

Predikce parametrů drsnosti povrchu při broušení s využitím statistických metod

David Válek

Bakalářská práce
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **David Válek**
Osobní číslo: **T11299**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Predikce parametrů drsnosti povrchu při broušení s využitím statistických metod**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární studie zaměřené na problematiku bakalářské práce
2. Měření vybraných parametrů drsnosti povrchu
3. Statistické hodnocení naměřených dat
4. Vytvoření systému sloužícího pro predikci hodnot parametrů jakosti povrchu vycházejícího z regresní analýzy

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

Dle doporučení vedoucího práce

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Luboš Rokyta

Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce:

10. února 2014

Termín odevzdání bakalářské práce:

23. května 2014

Ve Zlíně dne 10. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

Příjmení a jméno: David Válek

Obor: Technologická zařízení

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou 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 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou 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);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské 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.

Ve Zlíně 17.5.2014



.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ 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, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

³⁾ 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, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídně k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá predikcí parametrů drsnosti povrchu s využitím statistických metod, především regresní analýzy.

V teoretické části je přiblížena problematika statistiky, základy technologie broušení a měření drsnosti povrchu.

V praktické části je popsáno měření parametru drsnosti povrchu Ra a následné statistické vyhodnocení naměřených dat. Na základě naměřeného parametru drsnosti povrchu a s využitím statistických metod je vytvořen systém dat. Tento systém je v mezích platnosti regresní analýzy schopen určit hodnotu zvoleného parametru drsnosti povrchu i při hodnotách technologických podmínek, při nichž nebylo měření prováděno.

Klíčová slova: statistika, broušení, drsnost povrchu

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the prediction of the parameters of the surface roughness under the use of the statistical methods, especially regressive analysis.

The theoretical part nears the problematic of statistics, principles of grinding and measuring of surface roughness.

The practical part describes measuring of surface roughness parameter Ra and subsequent statistical evaluation of the data measured. A system of the data is created based on the measured surface roughness parameter and when the statistical methods in use. Within the bounds of validity of regressive analysis, this system is capable of fixing the value of the surface roughness parameter chosen even at the values of technological conditions that the measuring has not been carried out at.

Keywords: statistics, grinding, surface roughness

Děkuji vedoucímu bakalářské práce, Ing. Luboši Rokytovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a čas, který mi věnoval.

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 ZÁKLADY STATISTIKY	12
1.1 ZÁKLADNÍ POJMY	12
1.1.1 Statistický soubor a statistická jednotka.....	12
1.1.2 Statistický znak	12
1.2 ZJIŠŤOVÁNÍ A PREZENTACE STATISTICKÝCH DAT	13
2 REGRESNÍ ANALÝZA	15
2.1 JEDNODUCHÁ LINEÁRNÍ REGRESE.....	15
2.1.1 Lineární regresní funkce.....	15
2.2 NELINEÁRNÍ REGRESNÍ MODELY	17
3 BROUŠENÍ	20
3.1 PODSTATA METODY BROUŠENÍ, TVORBA TŘÍSKY	20
3.2 NÁSTROJE.....	21
3.2.1 Materiály brusiva.....	22
3.2.2 Velikost zrna	23
3.2.3 Pojivo	23
3.2.4 Tvrdost	23
3.2.5 Struktura.....	24
3.2.6 Volba brousícího kotouče.....	24
3.3 ŘEZNÁ RYCHLOST	25
3.4 ZÁKLADNÍ METODY BROUŠENÍ	26
3.4.1 Vnější broušení do kulata.....	26
3.4.2 Vnitřní broušení do kulata.....	27
3.4.3 Broušení rovinné	28
3.4.4 Broušení tvarové	28
3.5 STROJE	29
3.6 DOSAHOVANÉ PARAMETRY JAKOSTI A PŘESNOSTI PŘI BROUŠENÍ.....	31
4 JAKOST POVRCHU	33
4.1 NÁZVY GEOMETRICKÝCH PARAMETRŮ	33
4.2 PARAMETRY PROFILU POVRCHU	34
II PRAKTICKÁ ČÁST	38
5 STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	39
6 BROUŠENÍ VZORKU	40

6.1	MATERIÁL VZORKU – 14109.4 (102Cr + QW).....	40
6.2	BROUSÍCI KOTOUČ – EN12413 250x20x76 A99 80 I 8 V 40M.S ⁻¹	41
6.3	BRUSKA.....	41
6.4	TECHNOLOGICKÉ PODMÍNKY	43
6.4.1	Vyvážení brousícího kotouče	43
7	MĚŘENÍ PARAMETRU DRSNOSTI POVRCHU - RA	45
7.1	DRSNOMĚR MITUTOYO SJ - 301	45
7.1.1	Kalibrace přístroje	46
8	VYHODNOCENÍ PARAMETRŮ DRSNOSTI POVRCHU.....	47
9	ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ.....	49
9.1	SYSTÉM PRO PREDIKCI PARAMETRU JAKOSTI POVRCHU - RA	51
ZÁVĚR	53	
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	54	
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	56	
SEZNAM OBRÁZKŮ	58	
SEZNAM TABULEK.....	60	
SEZNAM PŘÍLOH.....	61	

ÚVOD

Na každý funkční povrch strojních nebo jiných součástí jsou kladeny nejen požadavky na rozměrovou a geometrickou přesnost, ale i na jakost povrchu. Správně předepsaná jakost povrchu zajišťuje dlouho životnost součástí a také charakterizuje jejich vzhled. Kvalita povrchu výrobku je především ovlivňována dokončovacími způsoby obrábění. Mezi nejrozšířenější metodu obrábění patří technologie broušení.

Broušení je proces, při kterém se materiál ubírá množstvím nepravidelných a nahodile orientovaných břitů. Ruční broušení patří mezi nejstarší způsoby obrábění, strojové broušení se používá k obrábění kovů, keramiky, skla, ale také dřeva a umělých hmot. Broušení lze i nejtvrďší materiály a při strojovém broušení lze dosahovat vysoké přesnosti a velmi kvalitního povrchu.

