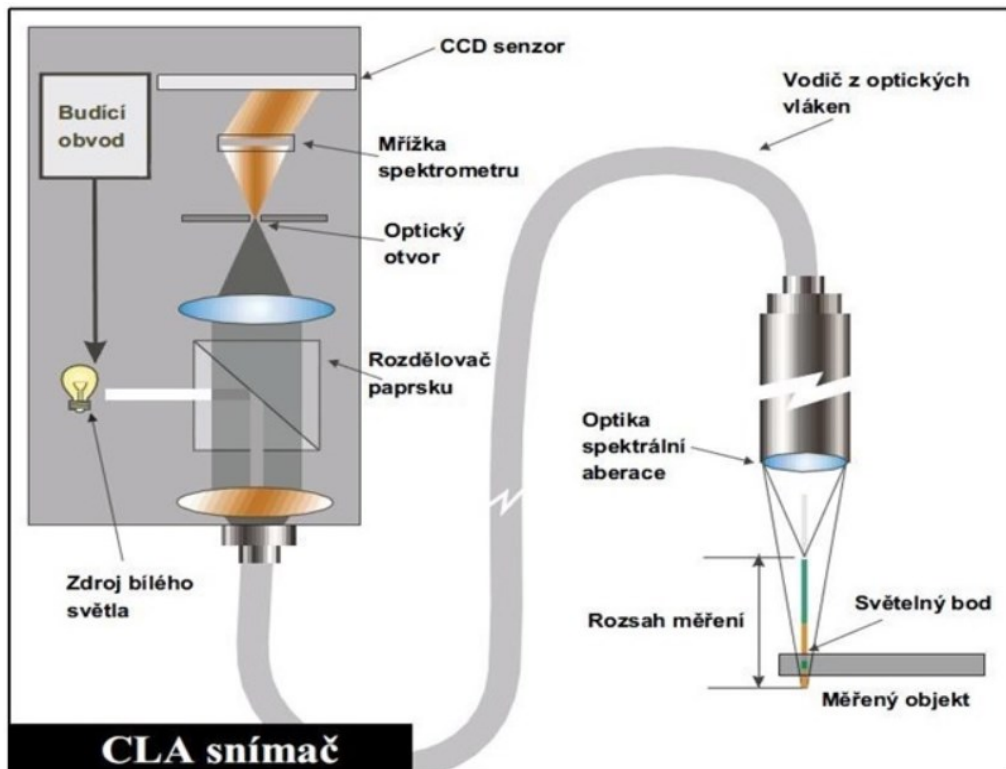
Obr. 17 Schéma kontaktního profilometru [25]

V praxi má kontaktní způsob snímání povrchu oproti bezkontaktnímu značnou výhodu, zvláště co se týče jednoduchosti obsluhy a tolerance vůči čistotě okolního prostředí i měřeného vzorku. Měřicí hrot není náchylný k povrchovým nečistotám. Dokáže je po povrchu odsunout a na správnost výsledků nemá vliv ani olejová vrstva nebo prachové částice. [24]

Mezi nedostatky kontaktního snímání povrchu ale bezpochyby patří zkreslení naměřených dat kvůli poloměru zaoblení snímacího hrotu, velikosti přitlačné síly hrotu k povrchu nebo rychlosti snímání. Kromě velkého rizika opotřebení a poškození snímače či povrchu, je zde také omezení pro měření některých druhů materiálů. Kontaktním způsobem např. nelze měřit elastomery, protože kvůli jejich vlastnostem by došlo k zaboření hrotu do povrchu. [24, 25]

2.2.2 Bezkontaktní snímání povrchu

Pro praktické hodnocení jakosti povrchů se využívají hlavně bezkontaktní přístroje. Nejčastěji se jedná o snímač CLA (angl. Chromatic Length Aberration) neboli snímač s chromatickou aberací délky, jehož princip je zobrazen na *Obr. 18*. Rozlišitelnost se pohybuje v řádech μm . Při použití laserových snímačů rozlišitelnost o řád klesá. [29, 34]



Obr. 18 Princip CLA snímače [29]

Budicí obvod atakuje zdroj bílého světla, z něhož míří paprsky na rozdělovač a optikou jsou směřovány na povrch vzorku. Světlo je rozloženo podle své vlnové délky. Na jednotlivých bodech povrchu je zaostřeno světlo jen určité vlnové délky. Z povrchu vzorku je světlo odraženo zpět a prochází optickým otvorem, který propustí pouze světlo zaostřené vlnové délky. Dále prochází mřížkou spektrometru, která jej vychyluje na senzor. Světlo odražené vlnové délky nese informaci o konkrétním bodu nasnímaného povrchu. Dále je mu přiřazena poloha a následuje počítačové zpracování naměřených dat. [28, 29, 34]

Značnou výhodou bezkontaktního způsobu měření povrchu je možnost zkoumání materiálů, které jsou citlivé na mechanické poškození nebo obecně měkkých materiálů, u nichž by mohlo dojít k poškrábání povrchu hrotem, při volbě kontaktního způsobu měření. Opatřebení či náchylnost k poškození bezkontaktního přístroje je daleko nižší než u dotykových snímačů. Samozřejmě jsou však i nevýhody, mezi něž patří vysoká pořizovací cena a také náklady na udržení vysokého stupně čistoty přístroje i okolního prostředí. Na měřeném povrchu se nesmí nacházet nečistoty ani zbytky olejové vrstvy, protože by mohlo dojít ke zkreslení naměřených dat z důvodu špatně odraženého paprsku od znečištěného povrchu. [27, 28, 29, 34]

2.2.2.1 Talysurf CLI 500

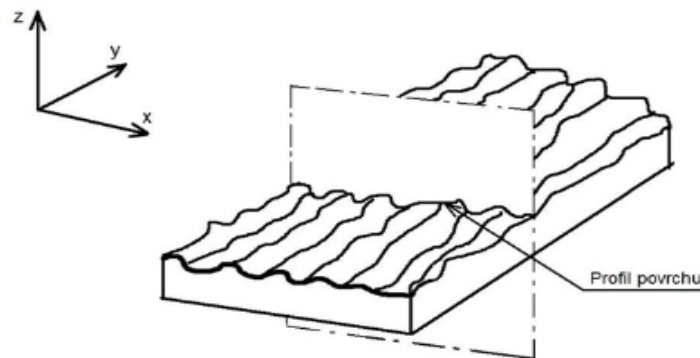
V praktické části diplomové práce byl k nasnímání heterogenního povrchu použit bezkontaktní profilometr Talysurf CLI 500 od firmy Taylor Hobson, který je zobrazen na *Obr. 19*. K bezkontaktnímu měření povrchu využívá 2D nebo 3D snímání. Při výběru 2D snímání je měřený povrch pomyslně rozdělen na křivky s co nejmenší konstantní vzdáleností od sebe (krok). Každá křivka představuje dráhu skenování přístroje a zaznamenává profil povrchu v konkrétním místě jako na *Obr. 20*. Výsledkem je nasnímaný povrch, který ve snímku obsahuje tvar základního profilu, vlnitost, drsnost ale i povrchové chyby. [26, 27]



Obr. 19 Talysurf CLI 500 [autor]

K analýze povrchu CLI systém využívá buď profil řezu získaný z 2D snímání nebo profil celé plochy při snímání ve 3D. Bezdotykový způsob měření pomocí systému CLI v sobě kombinuje CLA konfokální snímač a měření triangulační sondou s automatickým posuvem v osách x, y z. Příklad Talysurf CLI 500 je vhodný pro měření drobných součástí s možností

umístění na čtvercovou plochu se základnou 50 mm. Délka posuvu je rovněž 50 mm a rychlost posuvu dosahuje až 30 mm/s. Jakmile je povrch nasnímaný, je možné provést detailní analýzu drsnosti povrchu v kompatibilním programu Talymap GOLD, v němž uživatel nalezne veškeré informační i vyhodnocovací služby. [26]



Obr. 20 Princip 2D snímání povrchu bezkontaktně [22]

Je-li struktura povrchu homogenní, získané hodnoty parametrů povrchu jsou porovnány se specifikacemi v příslušné technické dokumentaci. Jedná-li se naopak o heterogenní strukturu povrchu, je nutné naměřené parametry vyhodnotit na každé ploše zvlášť. Pokud není blíže specifikován směr, v jakém má měření probíhat, volí se měření v kolmém směru na rovinu skutečného povrchu. V tomto směru jsou totiž očekávané kritické hodnoty jednotlivých parametrů drsnosti povrchu. [22, 23]

2.3 Parametry struktury povrchu

Jelikož v praxi není možné po žádném typu obrábění dosáhnout ideálního tvaru obrobku bez nerovností, jsou jeho geometrické odchylky hodnoceny příslušnými parametry struktury. K získání komplexních informací o vlastnostech povrchu stanovuje norma ISO ČSN EN 21920-2 geometrické požadavky na výrobky. Tato norma je základem pro objektivní hodnocení základního profilu povrchu s ohledem na funkci obrobku. Na základě provedené analýzy je možné zkoumat aktuální stav struktury, ale také predikovat možné změny ve struktuře v návaznosti na provozní aplikace zkoumaného povrchu. [22, 34]

Před výběrem konkrétních parametrů profilu nerovností k analýze struktury povrchu, je nutné zvolit předpokládanou drsnost povrchu například na základě zvolené technologie obrábění. Nejčastěji se předpokládaná drsnost povrchu volí v rozmezí (0,1-2) μm . Z Tab. 2 vyplývá, že základní délka pro měření drsnosti povrchu tak činí 0,8 mm a vyhodnocovaná délka 4 mm. [23]

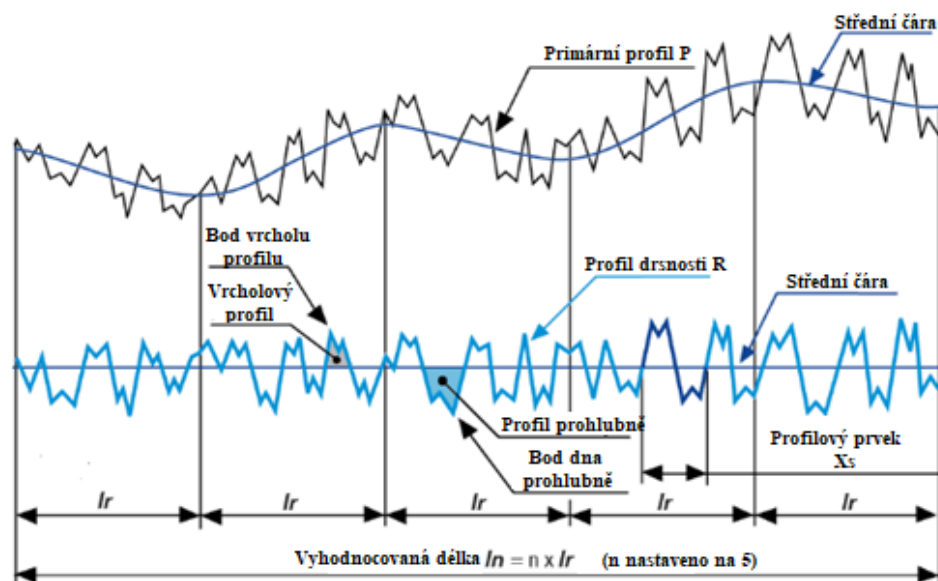
Tab. 2 Předpokládaná drsnost neperiodických profilů, základní délky pro měření [23]

Ra [μm]	Základní délka l_r [mm]	Vyhodnocovaná délka l_n [mm]
$0,006 < Ra \leq 0,02$	0,08	0,4
$0,02 < Ra \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < Ra \leq 2$	0,8	4
$2 < Ra \leq 10$	2,5	12,5
$10 < Ra \leq 80$	8	40

Základní délka l_r se měří ve směru osy x a slouží k nasnímání struktury povrchu. Ta je poté vyhodnocena a demonstrována na některém z příslušných parametrů struktury povrchu. Vyhodnocovaná délka l_n obsahuje zpravidla pět základních délek a komplexně posuzuje celý nasnímaný profil. [22, 23]

2.3.1 Amplitudové parametry

Nejčastěji je struktura povrchu hodnocena na základě amplitudových neboli výškových parametrů. Kromě základní a vyhodnocované délky k obecným pojmům patří i střední čára znázorněná na Obr. 21. [22]

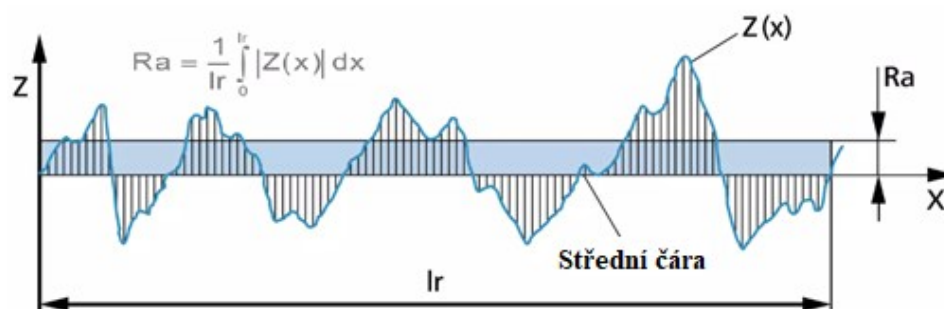


Obr. 21 Znáornění střední čáry, základní a vyhodnocované délky na profilu drsnosti povrchu [30]

Střední čára je přímka, která prochází středem vrcholů a prohlubní zkoumaného povrchu. Její konstrukce se provádí metodou nejmenších čtverců. Poloha střední čáry je určena tak, že součet čtverců úchylek čáry je minimální. Platí, že součet ploch nad střední čarou je roven součtu ploch pod střední čarou. [10, 22]

2.3.1.1 Průměrná aritmetická úchylka profilu povrchu R_a

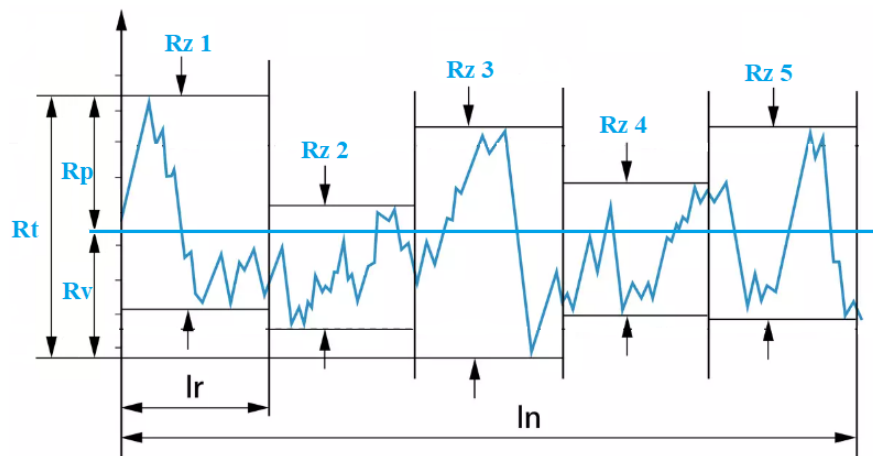
Tento výškový parametr graficky zobrazen na *Obr. 22* znázorňuje průměrnou aritmetickou úchylku profilu zkoumaného povrchu od střední čáry. Vypočítá se jako aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ v rozsahu základní délky. Jedná se o nejpoužívanější parametr k analýze struktury většiny povrchů. Stanovuje drsnost povrchu statistickou metodou s určitou pravděpodobností správnosti výsledků napříč zkoumaným povrchem. Obecně je možné konstatovat, že výškové parametry struktury povrchu jsou vhodné pro popis takových povrchů, jejichž geometrické odchylky se napříč zkoumaným povrchem významně neliší a přechody v drsnosti jsou plynulejší. [15, 22, 31]



Obr. 22 Průměrná aritmetická úchylka profilu povrchu [31]

2.3.1.2 Největší výška profilu R_z

Největší výšku profilu v rozsahu základní délky udává parametr R_z . Celkový vzhled je charakterizován souborem nerovností. R_z se vypočítá jako součet maximálního výstupku R_p a maximální prohlubně R_v . Parametr R_z je negativně ovlivněn hloubkou a četností rýh povrchu, proto může o povrchu podávat zkreslené informace. V rozsahu vyhodnocované délky se poté určuje celková výška profilu R_t . [22, 31]



Obr. 23 Největší výška profilu [31]

2.3.2 Frekvenční parametry

Frekvenční neboli délkové parametry struktury povrchu se měří v podélném směru a k charakterizaci drsnosti povrchu využívají rozteče nerovností na zkoumaném povrchu. [22]

2.3.2.1 Průměrná šířka prvků profilu R_{Sm}

Tento délkový parametr vyjadřuje střední vzdálenost mezi prvky profilu vztažených ke střední čáře v rozsahu základní délky. Šířka mezi přechodem dvou extrémů na profilu se značí X_s . Aritmetický průměr těchto šířek vyjadřuje parametr R_{Sm} . [15, 22, 31]



Obr. 24 Průměrná šířka prvků profilu [15]

Parametr R_{Sm} se využívá při optimalizaci procesních podmínek obrábění, například při volbě optimální rychlosti posuvu, která má přímý vliv na kvalitu výsledného povrchu. [31]

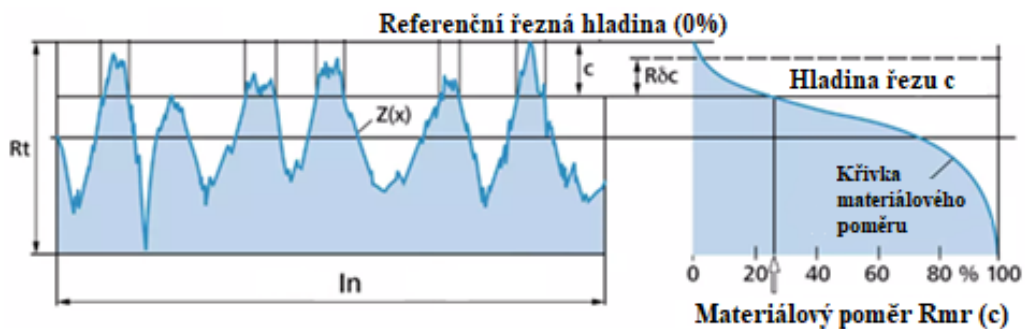
2.3.3 Hybridní parametry

Hybridní neboli tvarové parametry využívají k hodnocení drsnosti povrchu kombinaci amplitudy a rozteče. V praxi nejsou hybridní parametry příliš využívány, spíše jsou voleny amplitudové parametry pro jednoduchou interpretaci. V experimentální části diplomové práce byly pro hodnocení drsnosti heterogenního povrchu využity právě hybridní parametry kvůli vhodnému popisu naměřených dat. [22]

2.3.3.1 Materiálový podíl drsnosti profilu R_{mr}

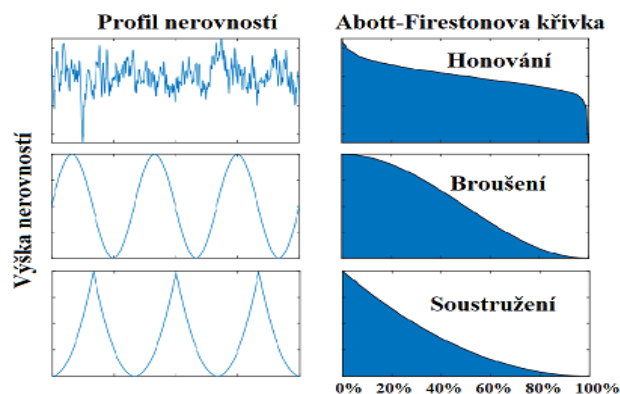
Materiálový poměr R_{mr} se vyjadřuje v procentech a udává poměr délky nosné plochy vůči celkové měřené délce v určité hloubce řezu c. 0% poměr znázorňuje špičku vrcholu a naopak 100% poměr znamená nejhlubší rýhu na povrchu. Materiálový poměr R_{mr} vyjadřuje křivka materiálového podílu tzv. Abbott-Firestonova křivka. Sestrojuje se vynesáním hodnot R_{mr} v hloubce celého profilu. Křivka udává materiálový podíl v závislosti na hladině řezu c.