Výsledný povrch je ovlivňován velkým množstvím faktorů. Mezi ně patří zvolený nástroj a stroj, řezné podmínky, chladicí kapalina apod. Významný vliv na výsledek obráběcí operace má také materiál obrobku, který je podstatnou složkou všech procesů obrábění. Má důležitý vliv na degradaci nástroje a na jeho trvanlivost. Z tohoto důvodu je výběr nástrojového materiálu a volba optimálních řezných podmínek založena na vlastnostech materiálu obrobku. Proces broušení je tedy závislý na mnoha různých parametrech, to má za následek obtížnou predikci výstupních parametrů broušené plochy.

Tato bakalářská práce se zabývá predikcí parametru drsnosti povrchu s využitím statistických metod, především s použitím regresní analýzy. Jedná se o predikci parametru drsnosti povrchu v daných technologických podmínkách a určité oblasti měření. To může být přínosem pro praxi v podobě snížení výrobních nákladů, zkrácení výrobních časů apod.

TEORETICKÁ ČÁST

1 ZÁKLADY STATISTIKY

„Statistika je vědní obor, jehož metody jsou důležitým nástrojem pro výzkum v mnoha oblastech. Statistické metody nacházejí uplatnění v ekonomii, ve společenských vědách (sociologii), vědách přírodních (biologii, chemii) a technických. Metody statistické analýzy jsou využívány v průmyslových podnicích pro řízení jakosti a v medicíně pro zkoumání účinnosti léčebných postupů. [10]”

„Pojem statistika se v současnosti používá ve třech významech:

- pro vyjádření souhrnu dat o hromadných jevech
- pro činnost směřující k získávání statistických dat, jejich uspořádání a zpracování a následnou prezentaci,
- pro vědu, jejímž cílem je zkoumání zákonitostí hromadných jevů a kterou tvoří metodologie zjišťování, zpracování a analýza dat. [1]”

1.1 Základní pojmy

1.1.1 Statistický soubor a statistická jednotka

Při zkoumání hromadných jevů předpokládáme definování vymezené množiny objektů, prvků zkoumání neboli statického souboru (soubor podniků, soubor obyvatelstva, soubor událostí apod.). Tyto jednotlivé objekty, prvky statického souboru, označujeme jako statistické jednotky, které jsou nositeli vlastností daného souboru. Pro počet statistických jednotek v souboru se používá termín rozsah souboru. Cílem statistické analýzy je vyjádřit se ke všem jednotkám určitého typu, přičemž bývá statický soubor obvykle vymezen určitou oblastí, a určitým obdobím. Tyto jednotky tvoří základní soubor (někdy označován jako populace). V praxi často nepracujeme s celým rozsahem statistického souboru, ale jen se vzorkem statistických jednotek neboli s výběrovým souborem. Důvodem je, že zkoumání celého statistického souboru by bylo nákladné, časově zdlouhavé nebo z jiných praktických ohledů neuskutečnitelné. [1,10]

1.1.2 Statistický znak

Statistika sleduje zkoumané vlastnosti statického souboru prostřednictvím měřitelných vlastností statických jednotek, které vyjadřujeme tzv. statistickými znaky. U každé statis-

tické jednotky statistického souboru je zjišťován statistický znak a nabývá slovních nebo číselných hodnot. Jednotlivé hodnoty, které může statistický znak nabývat, nazýváme obměny neboli varianty znaku. Pokud ve statistickém souboru pracujeme pouze s jedním znakem (s jednou proměnnou), jedná se o jednorozměrný soubor. Jestliže má statistický soubor současně více znaků, jde o vícerozměrový soubor. [1]

Podle způsobu zobrazení hodnot dělíme statistické znaky na : [1,10]

- znaky kvalitativní - slovní vyjádření, obvykle představují určitou vlastnost (např. typ podnikání)
- znaky kvantitativní - číselné vyjádření, obvykle představují množství nebo velikost (např. cena výrobku)

Podle způsobu zpracování se rozlišují tři skupiny statistických znaků :

- znaky nominální - často jsou vyjádřeny kvalitativně, jejich obměny jsou rovnocenné, nelze je navzájem porovnávat ani seřadit do hodnotové stupnice (např. typ podnikání)
- znaky ordinální – jsou také vyjádřeny kvalitativně, ale na rozdíl od nominálních znaků jim lze přiřadit pořadí a navzájem je porovnávat nebo seřadit (např. jakostní třída výrobku)
- znaky metrické – jsou vyjádřeny výhradně kvantitativně, jejich obměny jsou plnohodnotná čísla, se kterými lze dále počítat (např. počet prodaných výrobků za týden)

Podle počtu obměn rozlišujeme statistické znaky:

- alternativní
- množné

1.2 Zjišťování a prezentace statistických dat

„Statistické zkoumání prochází postupně několika pracovními etapami. Výchozí etapou je statistické zjišťování (statické šetření). Cílem je získávání neznámých statistických dat o hodnotách statistických znaků u jednotlivých statistických jednotek, které tvoří statistický

soubor. Každé statistické zjišťování má určitý konkrétní účel, z kterého vyplývá, jaké proměnné statistické znaky budeme zjišťovat, co zvolíme za statistickou jednotku a jak vymezíme statistický soubor. Organizace statistického zjišťování musí obsahovat prostorové, věcné a časové vymezení statistického souboru a statistických znaků.

Výsledky statistického zjišťování mají obvykle povahu velkého a nepřehledného množství číselných údajů, které je třeba pro analýzu vhodně uspořádat a utřídit. Tříděním rozumíme rozdělení jednotek souboru do skupin tak, aby vznikly charakteristické vlastnosti zkoumaných jevů. Provádíme-li třídění podle obměn jednoho statistického znaku, mluvíme o třídění jednostupňovém. Třídění podle více statistických znaků najednou označujeme jako třídění vícešupňové. [1]“

Popisná statistika používá čtyři základní formy prezentace statistických dat : [5]

- textová prezentace - je to nejjednodušší forma prezentace statistických dat, nevýhodou textové prezentace je malá přehlednost, a proto se tato forma hodí spíše k uvedení malého počtu jednoduchých informací
- tabelární prezentace – je přehledná forma prezentace většího množství strukturovaných údajů do tabulky
- grafická prezentace (grafy, diagramy) – dává rychlou a názornou představu o prezentovaných hodnotách, grafy jsou mnohem názornější než čísla v tabulce, nevýhodou grafu je omezená schopnost vyjadřovat přesné hodnoty, možnost odečítat hodnoty z grafu je limitována jeho kvalitou a rozlišením stupnic, to lze kompenzovat současnou prezentací tabulky i grafu
- číselné charakteristiky – rozložení obměn statických znaků lze vyjádřit nejen tabulkou nebo grafem, ale také vhodnou kombinací číselných charakteristik

2 REGRESNÍ ANALÝZA

„Regresní analýza se používá při zkoumání závislosti dvou a více číselných proměnných. Je to souhrn statistických metod a postupů sloužící k odhadu hodnot nebo středních hodnot nějaké proměnné odpovídající daným hodnotám jedné či většího počtu vysvětlujících proměnných. Údaje o těchto proměnných, zjištěné u n jednotek, se považují za výběrová data. [6]“

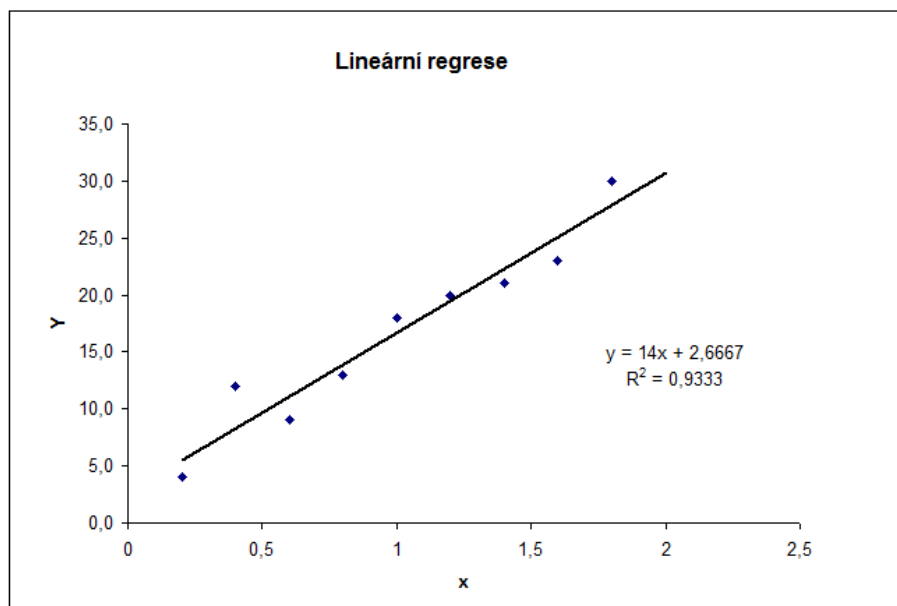
2.1 Jednoduchá lineární regrese

2.1.1 Lineární regresní funkce

Jednoduchá lineární regrese je lineární vztah mezi jednou vstupní proměnnou (X) a jednou výstupní proměnnou (Y). Tento vztah může být zapsán regresní rovnicí :

$$Y = b_0 + b_1 \cdot x \quad (1)$$

Regresní přímka by měla co nejlépe vystihovat daný statický soubor, podle toho volíme koeficienty b_0 a b_1 . Každé pozorované hodnotě nezávislé proměnné x_i v regresním modelu, bude odpovídat skutečná (empirická) hodnota závislé proměnné y_i a teoretická (vypočtená) hodnota Y_i , která leží na regresní přímce dané regresní rovnicí (1). [5]



Obr. 1. Graf lineární regresní funkce

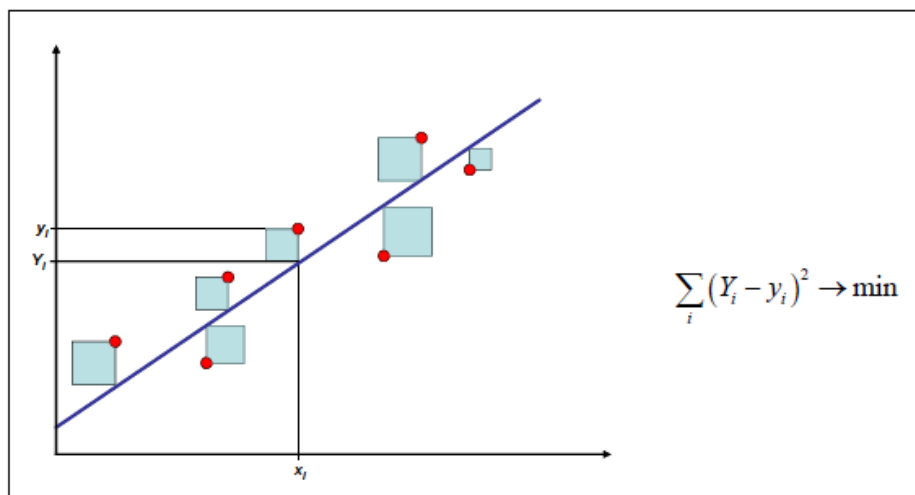
Vypočtená regresní funkce by se měla co nejvíce přimykát všem bodům.

„Požadavek dobré přiléhavosti regresní funkce je možno chápat tak, že vypočtené teoretické hodnoty Y_i se mají co nejméně lišit od skutečných hodnot y_i , jinak řečeno aby rezidua (odchylky empirických hodnot od vypočtené regresní funkce) byla vcelku co nejmenší a aby se v souhrnu kompenzovaly kladné a záporné odchylky. [1]“

Požadavek, aby součet čtverců odchylek empirických hodnot y od hodnot teoretických Y byl minimální lze zapsat takto:

$$\sum_i (Y_i - y_i)^2 \rightarrow \min$$

Aplikace tohoto kritéria se s ohledem na způsob měření odchylek označuje jako metoda nejmenších čtverců. [1]



Obr. 2. Grafické znázornění principu metody nejmenších čtverců [5]

Koeficient b_1 rovnice (1), který splňuje podmínku metody nejmenších čtverců má hodnotu:

$$b_1 = \frac{s_{xy}}{s_x^2} \quad (2)$$

Tento koeficient se nazývá regresní koeficient a někdy se také značí b_{yx} . Je směrnici regresní přímky, takže udává, jaký přírůstek nebo úbytek střední hodnoty proměnné y odpovídá jednotkovému přírůstku hodnoty proměnné x .