Rozdíl výšky úseku profilu R_{dc} udává svislou vzdálenost mezi úrovněmi dvou úseků materiálového poměru, jak je znázorněno na *Obr. 25*. [15, 22, 32]



Obr. 25 Materiálový podíl drsnosti profilu [32]

Hybridní parametry mají velký význam při hodnocení struktury povrchu. Při konvenčním obrábění jsou k hodnocení drsnosti vhodné amplitudové nebo frekvenční parametry, protože obrobek vykazuje homogenní charakter. Hodnota parametru R_a se na celé ploše obrobku liší jen statisticky nevýznamně. Nosná křivka může klasifikovat homogenní povrch s ohledem na charakter obrábění, jak je znázorněno na *Obr. 26*. Při použití nekonvenčních technologií vzniká heterogenní povrch s rozdílnou kvalitou v hloubce řezu. Proto je vhodné popsat takový povrch spíše hybridními parametry, jak je učiněno v praktické části. [22, 32]



Obr. 26 Tvar Abbott-Firestonovy křivky v závislosti na obrábění [33]

2.4 Heterogenní povrch

K hodnocení je nutné přistupovat individuálně s ohledem na rozdílné vlastnosti heterogenního povrchu ve všech směrech. Vhodné je snímat povrch bezkontaktně kvůli prudkým změnám v drsnosti. V určitých částech může mít povrch stejné vlastnosti, ale jako celek je struktura různorodá. Proto se heterogenní povrch pomyslně rozděluje na 3 části viz. *Obr. 13*. Data z jedné části vykazují minimální rozdíly. Struktura povrchu je potom hodnocena v každé části zvlášť. [14, 15]

2.4.1 Vznik heterogenního povrchu po laserovém řezání

Heterogenní povrch obecně vzniká po použití některého z typů nekonvenčních technologií. Řezání laserovým paprskem na povrchu zanechává charakteristickou členitost v podobě rýhování, které se však s hloubkou řezu mění v závislosti na ztrátě intenzity paprsku. Při vstupu do materiálu si paprsek v primární části zachovává intenzitu a tvoří nejpřesnější tvarovou oblast s minimální drsností. Od určité hloubky nastupuje přechodová oblast, kde je možné pozorovat pokles kvality řezu způsobený snížením intenzity paprsku. Kvalita povrchu tedy klesá a drsnost naopak roste. Poslední fáze řezu se vyznačuje nejhorší geometrickou stálostí. Drsnost povrchu má náhodný charakter. Paprsek je rozostřen a znehodnocuje tak kvalitu povrchu. Terciální oblast se nemusí vždy vyskytovat, záleží na tloušťce a vlastnostech řezaného materiálu. [14, 20]

2.4.2 Vlastnosti heterogenního povrchu

Z charakteru chování laserového paprsku vyplývá, že s rostoucí hloubkou řezu ztrácí paprsek svou intenzitu. Při řezání odevzdává energii, slábne, a proto dochází k jeho ohybu. Tento jev má přímý vliv na tvar i kvalitu řezné plochy. V určité hloubce (lišící se druhem, tloušťkou řezaného materiálu), se zhoršuje kvalita řezného povrchu. Primární část s nejlepší kvalitou a minimální drsností přechází v sekundární. Nastupuje charakteristické rýhování povrchu. S rostoucí hloubkou řezu se tento jev zvyrazňuje až přechází v terciální oblast, kde je laserový paprsek zcela rozostřen a kvalita povrchu znehodnocena. Proto je v příslušných literaturách uváděna maximální doporučená tloušťka řezaného materiálu, právě s ohledem na minimalizaci tohoto nežádoucího jevu. [14, 15]

Se vznikem rýhování nastupuje v procesu systematický vliv. Takto ovlivněný povrch není snadné analyzovat. Pokud se na povrchu vyskytuje i terciální část, proces nesplňuje podmínky opakovatelnosti, a protože drsnost má náhodný charakter, je analýza této části povrchu znemožněna. Hodnocení heterogenních povrchů není jednoduché. Důležité je držet se doporučené hodnoty řezané tloušťky pro konkrétní materiál, optimalizovat nastavení rychlosti posuvu a vhodné intenzity laserového paprsku. Pokud by byla intenzita laserového paprsku na počátku příliš vysoká, došlo by k tavení primární vrstvy. Při počáteční nízké intenzitě zase může ve struktuře povrchu předčasně docházet k tvorbě terciální oblasti s náhodným charakterem drsnosti povrchu. Také je třeba rozhodnout, zda je vhodné hodnotit primární a sekundární oblast zvlášť, nebo nalézt globální způsob pro hodnocení celé struktury heterogenního povrchu v jedné statistické operaci. [14, 15]

3 STATISTICKÉ HODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT

V předchozí kapitole byl popsán vznik a vlastnosti heterogenního povrchu, způsoby snímání a hodnocení jeho jakosti pomocí parametrů struktury. Před tím, než mohou být naměřená data statisticky vyhodnocena použitím vhodné metody, je nutné si uvědomit, že každé měření je zatíženo chybou.

3.1 Chyby měření

V souboru dat se mohou objevit hned tři druhy chyb. Před začátkem statistické analýzy je nutné soubor dat prověřit na existenci hrubých a systematických chyb. K tomu slouží exploratorní datová analýza. Hrubé chyby nelze korigovat, musí být ze souboru odstraněny, protože by negativně ovlivnily výsledek analýzy. Nejčastěji jsou způsobeny buď lidským faktorem nebo poruchou stroje. Dále je zapotřebí odhalit nastupující systematický vliv v podobě výskytu systematických chyb. Tyto chyby lze odstranit korekcí (kalibrací stroje), protože jsou nejčastěji dány metodou měření nebo nesprávnou kalibrací stroje. V datech se samozřejmě nachází i náhodné chyby, které není možné eliminovat. Ve statistickém souboru se budou vždy vyskytovat. [10, 13]

3.2 Teorie hypotéz

Mezi základní metody statistického hodnocení naměřených dat patří testování statistických hypotéz. Na začátku je provedena formulace nulové hypotézy H_0 , která představuje rovnovážný stav, např.: předpoklad existence normálního rozdělení. Proti ní je stanovena hypotéza alternativní H_a , která tento rovnovážný stav popírá. Následně je vybrán vhodný parametrický test pro ověření stanovených hypotéz. Na základě výsledků zvoleného testu je s určitou pravděpodobností provedeno rozhodnutí o H_0 a H_a . Ve statistice se vždy udávají výsledky testů s určitou pravděpodobností nikoli jako fakt. [10, 13, 35]

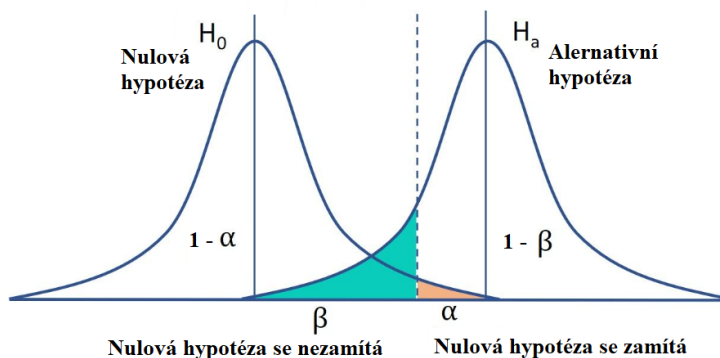
Data pro statistickou analýzu pochází z výběrového souboru, což je vždy jen reprezentativní vzorek dat ze základního souboru. V praxi není možné analyzovat všechna data ze základního souboru z důvodu jejich množství a časově náročného sběru hodnot při měření. Na základě zkoumání náhodného výběrového souboru jsou potom usuzovány výsledky pro celou populaci. Právě z tohoto důvodu mohou nastat při rozhodování o nulové hypotéze chyby popsané v *Tab. 3*. Důležité je zmínit, že hypotézu lze nezamítnout či zamítnout ve prospěch jiné hypotézy, nikoli ji s určitostí potvrdit. Rozhodnutí o hypotézách se děje

s pravděpodobností $1-\alpha$, kde α je hladina významnosti. Nejčastěji se volí 5 %. Výsledky testování jsou tak udávány s přijatelnou možností omylu v řádu 5 %. [10, 13, 35]

Tab. 3 Rozhodování o nulové hypotéze [36]

	Výsledek statistického testování	
	Nezamítám H_0	Zamítám H_0
Platí H_0	Správné rozhodnutí Pravděpodobnost $1 - \alpha$ (spolehlivost)	CHYBA I. DRUHU Pravděpodobnost α (hladina významnosti)
Platí H_A	CHYBA II. DRUHU Pravděpodobnost β	Správné rozhodnutí Pravděpodobnost $1 - \beta$ (síla testu)

Při rozhodování o nulové hypotéze může nastat několik situací, které nejsou vždy správné. Pokud ve skutečnosti platí H_0 , ale na základě testování výběrového souboru je tato hypotéza i přesto zamítnuta, nastane chyba prvního druhu. Pravděpodobnost takového rozhodnutí leží na hladině významnosti α . Druhým problémem je chybné nezamítnutí H_0 , když platí H_A . Tento omyl je chybou druhého druhu s pravděpodobností rozhodnutí β . [13, 35]



Obr. 27 Vzájemný vztah mezi nulovou a alternativní hypotézou [36]

Snahou statistických testů je minimalizovat obě chyby dosažením co nejvyšší síly testu $1-\beta$, a zároveň nízké hladiny významnosti α . Veličiny α a β jsou navzájem nepřímo úměrné, a proto je nutné volit kompromis mezi těmito požadavky. [35]

Rozhodnutí o nulové hypotéze se provádí na základě vypočtené P hodnoty v Tab. 4.

Tab. 4 Rozhodnutí o nulové hypotéze na základě P hodnoty [autor]

P hodnota	Rozhodnutí	Pravděpodobnost
$P \leq \alpha$	Zamítám H_0	$1-\alpha$
$P \geq \alpha$	Nezamítám H_0	$1-\alpha$

3.3 Exploratorní datová analýza

Exploratorní datová analýza slouží k průzkumu naměřených dat. Vyšetřuje statistické zvláštnosti dat, jako je přítomnost odlehlých hodnot (potenciálních hrubých chyb), lokální koncentrace dat nebo tvarové zvláštnosti v rozdělení. Obecně se předpokládá Gaussovo rozdělení pravděpodobnosti. Pokud je rozdělení dat asymetrické, tak se před samotným testováním provádí vhodná úprava dat. Na základě provedené analýzy výběrového souboru je proveden odhad chování celku. [13]

Exploratorní datová analýza postupuje ve třech základních krocích. Nejprve je nutné určit typ dat, následně vybrat vhodný způsob grafického vykreslení hodnot pro znázornění průběhu měření a jednotlivých závislostí v datech. Z grafického zobrazení jsou dobře patrné extrémní hodnoty, které je nutné otestovat, zda se jedná jen o lokální maxima či minima nebo o odlehlé hodnoty, které je potřeba ze souboru odstranit. Posledním krokem je volba vhodných metod pro samotné hodnocení dat. Metody se liší podle typu zkoumaných dat. Výsledkem zkoumání jsou tedy vypočtené parametry nebo nalezené funkce, které jsou voleny s ohledem na získání přesných informací o naměřených datech. [13]

V následujících podkapitolách jsou vybrány jen některé způsoby grafického zobrazování dat a pár parametrů pro hodnocení s ohledem na využití v praktické části, kde byla exploratorní datová analýza (EDA) použita pouze k získání prvotních informací o datech.

3.3.1 Kvalita dat

Aby bylo možné zhodnotit kvalitu naměřených dat a dále s nimi pracovat, je nutné určit, o jaký typ se jedná. Základní rozdělení dat je na:

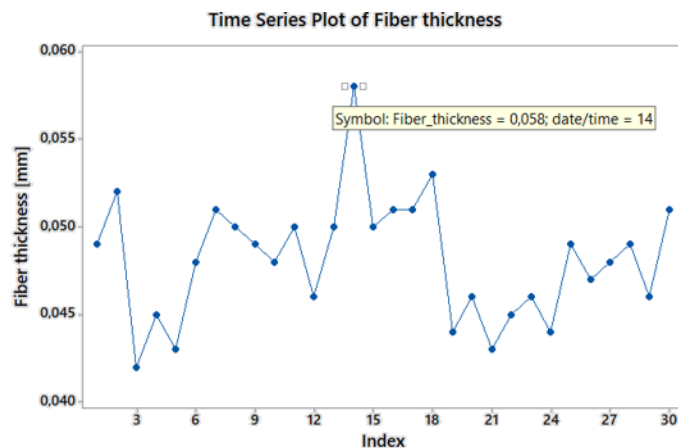
- Kvalitativní (nominální a ordinální)
- Kvantitativní (spojitá a diskrétní)

Data se v zásadě dělí hlavně z toho důvodu, že pro každý typ je vhodný jiný způsob statistického hodnocení. Kvalitativní data jsou obecně nečíselná a popisují kvalitu věcí a jevů. Nominální data nelze porovnávat mezi sebou, aplikovat na ně matematické operace, umožňují pouze třídění. Jedná se například o barvy. Ordinální data lze uspořádat, porovnat jejich kvalitu podle pořadí, ale neudávají informaci o vzájemných rozdílech. [13]

Kvantitativní data lze vyjádřit číselnou hodnotou. Spojitá data nabývají jakýchkoli hodnot z určitého intervalu. V příkladu se jedná o výšku nebo teplotu. Naproti tomu diskrétní data mohou nabývat pouze celočíselných hodnot z daného intervalu. [13]

3.3.2 Grafické zobrazení dat

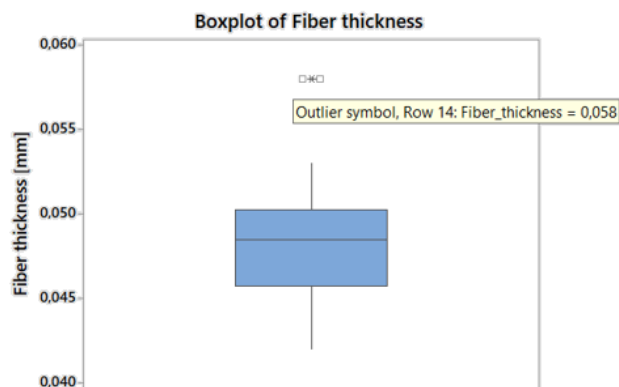
Grafické zobrazení naměřených hodnot slouží k vizualizaci zkoumaných dat. Jedním z těchto nástrojů je i graf časové řady, známý pod názvem time series plot. Graf časové řady zobrazuje data v závislosti na jejich pořadí v po sobě jdoucím časovém intervalu. Na *Obr. 28* je uvedena aplikace grafu pro znázornění naměřených hodnot určitého parametru. [13]



Obr. 28 Graf časové řady [autor]

Time series plot je vhodným nástrojem pro sledování trendu v datech nebo odhalení odlehlých hodnot. Jak je z obrázku patrné, 14. hodnota v pořadí se jeví jako odlehlá. Toto podezření je třeba ověřit.

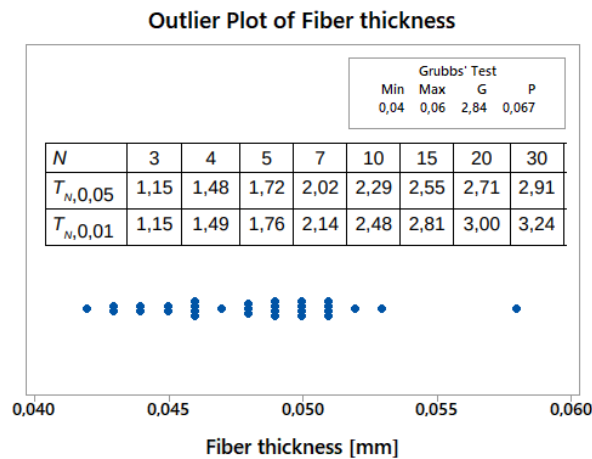
Vhodný způsob pro identifikaci možné odlehlé hodnoty je rozptylový diagram, nazývaný podle svého tvaru box plotový diagram. K hodnocení dat jsou využívány kvartily. Soubor je tak rozdělen na čtyři stejně početné oblasti po 25 %. Rozlišujeme dolní kvartil x_{25} , medián x_{50} , a horní kvartil x_{75} . Na *Obr. 29* je znázorněn outlier s hodnotou tloušťky 0,058 mm. [13]



Obr. 29 Rozptylový diagram [autor]

Objektivní vyloučení extrémní hodnoty je provedeno až na základě vypočteného testovacího kritéria z Grubbsova testu odlehlých hodnot, který je znázorněn na *Obr. 30*.

Nulová hypotéza předpokládá, že podezřelá hodnota je pouze lokální maximum. Alternativní hypotéza toto popírá s pravděpodobností $1-\alpha$. Hladina významnosti α je stanovena na obvyklých 5 %.



Obr. 30 Grubbsův test odlehlých hodnot [autor]

Z Obr. 28 je patrné, že soubor obsahuje 30 měření. Pro 30 hodnot je kritická hodnota testovacího kritéria při stanovené hladině významnosti 2,91. Z Grubbsova testu plyne, že se podezřelá hodnota vzdaluje od průměru pouze o 2,84 směrodatné odchylky. Jedná se tedy o lokální maximum a hodnota bude v souboru ponechána. Toto rozhodnutí podporuje i vypočtená P hodnota. Jelikož je P hodnota větší než zvolená hladina významnosti α , tak na základě Tab. 3 nezamítám H_0 s pravděpodobností omylu 5 %.

3.3.3 Metody hodnocení dat

Po grafickém prozkoumání dat, kde je odhalen trend v datech a provedeno prověření dat na hrubé chyby či odlehlé hodnoty, následuje volba vhodné metody pro hodnocení naměřených dat. Metody nebo parametry jsou vybírány s ohledem na získání požadovaných informací. V této podkapitole jsou uvedeny základní parametry pro hodnocení výběrového souboru dat, jako je aritmetický průměr, směrodatná odchylka a variační koeficient. Výpočetní vztahy těchto parametrů jsou uvedeny na Obr. 31. [13]

Aritmetický průměr	Směrodatná odchylka	Variační koeficient
$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N x_i$	$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$	$v_x = \frac{s_x}{\bar{x}} \cdot 100$

Obr. 31 Základní parametry pro hodnocení naměřených dat [autor]

Aritmetický průměr vyjadřuje typickou hodnotu výběrového souboru. Z jeho vlastností vyplývá, že je citlivý na znehodnocení v případě ponechání odlehlých hodnot a hrubých chyb ve statistickém souboru. Právě kvůli možnosti jeho vychýlení a ztráty reprezentace hodnot se zavádí směrodatná odchylka. Ta udává průměrnou odchylku od aritmetického průměru. Pokud jsou si prvky v souboru navzájem podobné, je směrodatná odchylka minimální. Kolik procent z aritmetického průměru činí směrodatná odchylka udává variační koeficient. Je relativní mírou variability a není ovlivněn absolutními hodnotami výběrového souboru. [13]

Tyto parametry spolu s uvedeným grafickým zobrazením slouží v experimentální části pro získání prvotních informací o naměřených datech drsnosti povrchu.