Koeficient b_0 můžeme zjistit ze vztahu :

$$b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x} \quad (3)$$

Často používanou charakteristikou výstižnosti regresní funkce je ukazatel R^2 , který se nazývá index determinace (determinační koeficient) a spočítá se podle vzorce :

$$R^2 = \frac{s_Y^2}{s_y^2} \quad (4)$$

kde: s_Y^2 je teoretický rozptyl (rozptyl teoretických hodnot Y)

s_y^2 je empirický rozptyl (rozptyl naměřených hodnot y)

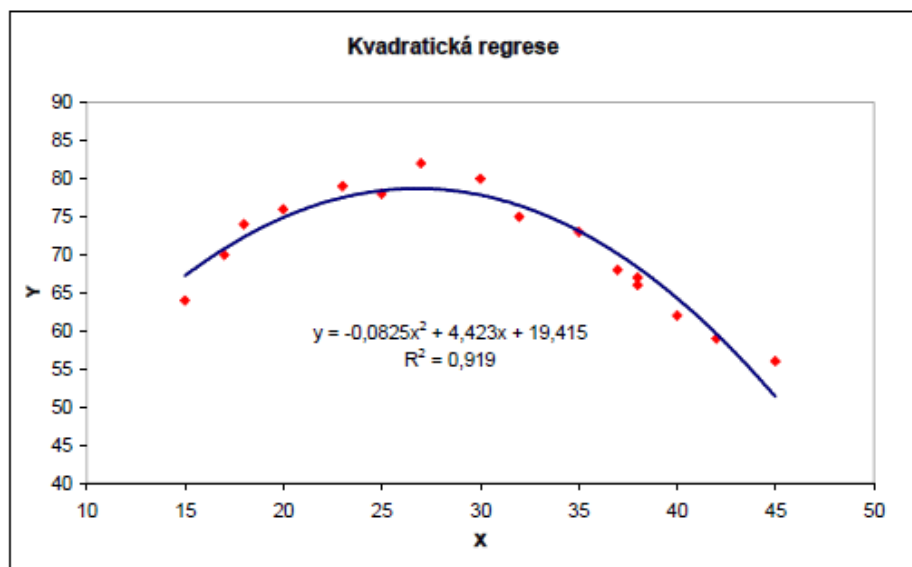
Index determinace měří kvalitu proložení bodů přímkou. Nabývá hodnot od 0 do 1 (0 znamená lineární nezávislost, hodnota 1 znamená funkční závislost). [1,5,6]

2.2 Nelineární regresní modely

Jsou případy, kdy lineární závislost nevyhovuje. V těchto případech používáme nelineární regresní funkce. Často používanými typy regresní závislosti dvou proměnných jsou :

- parabola - je grafem kvadratické regresní funkce:

$$Y = b_0 + b_1x + b_2x^2 \quad (5)$$



Obr. 3. Graf kvadratické regresní funkce [5]

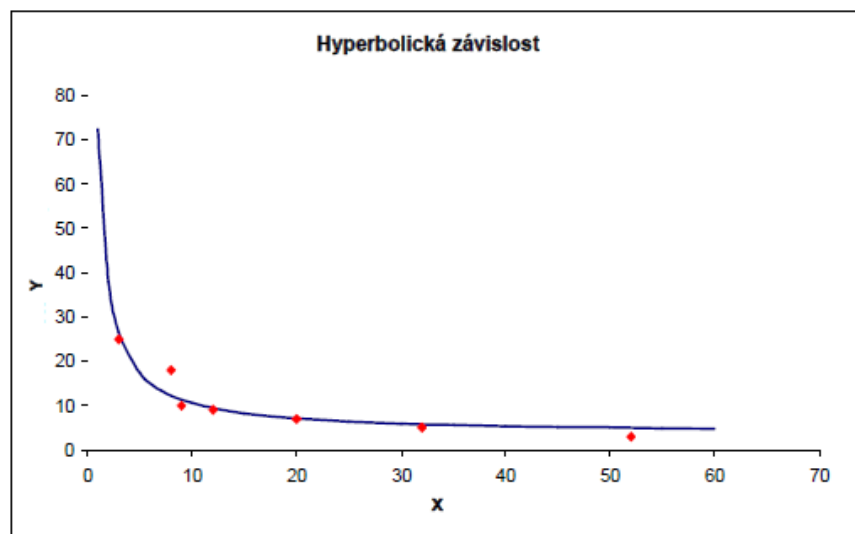
Koeficienty b_0 , b_1 a b_2 lze získat řešením soustavy tří lineárních rovnic, kterou dostaneme aplikací metody nejmenších čtverců na kvadratickou funkci (5):

$$\begin{aligned} \sum_i y_i &= n \cdot b_0 + b_1 \sum_i x_i + b_2 \sum_i x_i^2 \\ \sum_i x_i y_i &= b_0 \sum_i x_i + b_1 \sum_i x_i^2 + b_2 \sum_i x_i^3 \\ \sum_i x_i^2 y_i &= b_0 \sum_i x_i^2 + b_1 \sum_i x_i^3 + b_2 \sum_i x_i^4 \end{aligned} \quad (6)$$

Kvadratickou regresi používáme tam, kde se závislá proměnná mění rychleji než lineárně nebo pokud ve sledovaném intervalu dochází ke změně průběhu funkce z rostoucí na klesající nebo naopak. [1,5]

- hyperbola - je grafem hyperbolické regresní funkce neboli lineární lomené funkce :

$$Y = b_0 + \frac{b_1}{x} \quad (7)$$



Obr. 4. Graf hyperbolické regresní funkce [5]

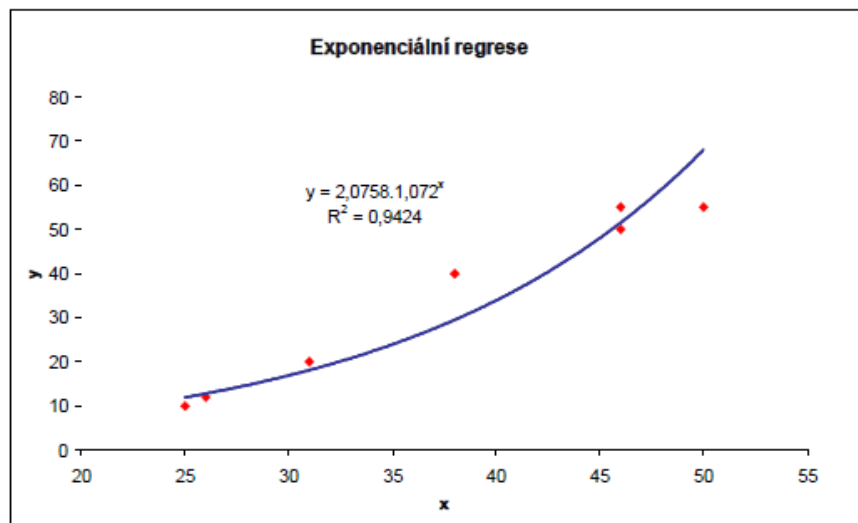
- exponenciála - exponenciální funkce má tvar:

$$Y = a_0 \cdot a_1^x \quad (8)$$

Hodnoty koeficientů a_0 a a_1 můžeme zjistit zlogaritmováním celé funkce. Po zlogaritmování dostaneme lineární závislost:

$$\ln Y = \ln a_0 + \ln a_1 \cdot x \quad (9)$$

Substitucí logaritmů a závislé proměnné Y dostaneme lineární regresní funkci (9), u které už můžeme koeficienty vypočítat pomocí metody nejmenších čtverců. [1,5]



Obr. 5. Graf exponenciální regresní funkce [5]

Metodu nejmenších čtverců lze využít i při odhadů těchto funkcí. Z důvodu nelineární závislosti musíme příslušné funkce upravit (substitucí, zlogaritmování celé funkce apod.). [5]

3 BROUŠENÍ

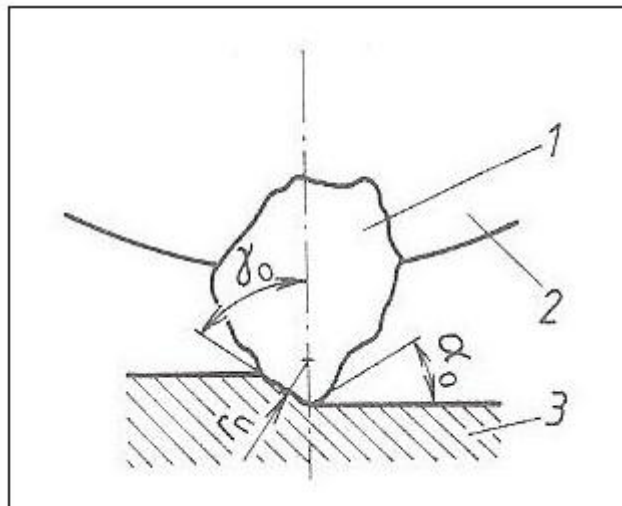
V současné strojírenské technologii představuje broušení jednu z nejprogressivnějších výrobních metod. Broušení je dokončovací metoda obrábění rovinných, válcových nebo tvarových vnějších i vnitřních ploch. Součásti tak dostanou velmi přesné rozměry a hladký povrch. Broušení se rovněž používá k ostření otupených nástrojů. [7,8]

„Broušení jako metoda obrábění na čisto se vyznačuje:

- vysokou produktivitou určenou velikostí plochy obrobku, opracované za časovou jednotku; produktivita se ovšem nezvyšuje pouze zvětšováním řezné rychlosti a obráběním velkých ploch, nýbrž i zkracováním doby nezbytné k upnutí a sejmutí obrobku (při bezhrotém broušení, při rovinném broušení s použitím magnetického upínání apod.)
- vysokou přesností obrobených rozměrů v rozmezích od 2 do 3 μm i méně
- velkou geometrickou přesností tvaru obrobených ploch, např. úchylka válcovitosti bývá v rozmezích 2 až 3 μm , neokrouhlost v rozmezí 0,4 až 0,5 μm i méně
- vysokou kvalitou povrchové vrstvy obrobku s minimálním stavem napjatosti jeho materiálu
- možností obrábění velmi tvrdých materiálů, protože zrna brusiva jsou velmi tvrdá a tepelně odolná [8]”

3.1 Podstata metody broušení, tvorba třísky

Charakteristickým znakem broušení je, že je v současném záběru velké množství zrn (břitů), která odebírají třísky velmi malých průřezů různých velikostí. Průřez třísky kolísá v rozmezí 0,001 až 0,002 mm^2 . Hloubka třísky závisí na obvodové rychlosti kotouče, průměru kotouče a průměru součástky. Čím je hloubka třísky větší, tím větší síla působí na brusné zrno a tím víc se opotřebovává brusný kotouč. V důsledku velkých plastických deformací a vnějšího i vnitřního tření se určitá část třísky ohřeje natolik, že se roztaví a vytvoří kapky kovu nebo shoří (jiskření). Brusné zrna jsou z technologického hlediska malé brusné zuby, rozložené nepravidelně s rozlišeným převýšením po obvodě a čele kotouče. Zrna brusiva mají obvykle záporné úhly čela a velké úhly hřbetu. Poloměr ostří r_n je u běžných velikostí zrn 5 až 40 μm . [4,9]



Obr. 6. Tvar zrna brousícího kotouče [9]

1- zrno, 2 – brousící kotouč, 3 – obrobek, α_0 –
úhel hřbetu, γ_0 – úhel čela, r_n – poloměr ostří

V současné strojírenské výrobě se broušení používá zejména na dokončovací obrábění ploch s vysokou přesností a vysokou jakostí obrobeneho povrchu, opracování materiálů s vysokou pevností a tvrdostí, kde je obrábění jinými nástroji obtížné, nebo nemožné (keramické materiály, kalené oceli apod.). [9]

3.2 Nástroje

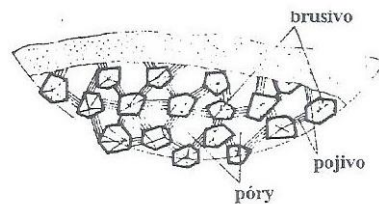
Nástroje na broušení jsou brousící kotouče, segmenty, kameny a pásy. Obsahují zrna brusiva ve vhodném pojivu.