3.4 Regresní analýza

Regresní analýza představuje sofistikovaný přístup k popisu naměřených dat. K jejich charakterizaci využívá funkční popis vyplývající z lineárního nebo nelineárního modelu. Regresní analýza podrobně zkoumá vztah mezi dvěma a více proměnnými (vliv nezávisle proměnné na závisle proměnnou). Regresní analýza se velmi podobá té korelační, až na jeden hlavní rozdíl. Při korelaci nelze ze vzájemného vztahu proměnných rozhodnout, která z nich je závislá a nezávislá. Regresní analýza dává odpověď na otázku příčinné souvislosti mezi statistickými znaky a také umožňuje provádět regresní odhady u obtížně měřitelných veličin na základě známých hodnot jiné veličiny. [10, 11, 12]

3.4.1 Tvorba regresního modelu

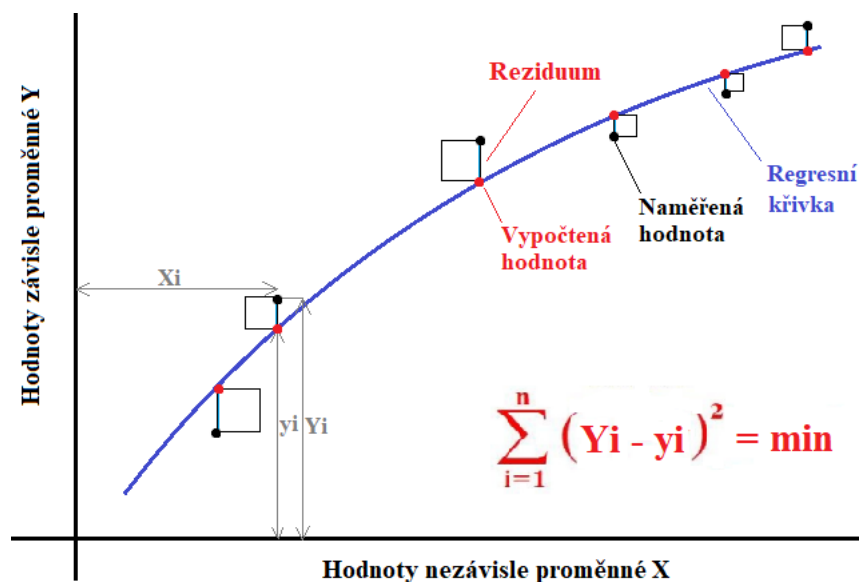
Při tvorbě regresního modelu se postupuje následovně. Jakmile jsou data nahrána ve statistickém softwaru, je nutné vybrat typ regrese podle vhodného regresního modelu a rozhodnout, která proměnná je závislá a nezávislá. Lineární regrese je volena při očekávaném lineárním vztahu mezi spojitou závislou proměnnou a nezávislou proměnnou. Naproti tomu nelineární regrese je vhodná pro popis diskrétních proměnných. Po vygenerování výstupu regresního modelu, je provedeno rozhodnutí o významnosti proměnných. Mohou nastat dva případy: [10, 11, 12]

- $P \leq \alpha$ Nezávisle proměnná má statisticky významný vliv na závisle proměnnou!
- $P \geq \alpha$ Nezávisle proměnná má statisticky nevýznamný vliv na závisle proměnnou!
To znamená, že mezi nimi neexistuje regresní závislost.

P hodnota neukazuje sílu vlivu, pouze významnost vzájemného vztahu proměnných. Sílu vlivu udává příslušný koeficient. Čím vyšší je jeho hodnota, tím silnější je vzájemný vliv.

3.4.2 Lineární regrese

Pro tvorbu lineárního regresního modelu se nejčastěji využívá metoda nejmenších čtverců zobrazená na *Obr. 32*. K aproximaci naměřených dat je zvolena vhodná přímka, parabola nebo obecný polynom předem známého stupně. Daná přímka splňuje podmínku nejvhodnějšího proložení dat, protože minimalizuje součet čtverců odchylek ve vertikálním směru od přímky pro všechny vynesené body. Přímka nemusí procházet vnesenými body v grafu, ale musí nejlépe charakterizovat trend výskytu bodů. [11, 15]



Obr. 32 Aproximace metodou nejmenších čtverců [autor]

Na základě regresního modelu je stanovena regresní rovnice pro závisle proměnnou.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon_i \quad (1)$$

Kde: y_i – závisle proměnná

β_0 – konstanta

β_1, \dots, β_n – koeficienty nezávisle proměnných

ε_i – naměřená chyba (reziduum)

Výsledkem se odhad regresních koeficientů. Ty znázorňují, o kolik jednotek se v průměru zvýší závisle proměnná, když se nezávisle proměnná zvýší o jednu jednotku. Základní hodnotu závisle proměnné neboli intercept představuje konstanta β_0 . [11, 15]

Sklon regresní přímky je dán odhadem vypočteného regresního koeficientu. Čím vyšší je hodnota regresního koeficientu, tím vyšší je míra vzájemného vztahu mezi proměnnými a také sklon přímky. V praxi to znamená, že malá změna nezávisle proměnné na ose x vyvolává velkou změnu v závisle proměnné na ose y . [11, 13]

Výstupem lineárního regresního modelu, který je dán metodou nejmenších čtverců, je koeficient determinace R^2 . Tento koeficient vyjadřuje těsnost modelu neboli kvalitu, jakou model popisuje naměřená data. Nabývá hodnot od 0 do 100 %. Za vhodný model popisu dat se považuje takový model, který má koeficient determinace 80 % a více. Vždy je ale potřeba zhodnotit, jestli není možné nalézt ještě vhodnější model k charakterizaci dat. [11, 13]

3.4.3 Nelineární regrese

Při snaze o nalezení nejvhodnějšího modelu k popisu dat je někdy nutné přistoupit k složitějšímu typu regresní analýzy. Nelineární regrese matematicky vychází z předchozího případu, je ale doplněna o vhodný polynom, díky němuž se změní tvar křivky, kterou jsou proložena naměřená data. Nejčastěji se využívá nelineární regrese kvadratická či kubická (tedy nelineární regrese polynomu druhého či třetího stupně). [11, 12]

3.4.3.1 Gauss-Newtonova metoda

Principem Gauss-Newtonovy metody je linearizovat nelineární regresní funkci kolem aktuálního odhadu neznámého parametru. Tato derivační metoda minimalizuje nelinearitu metodou nejmenších čtverců. Výsledkem je nalezení minima příslušné nelineární funkce. Výhodou je rychlost nalezení minima, které závisí na stupni nelinearity modelu. [10, 37]

3.4.3.2 Levenberg Marquardtova metoda

Levenberg Marquardtova metoda představuje smíšený derivační algoritmus, který v sobě kombinuje dva numerické minimalizační algoritmy (Gauss-Newtonovu metodu a metodu gradientního sestupu, kde je sledován největší spád). Chování LM metody se blíží gradientové metodě, pokud jsou odhady parametrů vzdáleny od optimálních hodnot. V opačném případě je charakter chování podobný Gauss-Newtonově metodě. [10, 38]

LM algoritmus dokáže pružně aktualizovat obě složky díky parametru tlumení λ . Pokud některá iterace vede k horší aproximaci, je parametr λ automaticky zvýšen. V opačném případě se snižuje. Metoda se tak podobá čistě Gauss-Newtonově metodě a nalezení lokálního minima je rychlejší. [38]

4 SHRUTÍ TEORETICKÉ ČÁSTI

Náplň teoretické části byla volena s ohledem na použité statistické metody a parametry struktury povrchu k hodnocení naměřených dat, které je provedeno v praktické části.

V úvodu teoretické části je proveden vhled do nekonvenčních technologií obrábění. Jelikož data v experimentální části pocházejí z heterogenního povrchu, který jak je známo, charakteristicky vzniká právě po použití některého z typů nekonvenčního způsobu obrábění. V této kapitole je značná část věnována obrábění laserovým paprskem, který byl použit při řezání zkoumaných vzorků. Kapitola je zakončena uvedenými vlivy laserového paprsku na kvalitu řezné plochy, z nichž plyne, že i při vhodném nastavení řezných parametrů se na povrchu materiálu objevují stopy po laserovém paprsku. Z charakteru chování paprsku vyplývá, že drsnost s hloubkou řezu roste, a právě tato skutečnost bude blíže zkoumána v experimentální části. Kde k popisu drsnosti heterogenního povrchu byly vybrány hybridní a frekvenční parametry místo obvyklých amplitudových. Jejich aplikace a výklad výsledků je sice snadný, ale není vhodné volit amplitudové parametry k hodnocení povrchů, u nichž se drsnost v rozsahu zkoumané plochy významně mění.

V závěru teoretické části je diskutováno statistické hodnocení naměřených dat heterogenního povrchu. Jsou zde uvedeny teoretické základy regresní analýzy i vybraných parametrů exploratorní datové analýzy.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je najít vhodnou statistickou metodu pro popis heterogenního povrchu s ohledem na jeho charakteristickou strukturu. Výběr statistického nástroje a modelu pro hodnocení je nutné také doložit důkazem o jeho vhodnosti. Pro tento účel bude využito sady 10 vzorků žáruvzdorné oceli, která byla řezána laserovým paprskem, díky němuž povrch vykazuje heterogenní charakter.

Každý z těchto vzorků bude podroben měření na bezkontaktním profilometru Talysurf CLI 500. Výsledkem úpravy naměřených dat bude struktura heterogenního povrchu vyjádřena kombinací hybridních a frekvenčních parametrů. Obvykle se k hodnocení heterogenních povrchů přistupuje stejně jako k povrchům, u nichž se drsnost významně nemění napříč plochou. Drsnost je tedy často vyjádřena amplitudovými parametry. Existence primární a sekundární oblasti s rozdílnou kvalitou povrchu bývá opomíjena a kvalita povrchu je tak hodnocena zvlášť.

Úkolem praktické části této diplomové práce je navrhnout a ověřit způsob globálního hodnocení drsnosti heterogenního povrchu. Ke splnění takového zadání je nutné získat o heterogenním povrchu podrobné informace, proto se hodnocení bude skládat z exploratorní datové analýzy, která poskytne prvotní informace a dále z regresní analýzy. Snahou tedy bude nalezení funkční závislosti příslušného parametru struktury na poloze řezu heterogenního povrchu. V následujících kapitolách je uveden podrobný postup, jak byly vzorky měřeny, následná práce s naměřenými daty, a nakonec analýza naměřených dat s využitím exploratorní datové analýzy k získání prvotních informací o datech a finální řešení za pomoci lineární a nelineární regresní analýzy.

6 SPECIFIKACE VZORKŮ

Ke zkoumání heterogenního povrchu bude využita sada ocelových vzorků, která byla připravena pomocí laserové technologie. Z charakteru laserového řezání vyplývá, že povrch po řezání vykazuje typickou členitost, která je způsobena poklesem intenzity laserového paprsku a jeho ohybu. S rostoucí hloubkou řezu tento jev vede k rozostřování paprsku. Charakter řezného povrchu na vzorcích je proto heterogenní.

6.1 Materiál

Vzorky pro analýzu jsou vyrobeny z žáruvzdorné oceli X15CrNiSi pod označením 1.4828 (dle neplatného ČSN 17 251). Jedná se o ušlechtilou austenitickou ocel, která je legována převážně chromem a niklem. Legující prvek chrom zajišťuje žáruvzdornost oceli. Materiál se tak stává odolný proti plynům a spalinám až do teploty cca 1050 °C. Z toho důvodu je tento typ oceli vhodný k výrobě průmyslových pecí nebo kotlů. Mezi další kladné vlastnosti patří dobrá obrobitelnost a svařitelnost různými metodami. Kromě žáruvzdornosti ocel vykazuje i korozní odolnost za vysokých teplot. Odolnost proti korozi roste s přidáním legujícího prvku niklu, který také přispívá ke stabilizaci krystalové mřížky.

6.1.1 Chemické složení

V následující tabulce je popsáno chemické složení žáruvzdorné oceli 1.4828 s ohledem na procentuální zastoupení legujících prvků. Kromě zmíněného chromu a niklu obsahuje žáruvzdorná ocel další prvky, které přispívají k jejím kladným vlastnostem.

Tab. 5 Chemické složení žáruvzdorné oceli 1.4828

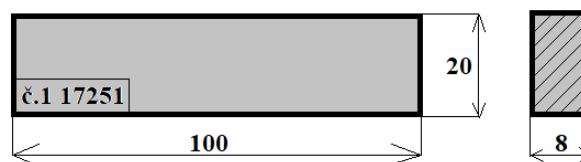
Chemické složení 1.4828	
legující prvek	Obsah [%]
Cr	19 až 21
Ni	11 až 13
Mn	max 2
Si	1,5 až 2
N	0,11
C	max 0,2

Žáruvzdorné oceli mohou obsahovat také stopové množství síry a fosforu. Do chromniklových ocelí se často přidává ještě titan a molybden pro zlepšení mechanických vlastností materiálu.

6.2 Laserová technologie

K analýze heterogenního povrchu byly vybrány vzorky ze zásoby metrologické laboratoře Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Laboratoř se nachází na fakultě Technologické (budova U15, místnost 219). Heterogenní povrch na vzorcích vznikl po použití technologie laserového řezání. Vzorky byly připraveny pomocí vláknového laseru LYNX FL-3015 Belgické značky laserových řezacích strojů LVD. Tento typ je určen k řezání železných i neželezných materiálů. Vyznačuje se vysokou řeznou rychlostí a kvalitou řezu za nízkých provozních nákladů. Při laserovém obrábění záleží na kombinaci vhodně zvolených řezných parametrů k dosažení optimální kvality řezné plochy.

Polotovarem pro tvorbu vzorků byl plech o tloušťce 8 mm. Velikost jednotlivých vzorků po vyřezání je uvedena na následujícím *Obr. 33*.



Obr. 33 Rozměry vzorku [autor]

Každý vzorek je označen pořadovým číslem pro zajištění identifikace při měření drsnosti řezné plochy. Při analýze struktury povrchu nebudou jednotlivé vzorky hodnoceny zvlášť, ale identifikace je nutná. Kdyby při skladování nebo manipulaci se vzorky došlo k poškození některého z řezných povrchů, měřením by toto bylo zachyceno, je také nutné povrch příslušného vzorku vizuálně prozkoumat a rozhodnout, o dalším postupu.

6.2.1 Řezné parametry vláknového laseru

Na výslednou kvalitu řezného povrchu mají vliv vlastnosti materiálu, ale hlavně procesní parametry. Hlavními parametry jsou řezná rychlost a výkon laseru, které mají zásadní vliv na kvalitu řezu. Na *Tab.6* jsou uvedeny hlavní řezné parametry.

Tab. 6 Řezné parametry vláknového laseru pro řezání žáruvzdorné oceli 1.4828 [autor]

Řezné parametry 1.4828			
Výkon laseru	3 kW	Tlak plynu	15 bar
Řezná rychlost	800 mm/min	Průměr trysky	3,5 mm
Frekvence	5 kHz	Ohnisková vzdálenost	- 8 mm

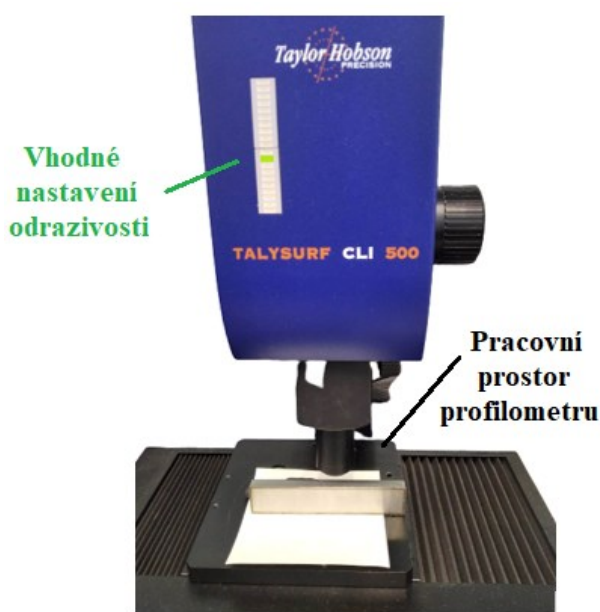
Nastavením vysokého výkonu i řezné rychlosti se obecně dosahuje nízké hodnoty drsnosti povrchu a minimální tloušťky tepelně ovlivněné vrstvy.

7 MĚŘENÍ VZORKŮ

Samotné měření 10 vzorků žáruvzdorné oceli 1.4828 proběhlo rovněž v metrologické laboratoři Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně na bezkontaktním profilometru Talysurf CLI 500. V této kapitole budou detailně popsány jednotlivé kroky, které povedou k získání podrobných informací o měřeném povrchu v podobě zvolené kombinace frekvenčních a hybridních parametrů struktury povrchu.

7.1 Talysurf CLI 500

Heterogenní povrch byl nasnímán ve 2D na bezkontaktním profilometru Talysurf CLI 500. Na *Obr. 34* je zobrazen profilometr s ustaveným vzorkem před zahájením měření. Princip tohoto přístroje je popsán v teoretické části v 2. kapitole. Výhodou je, že po nasnímání povrchu je možné získaná data převést na 3D vizualizaci. Tato možnost přispívá k ucelenému pohledu na kvalitu řezné plochy. Je také skvělým základem pro další analýzu.



Obr. 34 Ustavení vzorku do pracovního prostoru měřicího přístroje [autor]

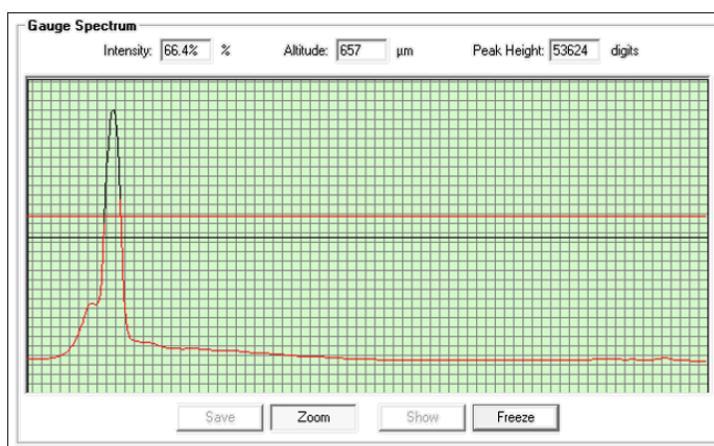
Při 2D snímání je zkoumaný povrch měřen po jednotlivých drahách skenovacího přístroje. Výstupem ze skenovacích drah jsou křivky profilu povrchu, které mají od sebe nastavenou konstantní vzdálenost neboli krok. Každá křivka zobrazuje profil povrchu v konkrétním místě. Jakmile je povrch nasnímán, je počítačově vygenerován snímek povrchu, který obsahuje jak tvar základního profilu, vlnitost, drsnost, ale i povrchové chyby. Dalším úkolem je úprava naměřených dat, která spočívá ve vyrovnání povrchu a vygenerování hodnot statistických parametrů.

7.1.1 Kalibrace přístroje

Zkušební vzorek byl instalován do pracovního prostoru přístroje (do zorného pole) na papír, aby nedošlo k poškrábání. Před samotným měřením je nutné provést kalibraci měřicího přístroje. Po ustavení vzorku je provedeno načtení nulových bodů. Jsou to koncové body pracovního prostoru přístroje, které software porovná s nastavenými nulovými body v programu a pokud neshledá statisticky významnou odchylku, počáteční kalibrace je tímto dokončena a může být zahájeno měření zkušební vzorku. V opačné případě je nutná řízená kalibrace odpovědnými osobami z firmy Taylor+Hobson k odstranění chyby polohy nulových bodů.

7.1.2 Nastavení odrazivosti

U bezkontaktních přístrojů je nutné nastavit optimální hladinu odrazivosti zkoumaného povrchu. Z heterogenního charakteru se předpokládá, že se na povrchu mohou vyskytovat tzv. hraniční oblasti, které se vyznačují náhlými změnami v tvaru profilu povrchu. Světelný paprsek se od těchto míst obtížně odráží zpět do detektoru. Proto jsou data z těchto míst softwarem často vyloučena a nahrazena s využitím interpolace okolního povrchu. Nastavením optimální odrazivosti, uvedené na *Obr. 34*, lze eliminovat množství vyloučených dat při měření zkušebních vzorků a přispět k vyšší integritě naměřených dat povrchu. Optimální hladina odrazivosti by se měla pohybovat v rozmezí od 40 % do 70 %. Na *Obr. 35* je uvedena hodnota ustálené odrazivosti (66,4 %) při měření zkušebních vzorků.



Obr. 35 Nastavení odrazivosti při měření vzorků [autor]

7.1.3 Nastavení parametrů měření

Jakmile byla provedena kalibrace a nastavení odrazivosti, zbývá nastavit parametry samotného měření. Na *Obr. 36* jsou uvedeny všechny příslušné parametry. Na každém

vzorku byla zvolena shodná velikost měřené plochy (v ose x 4 mm a v ose y 6 mm). Skenování povrchu probíhalo rovnoběžně s osou x po krocích o velikosti 25 μm . Rozlišení měřeného povrchu obsahovalo 241 řezů o 161 bodech.

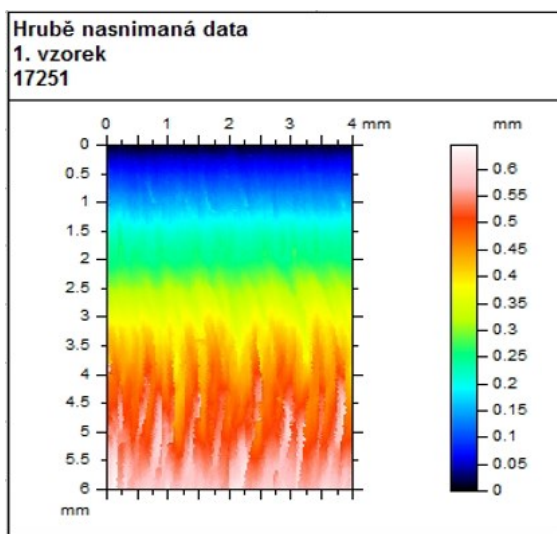
Size		
	X (mm)	Y (mm)
Beginning:	64.376	32.6655
End:	68.376	38.6655
Length:	4	6
Resolution:	161	241 (points, traces)
Spacing:	25	25 (μm , μm)
Speed		
Measurement speed:	500 $\mu\text{m/s}$	
Speed on return:	1 mm/s	
Estimated duration:	1 h 00 min	

Obr. 36 Nastavení měřicích parametrů a časový odhad měření [autor]

Po nastavení všech uvedených parametrů byl softwarem proveden časový odhad pro měření prvního vzorku. Na základě rychlosti měření, stanovené na 500 $\mu\text{m/s}$ byl časový odhad na měření jednoho vzorku přesně hodinu. Tímto způsobem byly postupně změřeny všechny vzorky z připravené sady.

7.2 Úprava naměřených dat

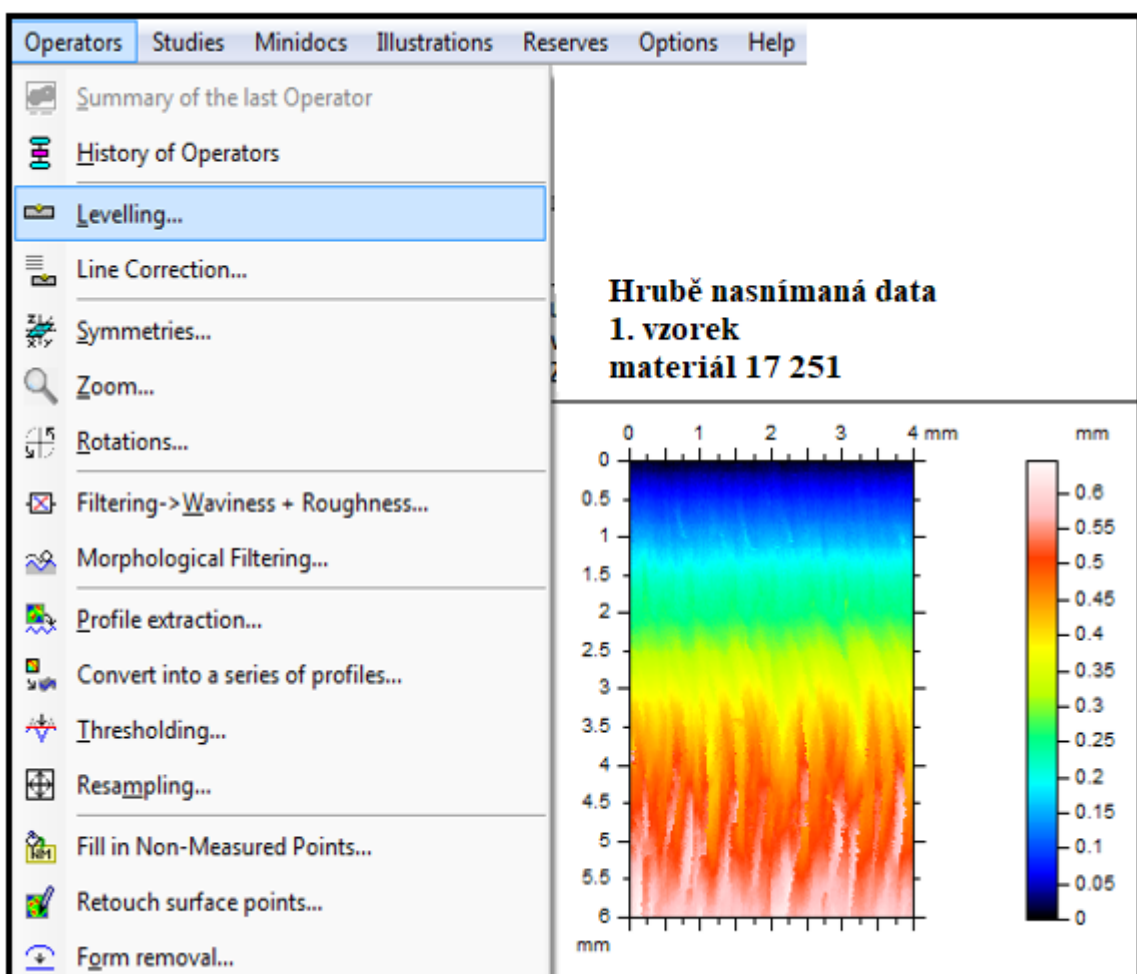
Výsledkem skenování povrchu je vygenerovaný snímek hrubě nasnímaných dat znázorněn na Obr. 37. Tento prvotní sken není určen ke statistickému hodnocení, proto je nutné provést několik úprav, na jejichž konci budou zvolené parametry struktury povrchu reprezentovat naměřený povrch se všemi jeho vlastnostmi.



Obr. 37 Hrubě nasnímaná data – prvotní sken [autor]

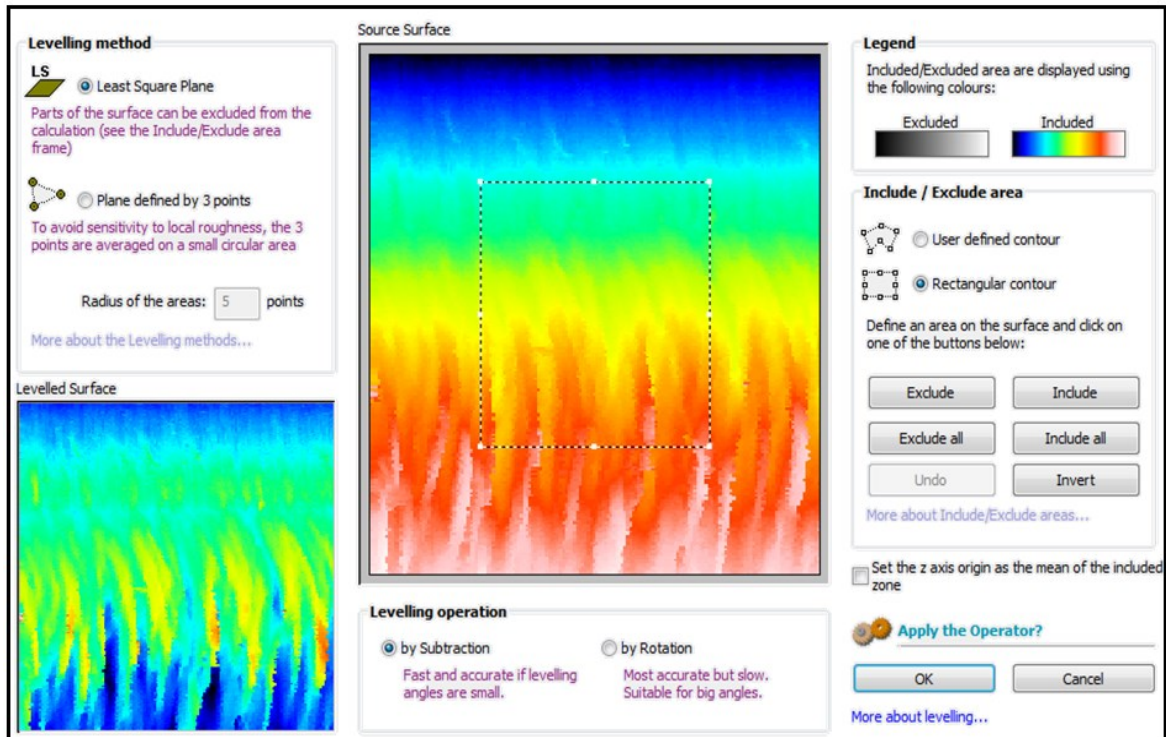
7.2.1 Vyrovnání povrchu

Jelikož při ustavování vzorku mohou i drobné nerovnosti na jeho základně způsobit nedokonalé usazení a tím i nasnímání povrchu nikoliv v rovině, ale pod neznámým úhlem. Proto je prvním krokem úpravy dat vyrovnání povrchu funkcí *Leveling*, jak je znázorněno na Obr. 38. Vyrovnání povrchu je možné provést různými metodami, pro úpravu dat byla zvolena metoda nejmenších čtverců (*Least Square Plan*), jak popisuje Obr. 39. Jelikož je povrch nasnímán pod minimálním úhlem volím možnost rychlého vyrovnání (by Subtraction). Tvar vyrovnané plochy definuje naznačený obdélník (*Rectangular contour*).



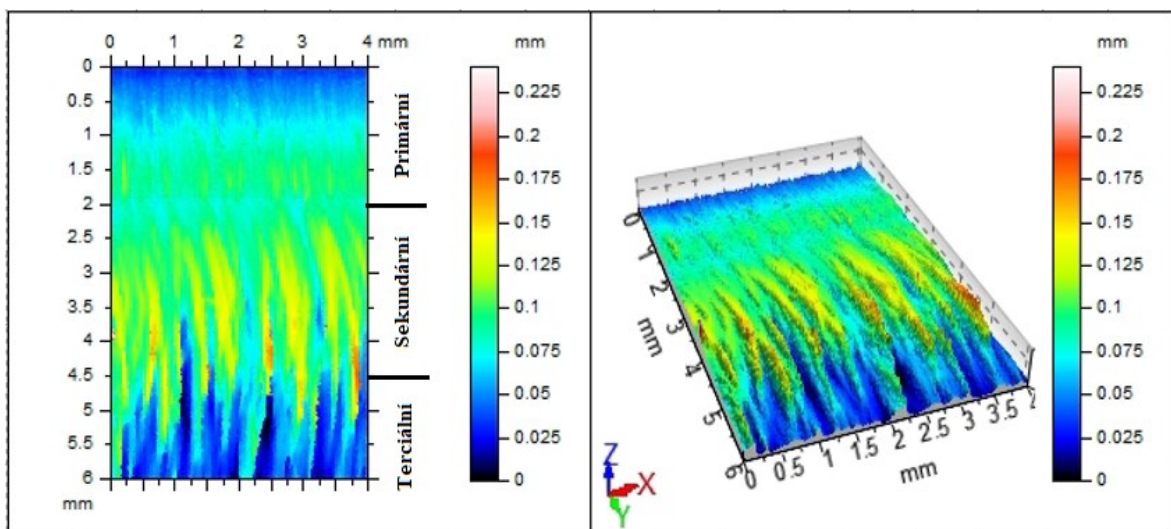
Obr. 38 Vyrovnání povrchu funkcí *Leveling* [autor]

V záložce *Operators* budou využity v dalších krocích ještě funkce *Convert into a series of profiles* k rozdělení povrchu na jednotlivé profily a *Form removal* k úpravě získaných parametrů struktury povrchu.



Obr. 39 Nastavení vyrovnání povrchu metodou nejmenších čtverců [autor]

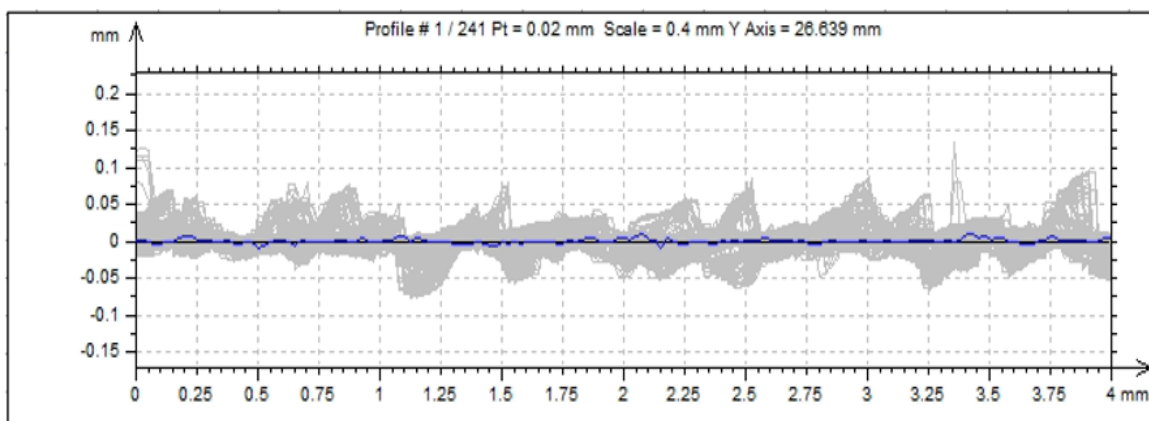
Výsledkem je odfiltrovaný tvar nasnímaného povrchu. Pro názornost je Obr. 40 doplněn o 3D vizualizaci naměřeného povrchu. Při bližším zkoumání je možné rozpoznat jednotlivé oblasti s rozdílnou kvalitou povrchu. Primární oblast, která je dána řezným opotřebením, sekundární část s prudkým nárůstem charakteristického rýhování, a nakonec terciální oblast, kde má drsnost povrchu náhodný charakter a pro statistickou analýzu jsou data z této oblasti zcela nevhodné.



Obr. 40 Vyrovnaný povrch ve 2D + 3D vizualizace [autor]

7.2.2 Rozdělení povrchu na jednotlivé profily

Druhým důležitým krokem je rozdělení povrchu na jednotlivé profily, přesněji řečeno na 241 řezů o 161 bodech. V softwaru Talymap GOLD v záložce *Operators* bylo zvoleno rozřezání povrchu do řady profilů (*Convert into a series of profiles*), viz Obr. 38. Dále byl nastaven vodorovný směr řezu jednotlivých profilů a započtení všech 241 profilů do tvorby grafu, který znázorňuje rozřezání povrchu na Obr. 41.



Obr. 41 Grafické znázornění rozřezání povrchu na jednotlivé profily [autor]

7.2.3 Vygenerování statistických parametrů

Až na základě vygenerovaného grafu je možné přistoupit k vyjádření statistických parametrů ze záložky *Studies*. V automatické předvolbě jsou tak zobrazeny všechny parametry (amplitudové, frekvenční i hybridní). Jelikož pro účely statistické analýzy diplomové práce byly vybrány jen některé parametry, provedla jsem jejich výběr příkazem *Parametr list*. Ve vygenerovaném dialogovém okně byly nastaveny všechny potřebné parametry. Nastavení jednotlivých parametrů je uvedeno v následujících tabulkách.

Tab. 7 Nastavení jednotlivých parametrů struktury povrchu v Talymap GOLD [autor]

ČSN EN ISO 21920-2			
Hybridní parametry	Rmr	[%]	c = 10 μm
	Rδc	[μm]	20 % - 80 %
Frekvenční parametr	RSm	[mm]	Xs

U materiálového podílu drsnosti profilu byla hladina řezu c nastavena na 10 μm pod nejvyšším výstupkem. Rozdíl výšky úseku profilu Rδc udává svislou vzdálenost mezi dvěma úrovněmi dvou úseků materiálového poměru (mezi 20 % a 80 %). Parametr RSm značí

průměrnou šířku prvků profilu Xs neboli přechod dvou extrémů na profilu vztažených ke střední čáře. [22]

Tab. 8 Nastavení filtrů v Talymap GOLD [autor]

Nastavení filtrů	
Typ filtru	Gaussian
Velikost filtru	0,8 mm
Koncových body	započteny ✓

Pro všechny výše zmíněné parametry byl filtr nastaven podle Tab. 8. Po zobrazení potřebných parametrů je ještě nutné zobrazit hodnoty parametru v jednotlivých profilech příkazem *List of statistical parameters*. Obr. 42 zobrazuje finální podobu upravených dat, které jsou přichystány k exportu do statistického softwaru Minitab 17, kde budou podrobeny analýze.

ISO 4287		1	2	3	4	5	6	7	8
Material Ratio parameters - Roughness profile									
Rmr	%	93.023	68.992	82.946	93.798	86.047	100	99.225	84.496
Rdc	mm	0.003	0.003	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.005
Spacing parameters - Roughness profile									
RSm	mm	0.165	0.167	0.175	0.172	0.158	0.154	0.187	0.213

Obr. 42 Finální podoba naměřených dat ze softwaru Talymap GOLD [autor]

V řádcích jsou zobrazeny zvolené parametry reprezentující strukturu povrchu a ve sloupcích jsou zastoupeny jednotlivé profily povrchu od 1. po 241.

7.2.4 Export naměřených dat

Jelikož software Talymap GOLD neumožňuje uživatelsky přívětivý export naměřených dat rovnou do statistických softwarů, bylo nutné finální data pro analýzu převést nejdříve do WordPadu, upravit v Excelu a až poté exportovat do vybraného statistického softwaru.