Zrna brusiva mohou být:

- volná (brousící a leštící pasty nebo ve formě prášku pro broušení kapalinou, ultrazvukem nebo jiným podobným způsobem obrábění tvrdých materiálů)
- vázaná
 - a) v tuhých nebo pružných tělesech (brousící kotouče, brousící tělíska, superfinišovací a honovací kameny, brousící pilníky apod.)
 - b) nanesená a zakotvená na brousících páslech, brousících a leštících plátnech, papírech

Nejčastěji používanými brousícími nástroji jsou brousící kotouče, které mohou mít nejrůznější tvary a velikosti. Pro kotouč jsou charakteristické vlastnosti dány jeho označením, které obsahuje:

- typ brousícího kotouče (tvar a rozměry)
- druh brousícího materiálu
- zrnitost
- tvrdost
- struktura
- druh pojiva
- maximální pracovní rychlost kotouče [8,9]



Obr. 7. Struktura kotouče

3.2.1 Materiály brusiva

Nejčastěji používané materiály brusiva jsou uvedeny v tabulce : [9]

Materiál brusiva	Barva	Označení
<i>Přírodní:</i>		
Granát		G
Smirek		S
Pazourek		P
<i>Umělý:</i>		
Umělý korund Al_2O_3	bílý	99A
	růžový	98A
	hnědý	96A
	černý	85A
Karbid křemíku SiC	zelený	49C
	černý	48C
Karbid boru B_4C		B
Kubický nitrid boru N_2B_3		BN
Diamant (přírodní i umělý)		D

Tab. 1. Materiály brusiva [9]

3.2.2 Velikost zrna

Velikost zrna je dána číslem dle normy *ČSN ISO 525* a *ČSN ISO 22 4012*. Toto číslo odpovídá počtu ok na délku jednoho anglického palce toho síta, kterým při třídění ještě zrno propadne. Zrna se podle velikosti označují číslly od nejhrubšího po nejjemnější:

- hrubá: 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 14, 16, 20, 24
- střední: 30, 36, 40, 46, 54, 60
- jemná: 70, 80, 90, 100, 120, 150, 180
- velmi jemná: 220, 240, 280, 320, 360, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200

Pro hrubování volíme hrubší zrno, pro dokončování a malé zahřátí obrobku volíme jemnější zrno. [9]

3.2.3 Pojivo

Pojivo slouží k vázání jednotlivých zrn brusiva. Druh pojiva určuje pevnost kotouče a tím také maximální obvodovou rychlost. Pro brousící kotouče z umělého korundu a karbidu křemíku se používají pojiva keramická (označení V), pryžová (R), z umělé pryskyřice (B), šelaková (E) a magnezitová (Mg). Pro kotouče z kubického nitridu boru a diamantu se používají pojiva kovová, galvanická kovová, keramická a pojiva z umělé pryskyřice. Zvětšení pevnosti kotouče v tahu lze dosáhnout armorováním kotoučů skelnými vlákny a ocelovými kroužky, používání vrstvených kotoučů, kotoučů bez středového otvoru apod. [9,12]

3.2.4 Tvrdost

Tvrdost necharakterizuje tvrdost zrn brusiva, ale jejich soudržnost s pojivem. Stupeň tvrdosti je definován jako odpor, který klade zrno proti vylomení z brousícího nástroje. Tvrdost můžeme měřit např. vrypem drátem, podle důlku po otryskání pískem, vtlačení kuličky, podle zvuku apod. Tvrdost kotouče označujeme písmeny A (nejměkčí) až Z (nejtvrděší). Běžně používané kotouče:

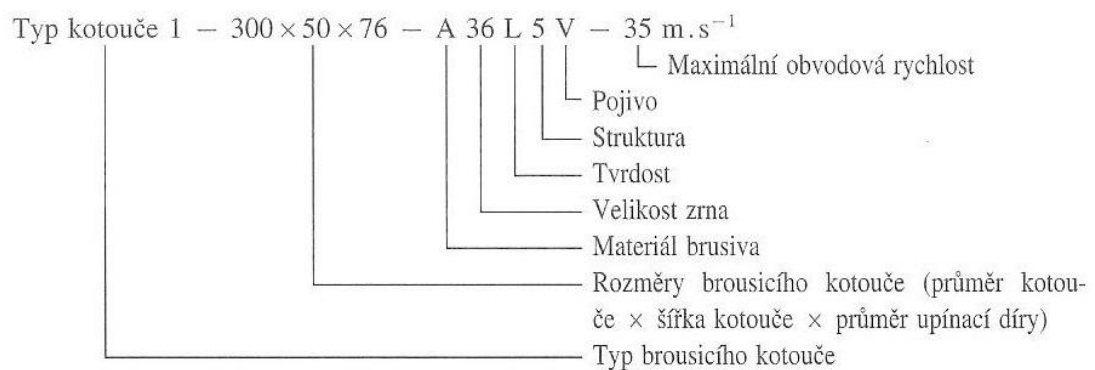
- Měkké: I, J, K
- Střední: L, M, N, O, P, Q
- Tvrdé: R, S, T [3,9]

3.2.5 Struktura

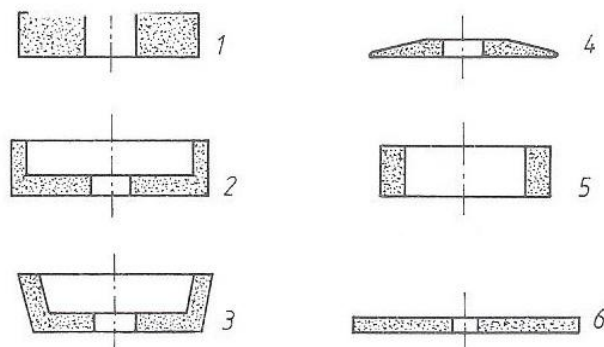
Struktura (pórovitost) kotouče vyjadřuje poměr mezi zrny brusiva, pojivem a póry. Označuje se číslicemi od 0 do 14. Čím větší je číslo, tím je vzdálenost mezi zrny větší. [9]

3.2.6 Volba brousícího kotouče

Podle materiálu obrobku a jeho mechanických vlastností se volí typ brusiva a tvrdost kotouče. Volba kotouče, jeho tvar a velikost závisí na tvaru plochy broušené součásti. Kvůli zachování samoostřící schopnosti se volí pro broušení tvrdších materiálů kotouče měkčí a naopak. Velikost zrna se volí podle požadovaného výkonu broušení a jakosti obrobeného povrchu. [9]



Obr. 8. Příklad označení brousícího kotouče [9]



Obr. 9. Některé tvary brousících kotoučů [9]

1 - plochý, 2 - hrncový, 3 - miskový, 4 - kuželový, 5 - prstencový, 6 – řezací

3.3 Řezná rychlost

„Výsledný řezný pohyb při broušení je obvykle výslednicí pohybu brusného kotouče a obrobku. Protože obvodová rychlost brusného kotouče je oproti rychlosti obrobku značně vyšší, považujeme za řeznou rychlost obvodovou rychlost kotouče v_k . [4]”

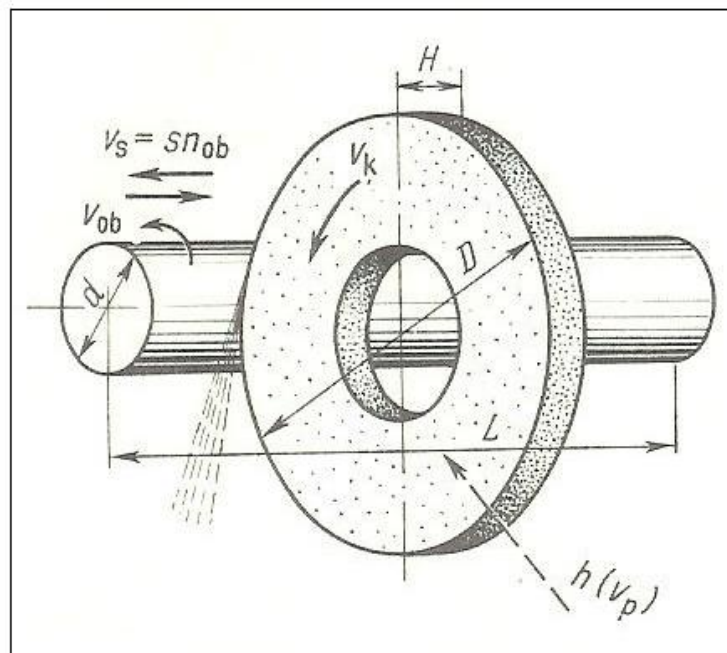
Pro výpočet řezné rychlosti kotouče platí vztah:

$$v_k = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000 \cdot 60} \quad (10)$$

kde v_k je řezná rychlost [m/s]

D - průměr brusného kotouče [mm]

n - otáčky brusného kotouče [min^{-1}]



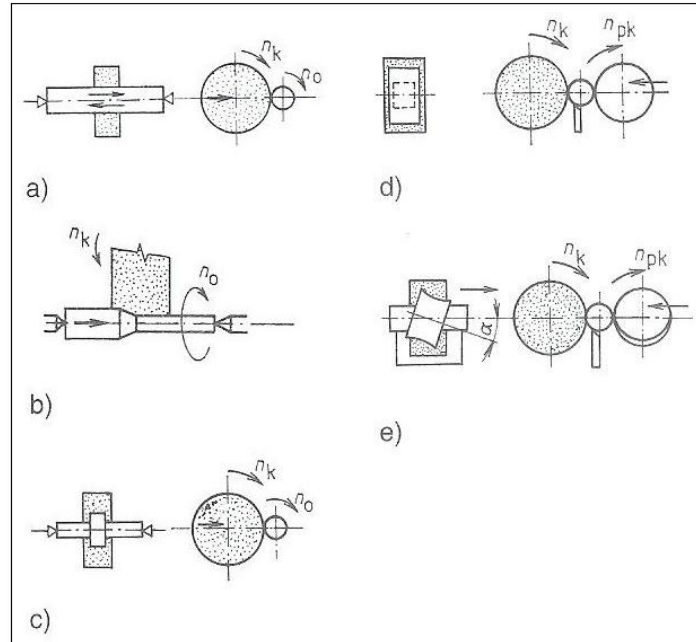
Obr. 10. Schéma broušení vnějších válcových ploch posuvem podél osy obrobku [8]

v_k – obvodová rychlost brousícího kotouče [m/s], v_{ob} – obvodová rychlost obrobku [m/min], v_s – podélný posuv [mm/min], $h(v_p)$ – přísuv [mm/min], D, d – průměr brousícího kotouče a obrobku [mm], H – šířka brousícího kotouče [mm], L – délka broušené plochy [mm]

3.4 Základní metody broušení

3.4.1 Vnější broušení do kulata

- axiální (s podélným posuvem) - Používá se k obrábění dlouhých součástí.
- axiální hloubkové - Tímto způsobem lze u tuhých obrobků odebrat celý přídavek najednou. Kotouč má náběhovou kuželovou část a válcovou část, která odebírá náčisto.
- zápichové - Slouží k obrábění krátkých tuhých součástí, kdy se celý přídavek odebírá na jeden příčný posuv. Šířka brousícího kotouče musí být větší, než šířka broušené plochy broušeného obrobku.
- bezhroté (zápichové nebo axiální) - Využívá se při broušení válcových nebo i tvarových ploch. Součástka není upnuta, ale vkládá se mezi brousící a podávací kotouč a je opřena deskou. Produktivní metoda využívaná v sériové výrobě. [9]