8 ANALÝZA NAMĚŘENÝCH DAT

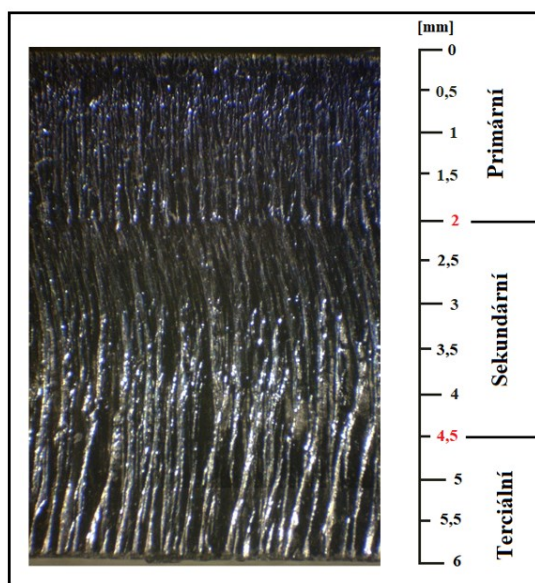
Pro účely analýzy dat byl vybrán statistický software Minitab 17 a pro doplňující informace bude použit QC Expert.

8.1 Ověření heterogenity

Díky 3D vizualizaci dat na profilometru je možné ověřit heterogenní charakter povrchu a provést rozdělení na jednotlivé oblasti podle rozdílné kvality povrchu (primární, sekundární a terciální část), jak je uvedeno na *Obr. 40*. Primární oblast vykazuje nejnižší hodnoty drsnosti a je dána pouze řezným opotřebením. Sekundární část se vyznačuje prudkým narůstáním drsnosti povrchu. Při pohledu na vzorek je patrná jeho charakteristická struktura. Nakonec nastupuje terciální oblast, kde drsnost povrchu vykazuje náhodný charakter, protože intenzita laserového paprsku natolik poklesla, že způsobila jeho ohyb. Parsek si tak nedokáže zachovat původní řezné vlastnosti a negativně působí na kvalitu. Pro statistickou analýzu jsou data z této oblasti zcela nevhodná, jelikož byly řezné podmínky výrazně ovlivněny.

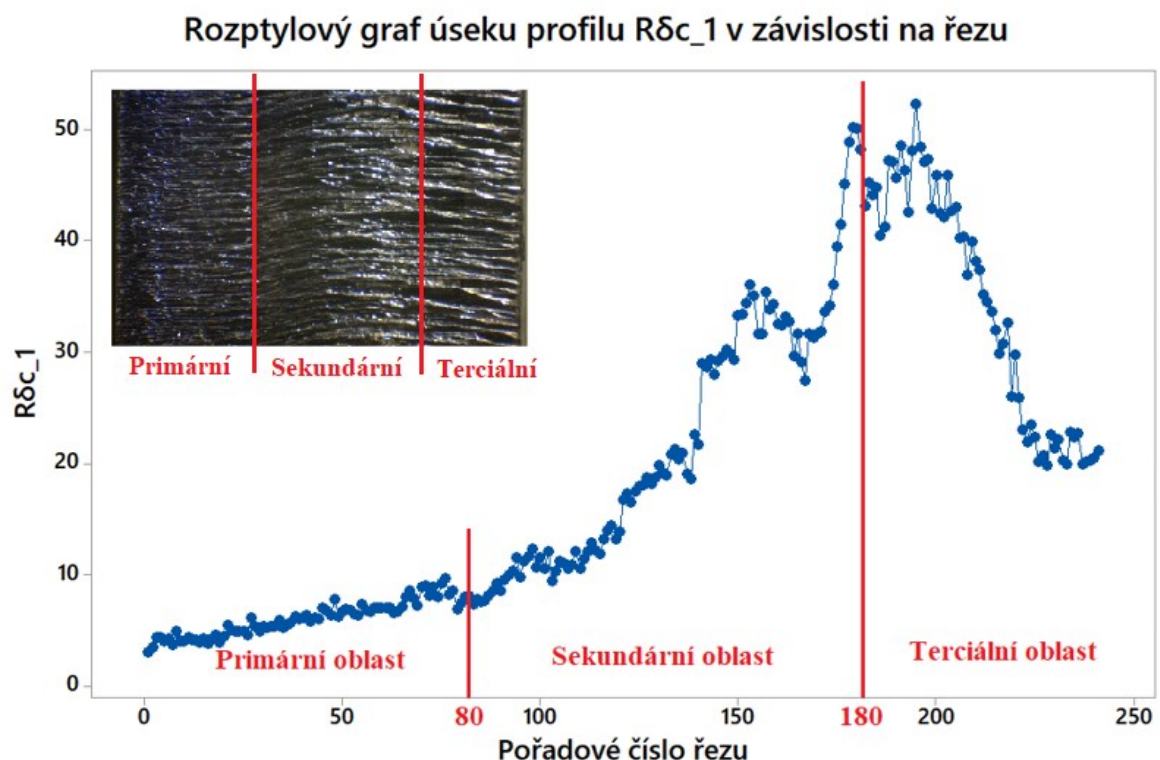
8.1.1 Optický mikroskop Zeiss

Existenci jednotlivých hladin s rozdílnou drsností je možné podpořit také mikroskopickým zkoumáním. Ověření heterogenity kromě profilometru proběhlo také pozorováním na optickém mikroskopu Zeiss v metrologické laboratoři. Na přiložené fotografii jsou jasně patrné oblasti s rozdílnou kvalitou řezné plochy.



Obr. 43 Ověření heterogenity optickým mikroskopem Zeiss [autor]

Před začátkem samotné analýzy jednotlivých parametrů struktury povrchu je nutné konstatovat, že na základě vizualizace povrchu v softwaru Talymap GOLD a mikroskopického pozorování došlo k rozhodnutí, že data z terciální oblasti jsou pro statistickou analýzu nevhodná, protože by negativně ovlivnily výsledky, jelikož drsnost z této oblasti má náhodný charakter. Počátek terciální oblasti byl z pozorování odhadnut v hloubce 4,5 mm, což odpovídá 180. profilu povrchu. Data z tohoto řezu jsou tedy poslední, která budou do analýzy začleněna. Ostatní data nebudou hodnocena, jelikož spadají do nehodnotitelné terciální oblasti kvality povrchu.



Obr. 44 Specifikace primární, sekundární a terciální oblasti kvality povrchu [autor]

V rámci specifikace terciální části kvality povrchu byla na základě mikroskopického zkoumání a profilometrické analýzy odhadnuto i rozhraní primární a sekundární oblasti kvality povrchu, a to v 80. řezu.

8.2 Vizualizace dat parametru Rmr

První hybridní parametr, který byl vybrán ke statistické analýze, je materiálový podíl drsnosti profilu Rmr. Naměřená data odpovídají hladině řezu c, která byla nastavena 10 μ m pod nejvyšším výstupkem povrchu. K analýze naměřených dat všech parametrů byl využit statistický software Minitab 17. Data určená k vizualizaci obsahovala 10 sloupců, které

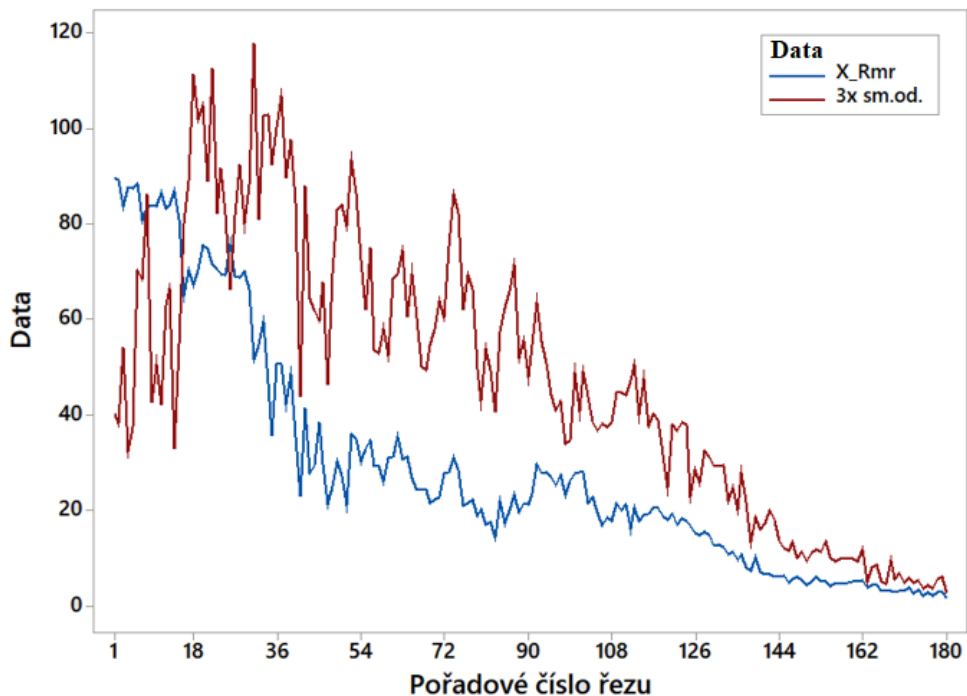
představují jednotlivé vzorky povrchů vyjádřené parametrem Rmr. Od každého vzorku je k dispozici 180 hodnot podle jednotlivých profilů svázaných s krokem. Na Obr. 45 je uvedena část těchto hodnocených dat. Nejprve byl proveden průměr X_Rmr , který je střední hodnotou všech 10 vzorků v jednotlivých profilech.

	Rmr_1	Rmr_2	Rmr_3	Rmr_4	Rmr_5	Rmr_6	Rmr_7	Rmr_8	Rmr_9	Rmr_10	X_Rmr	sm. odchylka	var. koeficient	krok
1	93,023	87,022	100,000	88,820	100,000	93,789	79,503	99,379	56,522	98,137	89,6195	13,4058	14,959	0,025
2	68,992	77,768	98,758	98,137	100,000	77,640	98,137	99,379	74,534	99,379	89,2724	12,7484	14,280	0,050
3	82,946	93,168	45,963	96,894	100,000	96,894	82,609	99,379	60,761	77,769	83,6383	18,0632	21,597	0,075
4	93,798	64,432	82,609	81,988	100,000	96,894	85,714	97,516	92,547	81,988	87,7486	10,6945	12,188	0,100
5	86,047	85,093	56,522	82,609	98,758	90,683	92,547	99,379	97,516	85,093	87,4247	12,4765	14,271	0,125
6	100,000	94,410	96,894	97,516	97,516	98,137	93,003	99,379	83,851	22,981	88,3687	23,4424	26,528	0,150
7	99,225	81,988	74,534	93,789	72,050	95,652	93,168	89,441	84,965	21,072	80,5884	22,7498	28,230	0,175
8	84,496	89,441	93,669	95,652	97,516	93,789	89,441	92,547	96,273	2,484	83,5308	28,7394	34,406	0,200

Obr. 45 Vyhodnocování dat parametru Rmr v Minitab 17 [autor]

Dále byla stanovena směrodatná odchylka a variační koeficient. Z následujícího Obr. 46 vyplývá, že směrodatná odchylka nespĺňuje Sillenovo pravidlo, které stanovuje, že parametr (v tomto případě průměr X_Rmr) musí být větší než trojnásobek jeho směrodatné odchylky.

Graf časové řady X_Rmr a směrodatné odchylky x 3

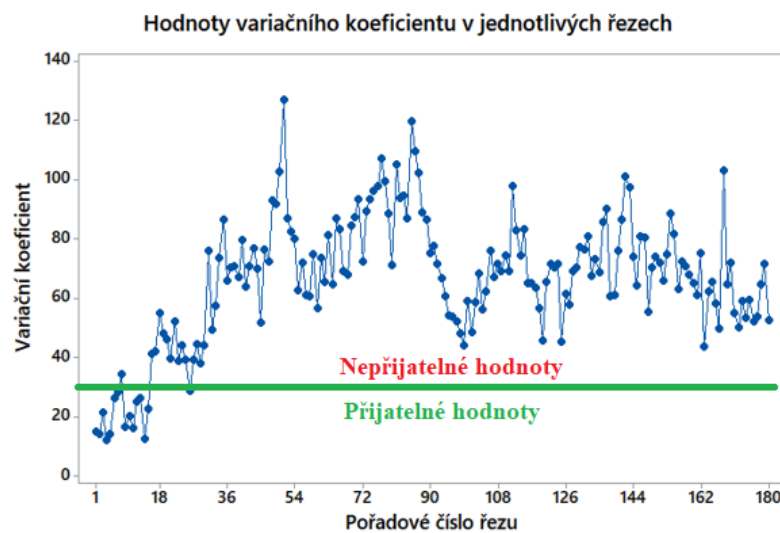


Obr. 46 Rozptyl hodnot parametru X_Rmr [autor]

Dále byl vypočten variační koeficient, který udává, kolik % z aritmetického průměru činí směrodatná odchylka. Z vypočtených hodnot na Obr. 47 je jasně patrné, že je aritmetický

průměr výrazně znehodnocen rozptylem. Hodnoty variačního koeficientu se pohybují vysoce nad 50 %, přitom přípustná hodnota byla dopředu stanovena na 30 %.

Tato skutečnost je dána zvolenou hladinou řezu c . Optimální nastavení hladiny záleží na zkušenostech a individuálních vlastnostech zkoumaného povrchu. Volba sběru dat 10 μm pod nejvyšším výstupkem neměla o tomto povrchu vypovídající hodnotu. Změna hladiny řezu c by ale znamenala sběr a následnou úpravu nových dat. Tento postup by musel být opakován tak dlouho, než by byla nalezena optimální hladina řezu pro nasbírání takových dat, které by měly vypovídající hodnotu o zkoumaném povrchu. Není ale jisté, že takovou hladinu lze na tomto specifickém povrchu experimentálně nalézt.



Obr. 47 Variační koeficient X_{Rmr} [autor]

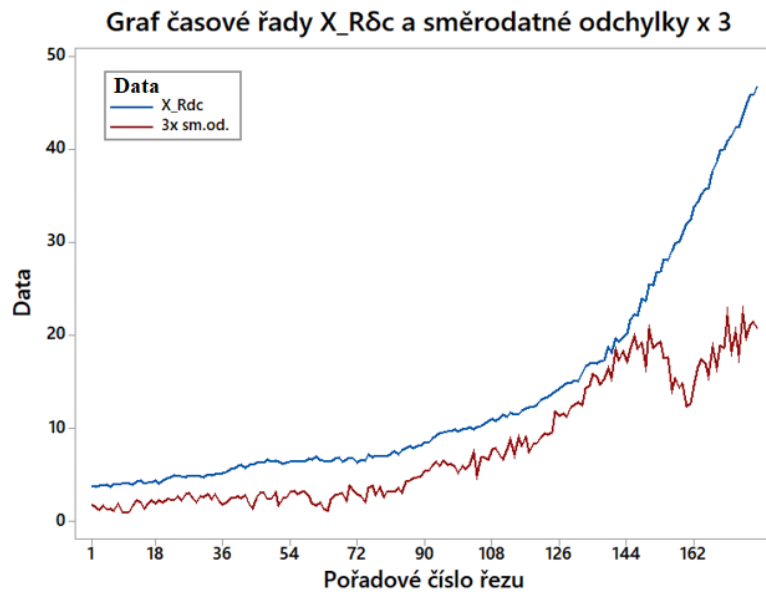
Ukázalo se tedy, že pro hodnocení heterogenního povrchu není parametr R_{mr} příliš vhodnou volbou, protože podléhá náhlým změnám drsnosti povrchu. Tento parametr je tedy vhodnější využít pro hodnocení homogenních povrchů, kde jsou změny v drsnosti minimální a přechody plynulejší.

8.3 Vizualizace dat parametru R_{dc}

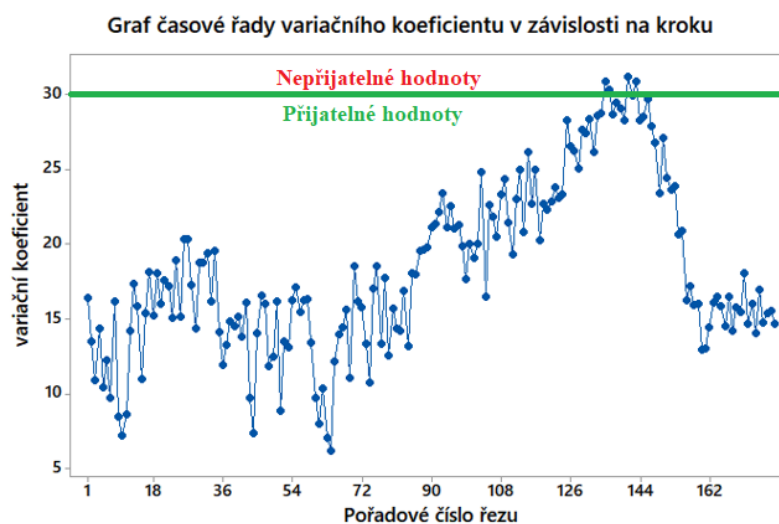
Dále byl pro analýzu heterogenního povrchu vybrán hybridní parametr R_{dc} , který rovněž souvisí s Abott-Firestonovou křivkou materiálového poměru. Při měření byla výška úseku profilu stanovena mezi úrovněmi 20 % a 80 %. V této oblasti se často předpokládá lineárního průběhu křivky materiálového poměru.

Opět jako v předchozím případě byl nejprve vyjádřen průměr $X_{R\delta c}$, který reprezentuje drsnost všech 10 vzorků v jednotlivých profilech. Dále byla určena směrodatná odchylka a variační koeficient $X_{R\delta c}$ pro ověření kvality dat.

Na následujících *Obr. 48* a *Obr. 49* jsou uvedeny jednotlivé výsledky pro směrodatnou odchylku a variační koeficient. Obě veličiny jsou vyjádřeny v celém rozsahu zkoumané hloubky vzorku.



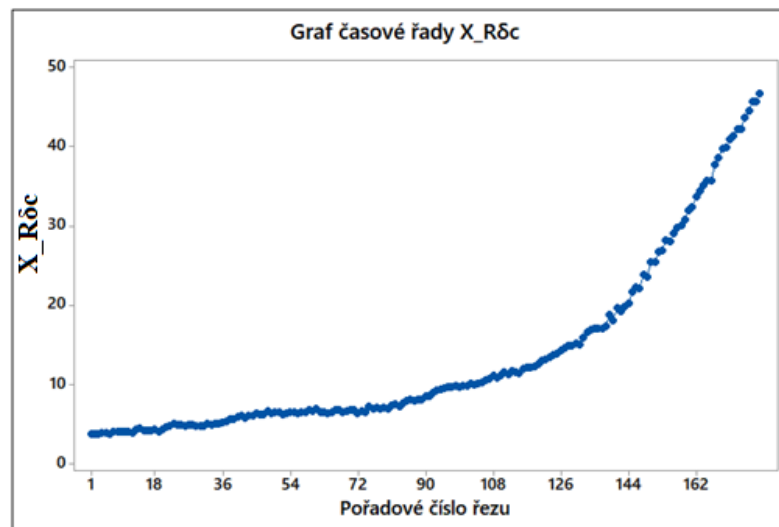
Obr. 48 Rozptyl hodnot parametru $X_{R\delta c}$ [autor]



Obr. 49 Variační koeficient $X_{R\delta c}$ [autor]

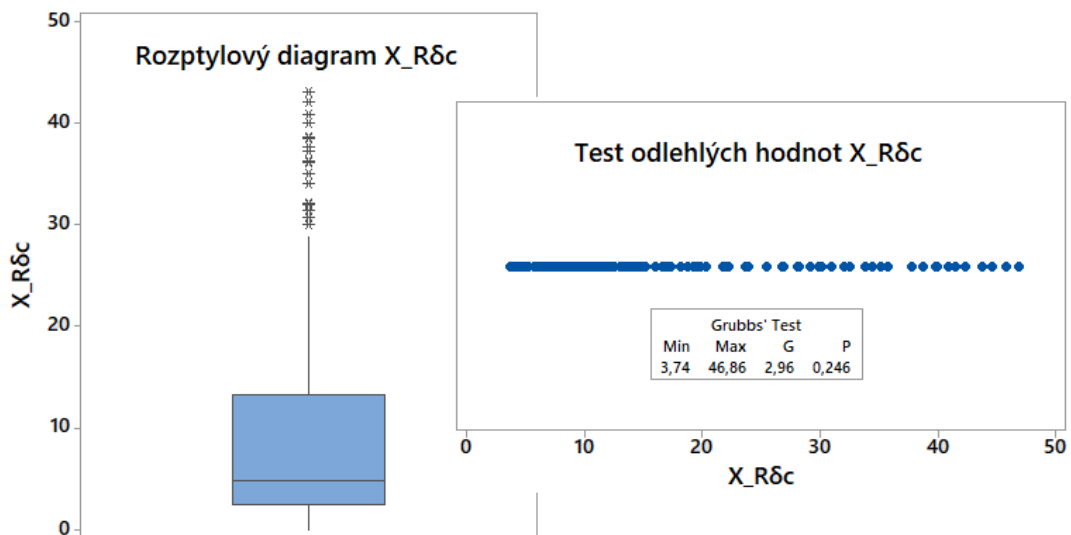
V celém rozsahu měření nepřesahuje trojnásobek směrodatné odchylky hodnoty aritmetického průměru. Variační koeficient se v ojedinělých případech blíží ke 30 %, což je přípustná hodnota.

Data byla ověřena a mohu tedy přistoupit k detailnější analýze. Exploratorní datovou analýzou byla data ještě prozkoumána na přítomnost odlehlých hodnot.



Obr. 50 Průběh hodnot $X_{R\delta c}$ v jednotlivých řezech [autor]

Graf časové řady na Obr. 50 znázorňuje průběh hodnot $X_{R\delta c}$ v jednotlivých řezech. Z grafu nejsou patrné žádné odlehlé hodnoty. Podřetí na přítomnost odlehlých hodnot ale nastává při aplikaci rozptylového diagramu. Podezřelé hodnoty byly tedy přezkoumány Grubbsovým testem odlehlých hodnot, jak uvádí Obr. 51.



Obr. 51 Testování na přítomnost odlehlých hodnot $X_{R\delta c}$ [autor]

Předpokladem nulové hypotézy bylo, že podezřelé hodnoty jsou pouze lokálními maximy s pravděpodobností $1-\alpha$, tedy 95 %. Na základě vypočtené P hodnoty Grubbsova testu nulovou hypotézu nezamítám, jelikož je P hodnota větší než zvolená hladina významnosti α (24,6 % > 5 %). Možnost omylu je v tomto případě 5 %.

8.4 Regresní analýza parametru R_{dc}

Poté co byl rozptyl dat prověřen variačním koeficientem, a data otestována na přítomnost odlehlých hodnot, mohu tedy přistoupit k navržení globálního způsobu hodnocení heterogenního povrchu pomocí regresní analýzy. Cílem bude nalezení funkční závislosti parametru R_{dc} na poloze řezu. Snahou je proložit naměřená data parametru R_{dc} regresní křivkou. Nejvhodnější křivka pro popis heterogenního povrchu bude vybrána podle dosažené přesnosti proložení dat a také podle testování regresního tripletu, kdy bude zjištěno, zda je vybraný model a výpočet regresních koeficientů významný.

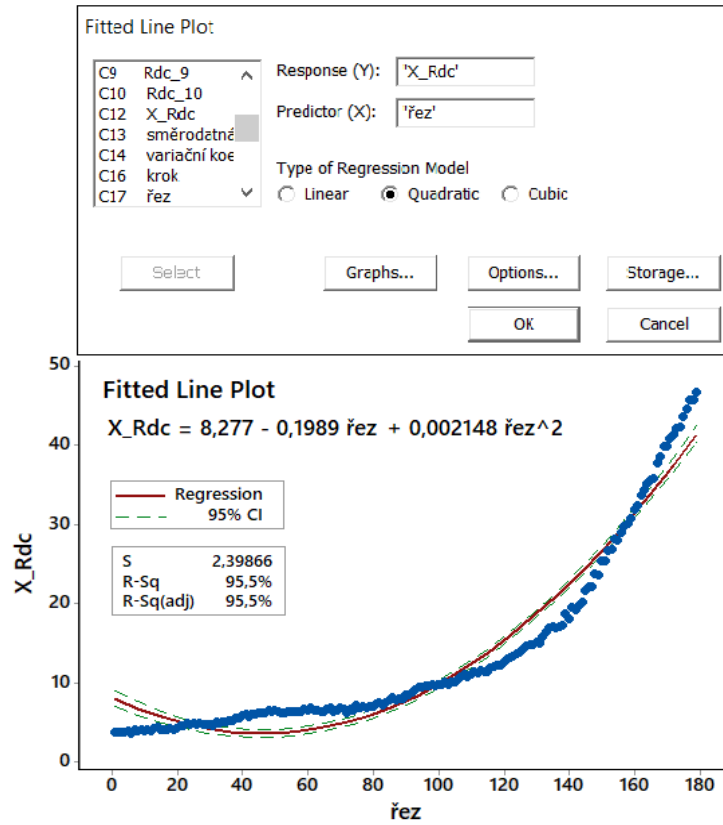
8.4.1 Lineární regrese R_{dc}

Nejprve byla navržena k popisu heterogenního povrchu lineární regrese. Pro vyjasnění – není tím myšlena linearita z hlediska průběhu (přímka), ale z matematického pohledu. Exponenty u odhadů regresních koeficientů jsou umocněny na prvou (β_0^1 , β_1^1 , atd...).

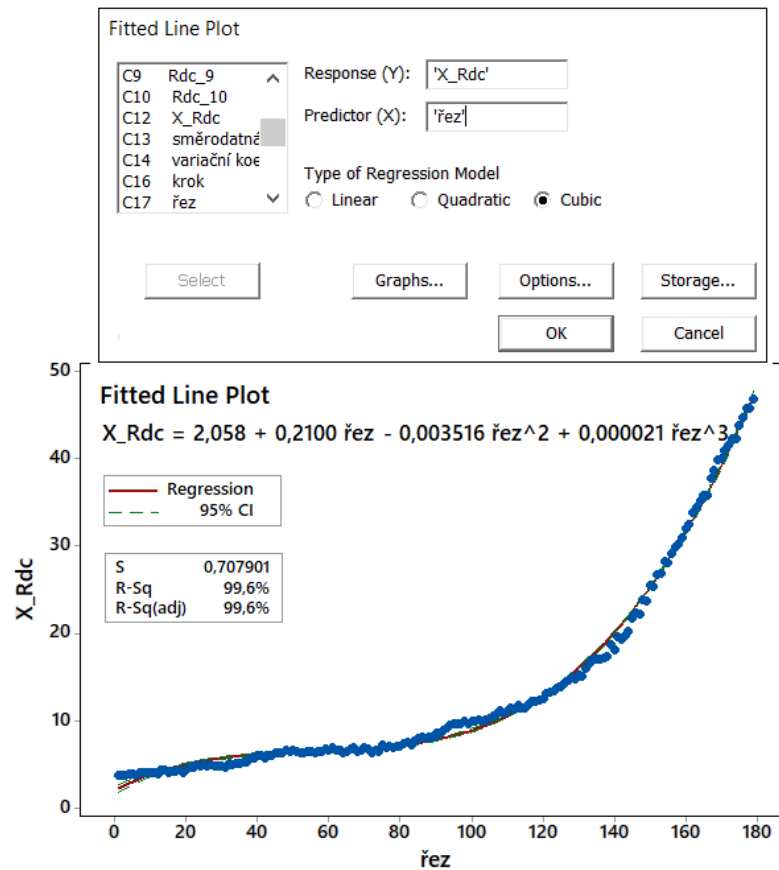
Z grafu časové řady na *Obr. 50* je zřejmé, že data vykazují exponenciální charakter, což jsem zohlednila při tvorbě regresního modelu. Regresní analýza byla provedena v software Minitab 17. Výsledkem bylo nalezení regresní křivky, kterou jsou data s určitou přesností proložena. Nejprve byl zvolen kvadratický typ regresního modelu (polynom 2. stupně) zobrazen na *Obr. 52* a poté kubický typ (polynom 3. stupně) na *Obr. 53*.

Pro vyjasnění – software Minitab 17 uvádí parametr R_{dc} pod označením Rdc¹. Nesourodost v uvedeném značení je způsobena čistě nastavením Minitabu.

¹ Parametr Rdc uváděný na Obr.52, 53, 54 a 55 je po formální stránce shodný s uváděným parametrem R_{dc} ve zbytku diplomové práce.



Obr. 52 Lineární regrese X_Rdc – polynom 2. stupně [autor]



Obr. 53 Lineární regrese X_Rdc – polynom 3. stupně [autor]

Kvalitu dosažené těsnosti proložení dat regresní křivkou lze posoudit podle hodnot regresního rabatu $R-Sq(adj)$ nalezené regresní křivky. Čím blíže je tato hodnota 100 %, tím lepší proložení bylo získáno. U kvadratického regresního modelu bylo dosaženo přesnosti proložení 95,5 % a u kubického modelu dokonce 99,6 %. Polynomem 3. stupně jsou data tedy proložena s vyšší přesností a tento typ regresního modelu bude dále prozkoumán. Pro získání podrobnějších informací o vhodnosti navrženého modelu byl využit software QC Expert. Výsledek regresní analýzy je uveden na následující tabulce.

Tab. 9 Testování kubického regresního modelu $X_{R\delta c}$ [autor]

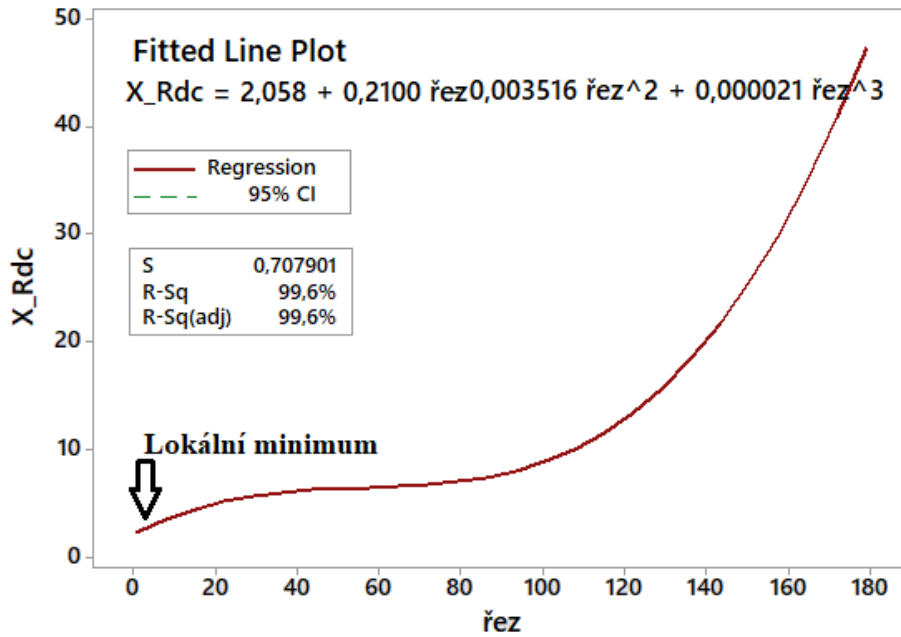
Vícenásobná lineární regrese	
Hladina významnosti	0,05
Metoda	nejmenší čtverce
Transformace	polynom 3. stupně

Odhady parametrů			
Proměnná	Odhad proměnné	Směrodatná odchylka	Závěr
Abs	2,058	0,216	Významný
Řez	0,210	0,011	Významný
Řez ²	-0,003516	0,000134	Významný
Řez ³	0,000021	0,0000005	Významný

Testování regresního modelu	
Významnost modelu	✓
Test normality reziduí	✓

Ze získaných výsledků plyne, že odhady regresních koeficientů jsou významné, rezidua mají normální rozdělení a model je tedy významný. Pokud bych rozhodnutí o vhodnosti regresního modelu nechala čistě na softwarovém vyhodnocení, byl tímto nalezen vhodný model pro popis heterogenního povrchu (vyjádřený parametrem $R\delta c$).

Při pohledu pouze na tvar křivky lineární kubické regrese na *Obr. 54*, je zřejmé, že počáteční naměřené hodnoty se asymptoticky blíží minimální hodnotě drsnosti $R\delta c$. Nalezená regresní křivka ale popisuje data spíše jako lokální minimum. Toto lokální minimum ale nemá v datech opodstatnění. Z grafu časové řady *Obr. 50* lze usuzovat že hodnoty parametru $X_{R\delta c}$ se spíše asymptoticky blíží určité hodnotě drsnosti.

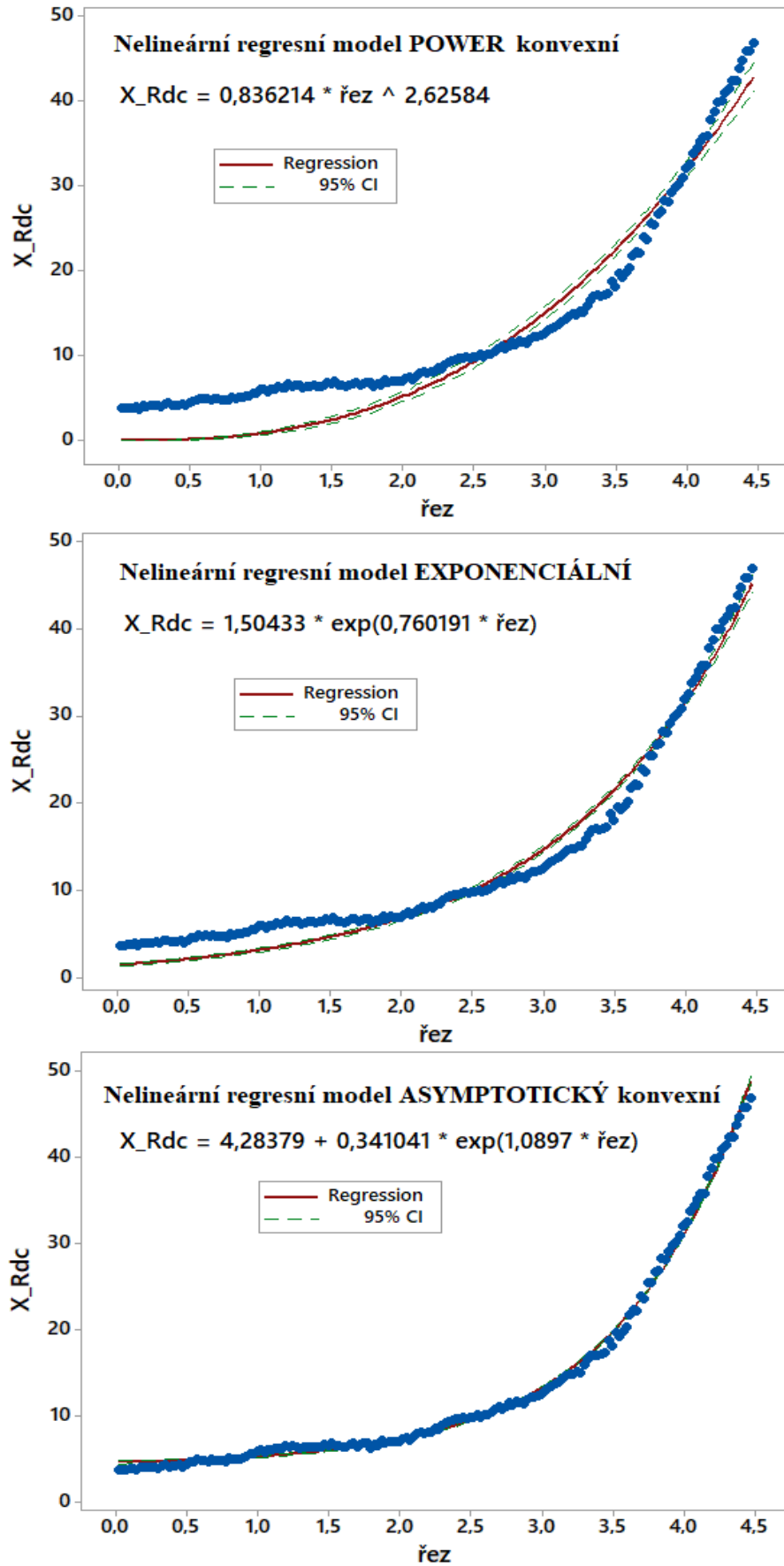


Obr. 54 Posouzení tvaru regresní křivky X_Rdc (polynom 3. stupně) [autor]

Z těchto důvodů jsem se rozhodla pokusit se o nalezení vhodnějšího modelu k popisu dat heterogenního povrchu pomocí nelineární regresní analýzy.

8.4.2 Nelineární regrese $R_{\delta c}$

K řešení nelineární regrese byla zvolena Levenberg-Marquardtova metoda. K nalezení regresní závislosti hybridního parametru $R_{\delta c}$ na poloze řezu byly vyzkoušeny tři typy nelineárních regresních modelů. Na Obr. 55 jsou všechny tři uvedeny i s matematickým vyjádřením. Vyhodnocení nejvhodnějšího modelu k popisu dat je provedeno na následující Tab. 10. podle velikosti chyb jednotlivých modelů a počtu iterací.

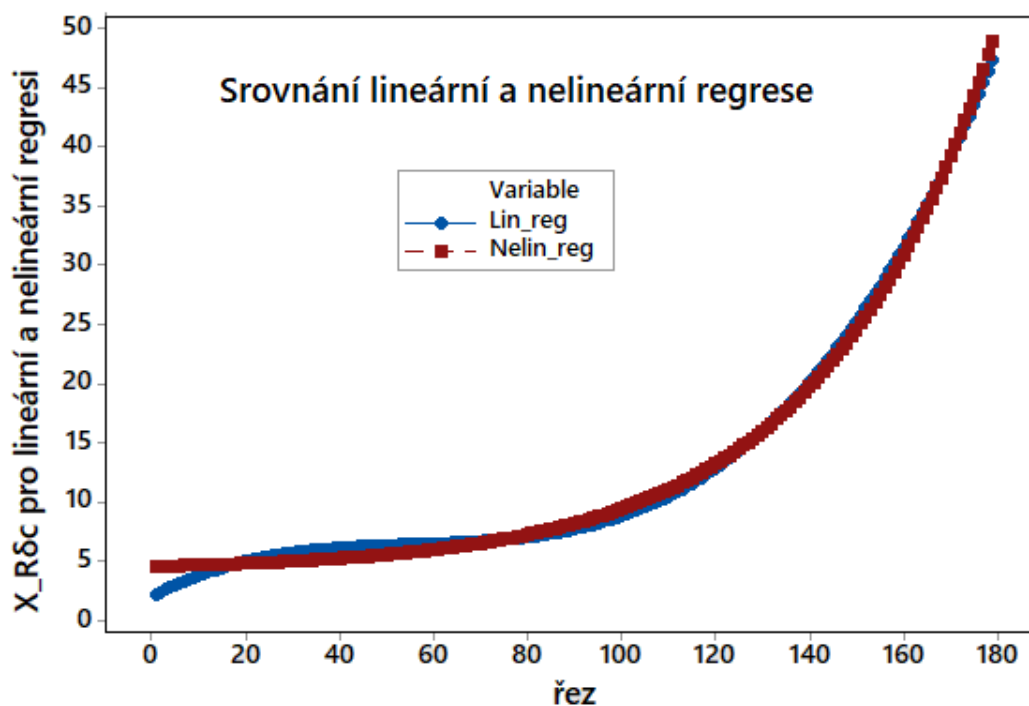


Obr. 55 Těsnost proložení dat nelineárními regresními modely X_{Rdc} [autor]

Tab. 10 Chyby jednotlivých nelineárních regresních modelů $X_{R\delta c}$ [autor]

Typ regresního modelu	Chyba modelu MSE	Chyba modelu S	Počet iterací
Nelineární POWER konvexní	10,96	3,31	23
Nelineární EXPONENCIÁLNÍ	3,55	1,89	18
Nelineární ASYMPTOTICKÝ konvexní	0,48	0,69	17

Ze zvolených modelů je k popisu dat nejvhodnější nelineární regresní model asymptotický konvexní, protože má nejnižší chybu modelu MSE i S. Rychlost vyřešení nelineární regrese je přímo závislá na počtu iterací. Zvolený model kromě minimální chybovosti má i minimální počet iterací. Hlavním důvodem pro volbu nelineární regrese byla snaha o lepší popis dat z prvních 20 řezů.



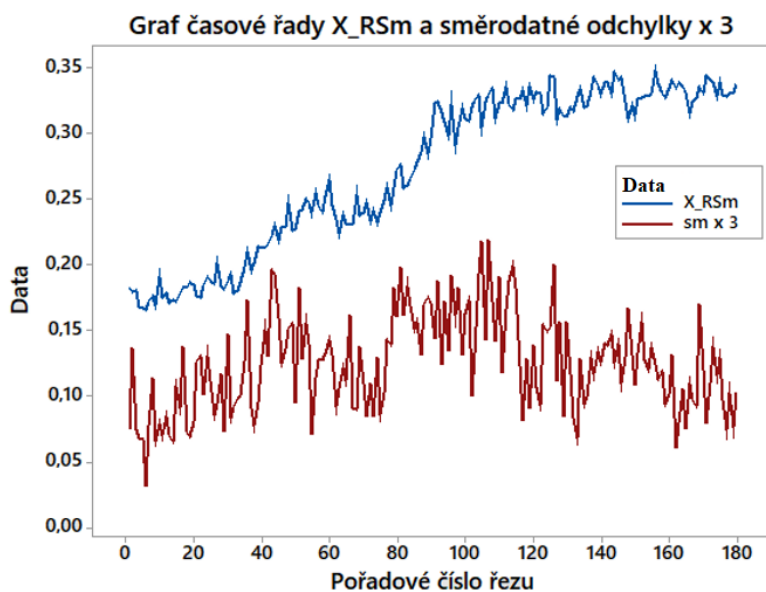
Obr. 56 Srovnání lineární kubické regrese a nelineární asymptotické konvexní regrese

Po překrytí kubické lineární regrese a nelineární asymptotické regrese je jasně vidět, že problém lokálního minima se u nelineární regrese neobjevuje. Nelineární model tak popisuje data z prvních 20 řezů lépe než lineární model. Díky aplikaci nelineárního modelu byla nalezena a doložena funkční závislost hybridního parametru $X_{R\delta c}$ na poloze řezu.

8.5 Vizualizace dat parametru RSm

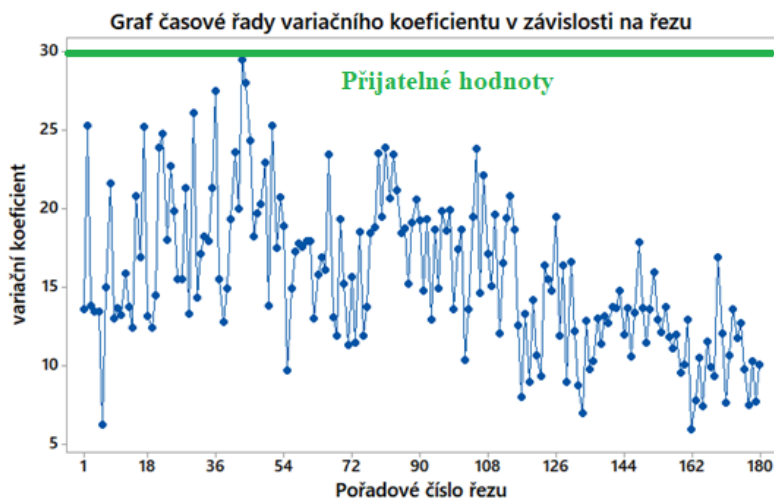
Posledním parametrem pro analýzu naměřených dat je parametr RSm neboli průměrná šířka prvků profilu. Jedná se o šířku mezi přechodem dvou extrémů na profilu povrchu (výstupek a prohlubeň).

Samotná vizualizace dat i následná regresní analýza je po formální stránce velmi podobná s postupem v předchozí analýze parametru R δ c.



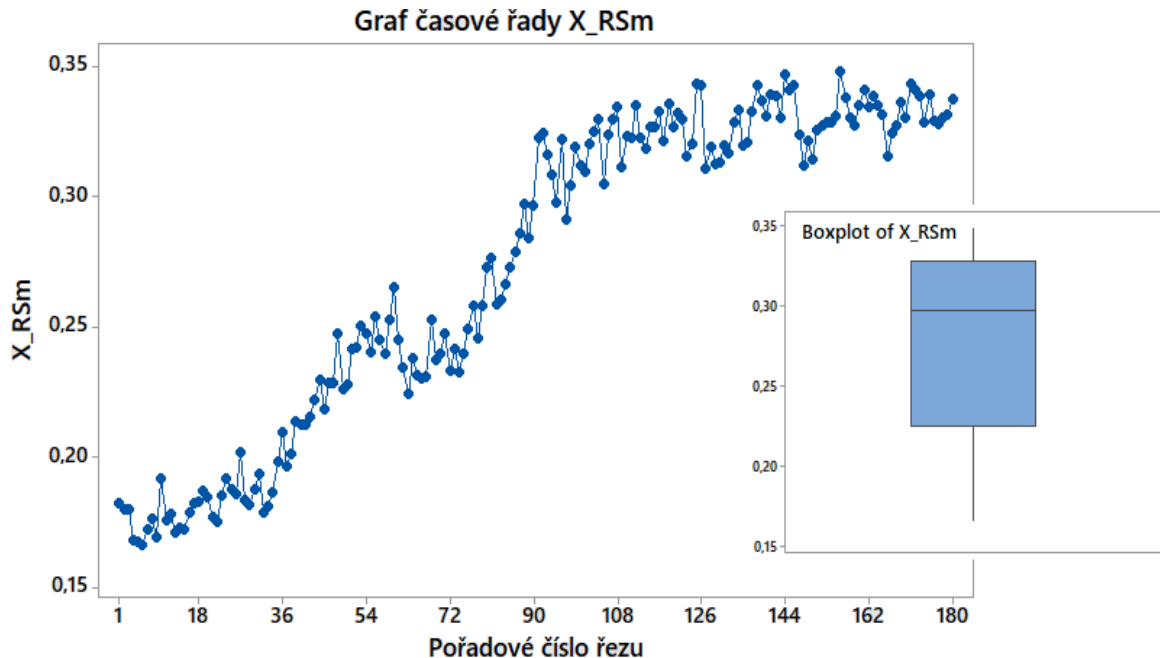
Obr. 57 Rozptyl hodnot parametru X_{RSm} [autor]

Směrodatná odchylka v celém rozsahu nepřesahuje hodnoty aritmetického průměru a data tak nejsou znehodnocena rozptylem. Variační koeficient se v ojedinělých případech blíží ke 30 %, což je přípustná hodnota. Naměřená data jsou vhodná pro další analýzu.



Obr. 58 Variační koeficient X_{RSm} [autor]

Na následujícím *Obr. 59* je provedeno ověření, že se v datech nevyskytují odlehlé hodnoty. Graf časové řady ani rozptylový diagram neukázal žádné podezření.



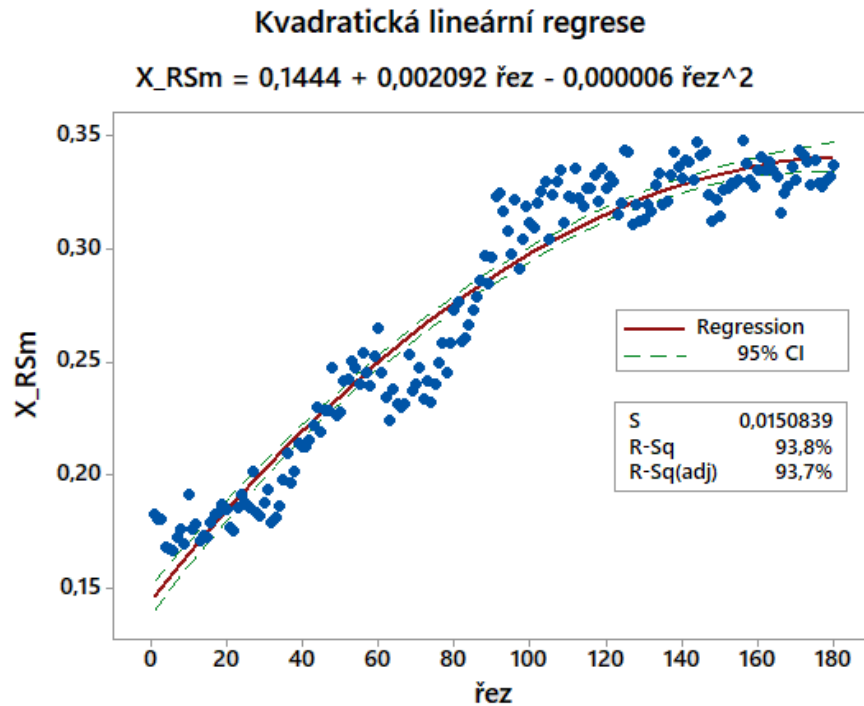
Obr. 59 Testování na přítomnost odlehlých hodnot X_RSm [autor]

8.6 Regresní analýza parametru RSm

Data X_RSm byla ověřena variačním koeficientem. V datech nenastalo ani podezření na přítomnost odlehlých hodnot, a proto mohu přistoupit k detailní regresní analýze, jako v předchozím případě.

8.6.1 Lineární regrese RSm

Nejprve byla opět aplikována lineární regresní analýza. Na *Obr. 60* je znázorněna kvadratická lineární regrese, která popisuje data s přesností regresního rabatu 93,7 %. V případě regresní analýzy X_Rdc byl regresní rabat vyšší, protože se data méně rozptylovala. Obecně lze konstatovat, že pokud je vypočtená hodnota regresního rabatu vyšší než 90 %, je nalezená křivka vhodná pro popis naměřených dat.



Obr. 60 Kvadratická lineární regrese X_RSm [autor]

Opět je nutné ověřit významnost modelu a odhadů regresních koeficientů v QC Expertu. V následující Tab. 11 jsou uvedeny výsledky. Model byl shledán významným a rezidua mají normální rozdělení. Model je tím pádem korektní, vhodný pro popis naměřených dat.

Tab. 11 Testová kvadratického regresního modelu X_RSm [autor]

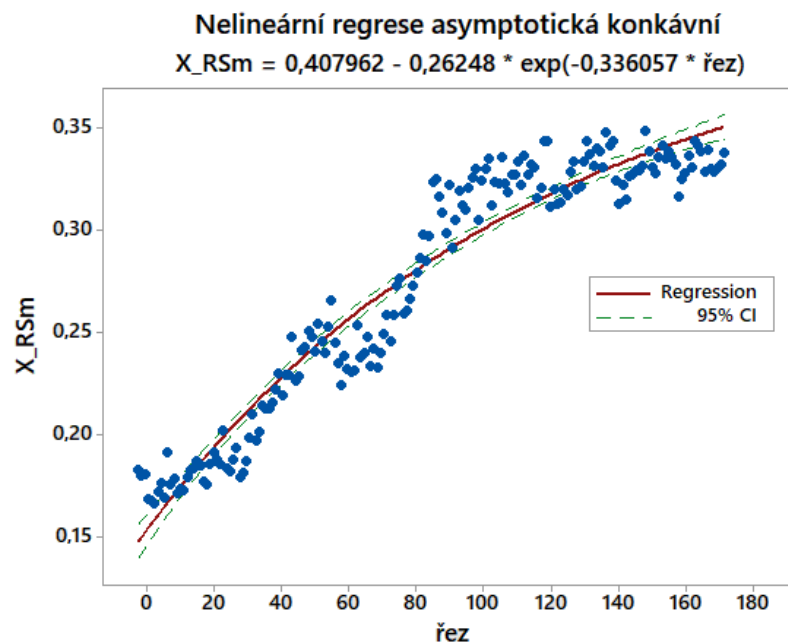
Vícenásobná lineární regrese	
Hladina významnosti	0,05
Metoda	nejmenší čtverce
Transformace	polynom 2. stupně

Odhady parametrů			
Proměnná	Odhad proměnné	Směrodatná odchylka	Závěr
Abs	0,1444	0,0031	Významný
Řez	0,002092	0,000606	Významný
Řez ²	-0,000006	0,0000001	Významný

Testování regresního modelu	
Významnost modelu	✓
Test normality reziduí	✓

8.6.2 Nelineární regrese RSm

Jelikož hodnota regresního rabatu při hodnocení parametru $R_{\delta c}$ byla vypočtena na hodnotu 99,6 % a při hodnocení parametru RSm 93,7 %, rozhodla jsem se na data X_RSm aplikovat ještě nelineární regresi ve snaze nalézt ještě přesnější model pro popis závislosti parametru X_RSm na poloze řezu. Inspirací k tomuto kroku bylo nalezení vhodného modelu v předchozím případě.



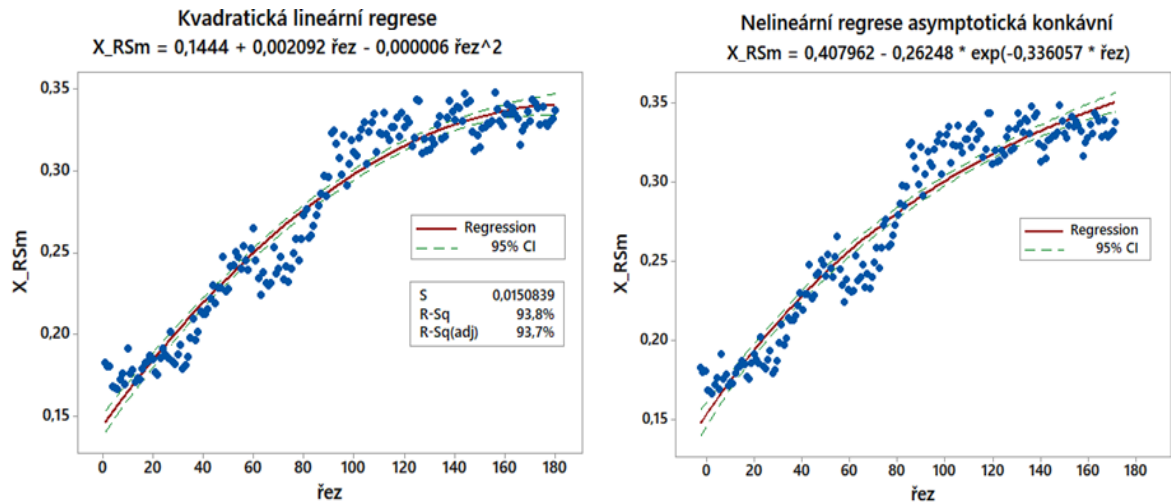
Obr. 61 Nelineární regresní model asymptotický konkávní [autor]

Při volbě nelineárního regresního modelu asymptotického konkávního jsem se inspirovala z předchozí analýzy, kde byl jako nejvhodnější modelem vyhodnocen asymptotický konkávní. V následující Tab. 12 jsou uvedeny chyby modelu a počet iterací.

Tab. 12 Chyby nelineárního asymptotického konkávního modelu X_RSm [autor]

Typ regresního modelu	Chyba modelu MSE	Chyba modelu S	Počet iterací
Nelineární ASYMPTOTICKÝ konkávní	0,00026	0,01611	14

Důležité je vyzdvihnout nízké hodnoty chyb modelu a také rychlost dosažení výsledku se 14 iteracemi. Při srovnání lineární a nelineární regrese na Obr. 62 je možné konstatovat, že průběhy jednotlivých funkcí se od sebe příliš neliší, proto by nebylo chybou funkční závislost X_RSm na poloze řezu popsat jak lineárním kvadratickým modelem, tak nelineárním asymptotickým konkávním modelem.



Obr. 62 Srovnání lineární kvadratické regrese a nelineární asymptotické konkávní regrese

[autor]

Nelineární regrese v obou případech tak přináší nejpřesnější způsob popisu parametru struktury povrchu na poloze řezu. Byla nalezena a doložena funkční závislost parametrů struktury povrchu na poloze řezu (pro R_{dc} nelineární regresní model asymptotický konvexní a pro R_{S_m} nelineární regresní model asymptotický konkávní).

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá uceleným způsobem hodnocení drsnosti heterogenního povrchu, který vznikl po obrábění laserovým paprskem. V technické praxi se k hodnocení povrchů nejčastěji využívá amplitudových parametrů, jejichž aplikace je snadná a výsledky jednoduše interpretovatelné. Amplitudové parametry nejsou však vhodnou volbou tam, kde se drsnost povrchu v rozsahu zkoumané plochy významně mění. Tento problém nastává u heterogenních povrchů, které mají v každém místě jiné vlastnosti a tím i kvalitu povrchu.

Cílem diplomové práce bylo nalézt vhodnou statistickou metodu pro popis heterogenního povrchu s ohledem na jeho charakteristickou strukturu a také doložit důkaz o vhodnosti.

Na základě měření povrchu vzorků z žáruvzdorné oceli na profilometru Talysurf CLI 500 byla získána data popisující vývoj drsnosti. Povrch byl tedy hodnocen třemi parametry struktury, a to: frekvenčním parametrem RSm a hybridními parametry Rmr a Rđc.

Po měření vzorků proběhlo ještě ověření heterogenity povrchu mikroskopickým zkoumáním. Z vizualizace povrchu byl experimentálně určen počátek terciální oblasti kvality povrchu, aby mohla být data z této oblasti odstraněna. Jelikož kvalita povrchu v terciální oblasti vykazuje náhodný charakter, jsou data z této oblasti nevhodná pro analýzu.

Díky exploratorní datové analýze, bylo zjištěno, že data materiálového podílu drsnosti profilu Rmr jsou zcela znehodnocena rozptylem. Parametr Rmr totiž podléhá náhlým změnám drsnosti povrchu a také je citlivý na optimální nastavení hladiny řezu c, které záleží na individuálních vlastnostech povrchu. Data Rmr nemají vypovídající hodnotu o povrchu, a proto nebyl materiálový podíl drsnosti profilu dále statisticky hodnocen. U zbylých dvou parametrů nejsou data znehodnocena rozptylem, hodnoty variačního koeficientu jsou přijatelné a v datech se též nevyskytují odlehle hodnoty.

Statistická analýza Rđc (výška úseku profilu mezi 20 % a 80 %)

Pro statistickou analýzu byla nejprve navržena lineární regrese. Při tvorbě regresního modelu v software Minitab 17 bylo přihlédnuto k exponenciálnímu průběhu naměřených dat. Byl zvolen kvadratický typ regresního modelu (polynom 2. stupně - *Obr. 52*) a kubický typ regresního modelu (polynom 3. stupně - *Obr. 53*). Výsledkem bylo nalezení regresní křivky, kterou byla data s určitou přesností proložena. Podle regresního rabatu R-Sq(adj) dosáhla regresní křivka kubického model vyšší těsnosti proložení dat, a to 99,6 %.

Podrobnější informace o navrženém modelu byly získány ze softwaru QC Expert.

- Odhady regresních koeficientů jsou významné
- Rezidua mají normální rozdělení
- Model byl shledán významným

Na regresní křivce se objevilo lokální minimum (*Obr. 54*), které nemá v datech příčinu. Z tohoto důvodů byla aplikována nelineární regrese ve snaze nalézt přesnější model, což se podařilo. Byly zvoleny tři nelineární regresní modely, z nichž nejvhodnější model byl vyhodnocen asymptotický konvexní (*Obr. 55*). Ve srovnání s ostatními měl nejnižší chybovost i nejmenší počet iterací (*Tab. 10*). Aplikací nelineárního asymptotického konvexního modelu byl vyřešen problém s lokálním minimem na regresní křivce a byla tak nalezena a doložena funkční závislost hybridního parametru $X_{R\delta c}$ na poloze řezu pomocí nelineární regrese.

Statistická analýza RSm

Analýza RSm probíhala velmi podobně. Nejprve byl zvolen kvadratický lineární regresní model s přesností proložení dat na 93,7 %. QC Expert potvrdil kvalitu nalezeného modelu:

- Odhady regresních koeficientů jsou významné
- Rezidua mají normální rozdělení
- Model byl shledán významným

Cílem je získat co možná nejpřesnější model k popisu heterogenního povrchu, proto byl z předchozí zkušenosti vyzkoušen ještě nelineární asymptotický model (tentokrát konkávní podle průběhu hodnot). Průběhy regresních křivek se příliš nelišily. Nelineární model má ale velmi nízkou hodnotu chybovosti i počet iterací, proto je také vhodný k popisu naměřených hodnot parametru RSm.

Diplomová práce přináší progresivní způsob hodnocení heterogenního povrchu. Díky regresní analýze lze komplexně hodnotit primární a sekundární oblast drsnosti povrchu dohromady jednou regresní křivkou. Cíl diplomové práce byl tedy splněn nalezením a doložením funkční závislosti parametrů struktury povrchu na poloze řezu (pro $R\delta c$ nelineární regresní model asymptotický konvexní a pro RSm lineární kvadratický model a nelineární regresní model asymptotický konkávní).

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOCMAN, Karel. *Technologické procesy obrábění*. CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-722-2.
- [2] BÍLEK, Ondřej. *Výrobní inženýrství a technologie*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2014. ISBN 978-80-7454-471-2.
- [3] GELETA, Vojtěch. *Progresívne technológie obrábania*. STU, 2013. ISBN 9788022739979.
- [4] MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie*. Košice: Vienaľa, 2000. Edícia vedeckej a odbornej literatúry. ISBN 80-7099-430-4.
- [5] Laser cutting technique: A literature review. *Materials Today: Proceedings*. 2022, 56(5), 2484-2489. ISSN 2214-7853.
- [6] Surface quality measures analysis and optimization on machining titanium alloy using CO2 based laser beam drilling process. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021, 1-6. ISSN 1526-6125.
- [7] Experimental investigation of the effect of process parameters on cutting region temperature and cutting edge quality in laser cutting of AL6061T6 alloy. *Optik*. 2019, 457-463. ISSN 0030-4026.
- [8] CO2 laser cut quality of 4130 steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2003, 351-358. ISSN 0890-6955.
- [9] Nekonenční metody obrábění. *MM Průmyslové Spektrum* [online]. [cit. 2023-02-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonenncni-metody-obrabeni-4-dil>
- [10] MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ. *Statistická analýza experimentálních dat*. 2. Praha: Academia, 2004. ISBN 80-200-1254-0.
- [11] *Statistika jednoduše: průvodce světem statistiky*. Praha: Grada, 2022. ISBN 978-80-271-1738-3.
- [12] BEST, Henning a Christof WOLF. *The SAGE Handbook of Regression Analysis and Casual Inference*. London, 2015. ISBN 978-1-4462-5244-4.
- [13] MELOUN, Milan a Jiří MILITKÝ. *Kompendium statistického zpracování dat*. 2. Praha: Academia, 2006. ISBN 80-200-1396-2.

- [14] PATA, Vladimír. *Moderní způsoby hodnocení drsnosti strojírenských povrchů na bázi matematické statistiky*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2019. ISBN 978-80-7454-829-1.
- [15] PATA, Vladimír a Milena KUBIŠOVÁ. *Statistické metody hodnocení jakosti strojírenských povrchů*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2018. ISBN 978-80-7454-740-9.
- [16] Laser Beam Machining. *ME MECHANICAL* [online]. 2020, 2020 [cit. 2023-02-23]. Dostupné z: <https://mechanicalengineering.blog/laser-beam-machining/>
- [17] Laser Marking Types. *Keyence* [online]. [cit. 2023-02-23]. Dostupné z: <https://www.keyence.com/ss/products/marketing/laser-markingcentral/basics/wavelength.jsp>
- [18] Badoniya, Pushkal. (2018). CO2 Laser Cutting of Different Materials-A Review. *International Journal of Engineering and Technical Research*. 5. 2103-2115.
- [19] FIBER LASER BASICS AND DESIGN PRINCIPLES: Fiber Laser Design Fundamentals and Building Blocks. *Laser Lab Source* [online]. [cit. 2023-02-23]. Dostupné z: <https://www.laserlabsource.com/Solid-State-Lasers/Solid-State-Lasers/fiber-laser-basics-and-design-principles>
- [20] Genna S, Menna E, Rubino G, Tagliaferri V. Experimental Investigation of Industrial Laser Cutting: The Effect of the Material Selection and the Process Parameters on the Kerf Quality. *Applied Sciences*. 2020; 10(14):4956. <https://doi.org/10.3390/app10144956>
- [21] Riveiro A, Quintero F, Boutinguiza M, Del Val J, Comesaña R, Lusquiños F, Pou J. Laser Cutting: A Review on the Influence of Assist Gas. *Materials*. 2019; 12(1):157. <https://doi.org/10.3390/ma12010157>
- [22] ČSN EN ISO 21920-2. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Struktura povrchu: Profil - Část 2: Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. 07/2022. Praha: Česká společnost pro jakost, 2022.
- [23] ČSN EN ISO 21920-3. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Struktura povrchu: Profil - Část 3: Operátory specifikace*. 07/2022. Praha: Česká společnost pro jakost, 2022.
- [24] Korzeniewska, Ewa, et al. "Surface morphology analysis of metallic structures formed on flexible textile composite substrates." *Sensors* 20.7 (2020): 2128.
- [25] TICHÁ, Šárka. *STROJÍRENSKÁ METROLOGIE: část 1*. Ostrava: Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava, 2004. ISBN 80-248-0672-X.
- [26] *Taylor - Hobson. Talysurf CLI 500 Operator's Handbook*. England, 2002.

- [27] MITAL, Gerhard. CONTACTLESS MEASUREMENT AND EVALUATION MACHINED SURFACE ROUGHNESS USING LASER PROFILOMETRY. *Transfer inovácií* [online]. 2021, 2021, (43), 19-24 [cit. 2023-02-23]. Dostupné z: <https://www.sjf.tuke.sk/transferinovacii/pages/archiv/transfer/43-2021/pdf/019-024.pdf>
- [28] RUŽBARSKÝ, Juraj. *Contactless System for Measurement and Evaluation of Machined Surfaces* [online]. Springer, 2022. ISBN 978-3-031-08980-0. Dostupné také z: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-08981-7>
- [29] Měření drsnosti povrchu: Metody měření drsnosti povrchu. *ELUC* [online]. [cit. 2023-02-23]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1103>
- [30] Měření povrchu. *Accretech* [online]. [cit. 2023-02-23]. Dostupné z: <https://www.accretech.eu/en/surface-measuring/>
- [31] Jozsef, Boer & Blaga, Petruta. (2018). Reducing production costs by monitoring the roughness of raw product surfaces. *Procedia Manufacturing*. 22. 202-208. 10.1016/j.promfg.2018.03.031.
- [32] Roughness measuring systems from Hommel-Etamic: Surface texture parameters in practise. *Slide share* [online]. [cit. 2023-02-23]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/CarlosAlbertoRamrezM/surface-roughness-parameters-en>
- [33] Abbottova–Firestoneova křivka. *Wikipedia* [online]. [cit. 2023-02-23]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Abbottova%E2%80%93Firestoneova_k%C5%99ivka
- [34] WHITEHOUSE, David J. *Handbook of Surface and Nanometrology*. 2. 2011. ISBN 9781420082012.
- [35] BRANDT, Siegmund. *Data Analysis: Statistical and Computational Methods for Scientists and Engineers*. 4. Springer, 2014. ISBN 9783319037615.
- [36] CAVE, Dr. Vanessa. Type I and II errors. *VSNi* [online]. 2021, 29 June 2021 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://vsni.co.uk/blogs/type-1-and-2-errors>
- [37] Wang, Yong. "Gauss–newton method." *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics* 4.4 (2012): 415-420.
- [38] Gavin, Henri P. "The Levenberg-Marquardt algorithm for nonlinear least squares curve-fitting problems." *Department of Civil and Environmental Engineering, Duke University Durham, NC USA* (2022).

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

mm	Milimetr
μm	Mikrometr
kW	Kilowatt
kHz	Kilohertz
USM	Ultrasonic Machining neboli obrábění ultrazvukem
AJM	Abrasive Jet Machining neboli obrábění proudem brusiva ve stlačeném plynu
WJM	Water Jet Machining neboli obrábění vodním paprskem
CM	Chemical Machining neboli chemického obrábění
EDM	Electrical Discharge Machining neboli elektroerozivní obrábění
E_1	Základní energetická hladina
E_2	Excitovaná energetická hladina
E_m	Metastabilní energetická hladina
Nd:YAG	Yttrium Aluminum Garnet neboli neodymový laser
CO_2	Oxid uhličitý
ISO	International Organization for Standardization neboli mezinárodní organizace pro normalizaci
CLA	Chromatic Length Aberration neboli bezkontaktní laserová aberace
CLI	Chromatic Length interaction neboli chromatická laserová interakce
R_a	Průměrná aritmetická úchylka profilu povrchu od střední čáry
R_z	Největší výšku profilu v rozsahu základní délky
R_p	Nejvyšší výstupek
R_v	Nejhlubší prohlubeň
R_t	Celková výška profilu
$Z(x)$	Pořadnice
l_r	Základní délka

l_n	Vyhodnocovaná délka
R_{Sm}	Průměrná šířka prvků profilu
X_s	Šířka prvků profilu
R_{mr}	Materiálový podíl drsnosti profilu
$R_{\delta c}$	Rozdíl výšky úseku profilu
c	Hladina řezu
H_0	Nulová hypotéza
H_a	Alternativní hypotéza
α	Hladina významnosti (chyba 1. druhu)
$1-\alpha$	Pravděpodobnost (spolehlivost testu)
β	Pravděpodobnost (chyba 2. druhu)
$1-\beta$	Pravděpodobnost (síla testu)
P	Hodnota pro rozhodování o nulové hypotéze
ε_i	Naměřená chyba (reziduum)
R^2	Koeficient determinace
y_i	Závisle proměnná
x_i	Nezávisle proměnná
β_0	Konstanta
β_1, β_n	Koeficienty nezávisle proměnných
x_{25}	Dolní kvartil
x_{50}	Medián
x_{75}	Horní kvartil
EDA	Exploratorní Datová Analýza
cca	cirka (přibližně)
LM	Levenberg Marquardt

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1</i> Obrábění ultrazvukem [4]	12
<i>Obr. 2</i> Obrábění proudem brusiva ve stlačeném plynu [4]	13
<i>Obr. 3</i> Obrábění vodním paprskem [4].....	13
<i>Obr. 4</i> Princip chemického obrábění (vlevo), nežádoucí jev (vpravo) [4]	14
<i>Obr. 5</i> Princip elektroeroze [1].....	14
<i>Obr. 6</i> Stimulovaná emise záření [autor]	15
<i>Obr. 7</i> Princip obrábění laserovým paprskem [16].....	16
<i>Obr. 8</i> Vlnové délky laserového paprsku [17]	16
<i>Obr. 9</i> Princip CO ₂ laseru [4]	18
<i>Obr. 10</i> Princip laserového řezání [18].....	19
<i>Obr. 11</i> Schéma vláknového laseru [19].....	20
<i>Obr. 12</i> Využitelnost laserů v průmyslu [9]	21
<i>Obr. 13</i> Primární, sekundární a terciální oblast drsnosti povrchu vzorku po laserovém řezání [autor].....	23
<i>Obr. 14</i> Laminární charakter mezní vrstvy [21]	25
<i>Obr. 15</i> Nasnímaný povrch, filtrace tvaru základního profilu, vlnitosti a drsnosti [autor].	27
<i>Obr. 16</i> Princip měření drsnosti povrchu kontaktní metodou [24].....	28
<i>Obr. 17</i> Schéma kontaktního profilometru [25].....	29
<i>Obr. 18</i> Princip CLA snímače [29]	30
<i>Obr. 19</i> Talysurf CLI 500 [autor].....	31
<i>Obr. 20</i> Princip 2D snímání povrchu bezkontaktně [22].....	32
<i>Obr. 21</i> Znázornění střední čáry, základní a vyhodnocované délky na profilu drsnosti povrchu [30].....	33
<i>Obr. 22</i> Průměrná aritmetická úchylka profilu povrchu [31]	34
<i>Obr. 23</i> Největší výška profilu [31].....	34
<i>Obr. 24</i> Průměrná šířka prvků profilu [15]	35
<i>Obr. 25</i> Materiálový podíl drsnosti profilu [32].....	36
<i>Obr. 26</i> Tvar Abbott-Firestonovy křivky v závislosti na obrábění [33].....	36
<i>Obr. 27</i> Vzájemný vztah mezi nulovou a alternativní hypotézou [36]	39
<i>Obr. 28</i> Graf časové řady [autor]	41
<i>Obr. 29</i> Rozptylový diagram [autor]	41
<i>Obr. 30</i> Grubbsův test odlehých hodnot [autor]	42
<i>Obr. 31</i> Základní parametry pro hodnocení naměřených dat [autor]	42
<i>Obr. 32</i> Aproximace metodou nejmenších čtverců [autor]	44

<i>Obr. 33</i> Rozměry vzorku [autor]	50
<i>Obr. 34</i> Ustavení vzorku do pracovního prostoru měřicího přístroje [autor]	51
<i>Obr. 35</i> Nastavení odrazivosti při měření vzorků [autor]	52
<i>Obr. 36</i> Nastavení měřicích parametrů a časový odhad měření [autor]	53
<i>Obr. 37</i> Hrubě nasnímaná data – prvotní sken [autor]	53
<i>Obr. 38</i> Vyrovnání povrchu funkcí Leveling [autor]	54
<i>Obr. 39</i> Nastavení vyrovnání povrchu metodou nejmenších čtverců [autor]	55
<i>Obr. 40</i> Vyrovnaný povrch ve 2D + 3D vizualizace [autor]	55
<i>Obr. 41</i> Grafické znázornění rozřezání povrchu na jednotlivé profily [autor]	56
<i>Obr. 42</i> Finální podoba naměřených dat ze softwaru Talymap GOLD [autor]	57
<i>Obr. 43</i> Ověření heterogenity optickým mikroskopem Zeiss [autor]	58
<i>Obr. 44</i> Specifikace primární, sekundární a terciální oblasti kvality povrchu [autor]	59
<i>Obr. 45</i> Vyhodnocování dat parametru Rmr v Minitab 17 [autor]	60
<i>Obr. 46</i> Rozptyl hodnot parametru X_Rmr [autor]	60
<i>Obr. 47</i> Variační koeficient X_Rmr [autor]	61
<i>Obr. 48</i> Rozptyl hodnot parametru X_Rδc [autor]	62
<i>Obr. 49</i> Variační koeficient X_Rδc [autor]	62
<i>Obr. 50</i> Průběh hodnot X_Rδc v jednotlivých řezech [autor]	63
<i>Obr. 51</i> Testování na přítomnost odlehlých hodnot X_Rδc [autor]	63
<i>Obr. 52</i> Lineární regrese X_Rδc – polynom 2. stupně [autor]	65
<i>Obr. 53</i> Lineární regrese X_Rδc – polynom 3. stupně [autor]	65
<i>Obr. 54</i> Posouzení tvaru regresní křivky X_Rδc (polynom 3. stupně) [autor]	67
<i>Obr. 55</i> Těsnost proložení dat nelineárními regresními modely X_Rδc [autor]	68
<i>Obr. 56</i> Srovnání lineární kubické regrese a nelineární asymptotické konvexní regrese ...	69
<i>Obr. 57</i> Rozptyl hodnot parametru X_RSm [autor]	70
<i>Obr. 58</i> Variační koeficient X_RSm [autor]	70
<i>Obr. 59</i> Testování na přítomnost odlehlých hodnot X_RSm [autor]	71
<i>Obr. 60</i> Kvadratická lineární regrese X_RSm [autor]	72
<i>Obr. 61</i> Nelineární regresní model asymptotický konkávní [autor]	73
<i>Obr. 62</i> Srovnání lineární kvadratické regrese a nelineární asymptotické konkávní regrese [autor]	74

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Maximální doporučená tloušťka materiálu pro řezání CO2 laserem [autor].....</i>	<i>23</i>
<i>Tab. 2 Předpokládaná drsnost neperiodických profilů, základní délky pro měření [23]</i>	<i>33</i>
<i>Tab. 3 Rozhodování o nulové hypotéze [36]</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 4 Rozhodnutí o nulové hypotéze na základě P hodnoty [autor]</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 5 Chemické složení žáruvzdorné oceli 1.4828</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 6 Řezné parametry vláknového laseru pro řezání žáruvzdorné oceli 1.4828 [autor]..</i>	<i>50</i>
<i>Tab. 7 Nastavení jednotlivých parametrů struktury povrchu v Talymap GOLD [autor].....</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 8 Nastavení filtrů v Talymap GOLD [autor]</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 9 Testování kubického regresního modelu $X_{R\delta c}$ [autor]</i>	<i>66</i>
<i>Tab. 10 Chyby jednotlivých nelineární regresních modelů $X_{R\delta c}$ [autor].....</i>	<i>69</i>
<i>Tab. 11 Testová kvadratického regresního modelu X_{RSm} [autor]</i>	<i>72</i>
<i>Tab. 12 Chyby nelineárního asymptotického konkávního modelu X_{RSm} [autor].....</i>	<i>73</i>