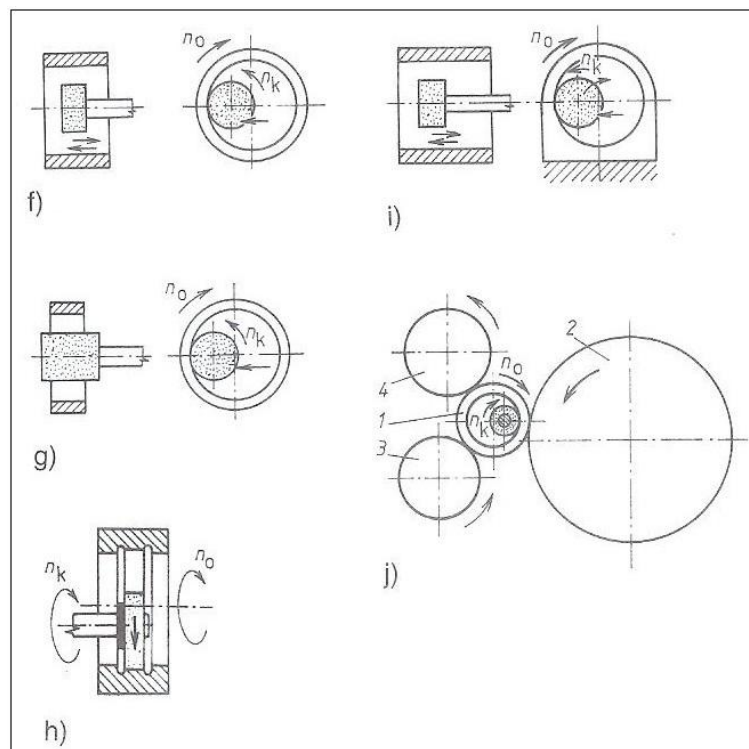


Obr. 11. Vnější broušení do kulata [9]

- a) axiální broušení, b) axiální hloubkové broušení,
 c) zápichové broušení, d) bezhroté zápichové broušení,
 e) bezhroté axiální broušení

3.4.2 Vnitřní broušení do kulata

- axiální (s podélným posuvem) - Provádí se broušícím kotoučem, jehož průměr je maximálně 0,9 průměru broušené díry. Obrobek se posouvá podélně ve směru osy.
- zápichové - Šířka broušícího kotouče je větší než délka broušené plochy. Užším kotoučem lze brousit i drážky.
- planetové - Používá se k broušení děr ve velkých součástech. Obrobek je pevně upnut a nepohybuje se, všechny pohyby vykonává broušící kotouč.
- bezhroté - Součást je vedena podávacím kotoučem a dvěma opěrnými kotouči. [9]

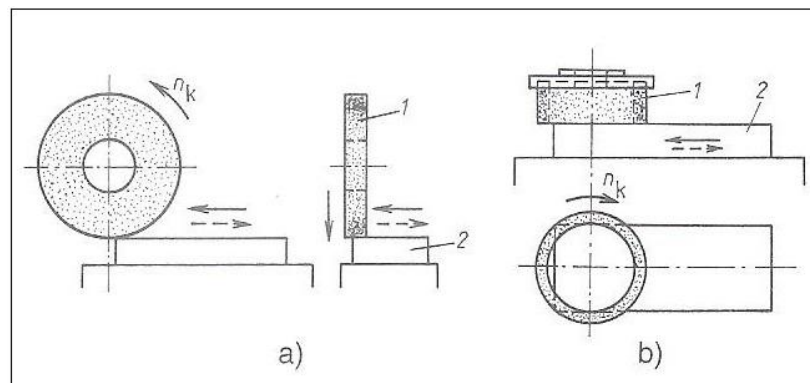


Obr. 12. Vnitřní broušení do kulata [9]

f) podélné vnitřní broušení, g) zápichovací vnitřní broušení, h) zápichování drážky, i) planetové broušení, j) vnitřní bezhroté broušení (1 - obrobek, 2, 3, 4 - podávací kladky), n_k - ot. broušícího kotouče, n_o - otáčky obrobku

3.4.3 Broušení rovinné

- obvodem kotouče - Obrobek koná vratný přímočarý pohyb. Pokud je širší než brousící kotouč, posouvá se v úvrati ve směru osy kotouče. Je-li obrobek užší, lze brousit zapichovacím způsobem.
 - čelem kotouče - Používá se při odbrušování větších přídavků na velkých plochách.
- [9]



Obr. 13. Rovinné broušení [9]

a) obvodem kotouče, b) čelem kotouče

1 - brousící kotouč, 2 - obrobek, n_k - otáčky brousícího kotouče

3.4.4 Broušení tvarové

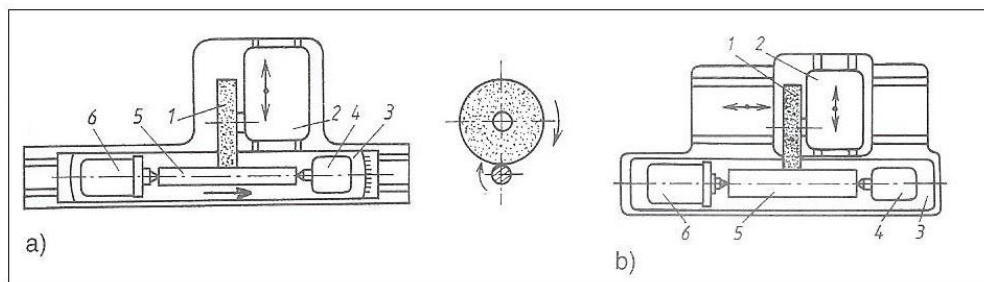
„Tvarové plochy se brousí zapichovacím způsobem tvarovými brousícími kotouči, nebo se musí kotouči udělit pohyb, odpovídající broušenému tvaru - buď kopírovacím způsobem, nebo numerickým řízením brusky. [9]”

- tvarovým kotoučem
- kopírovacím způsobem
- na NC a CNC brousících strojích

3.5 Stroje

Brusky dělíme podle prováděných operací na:

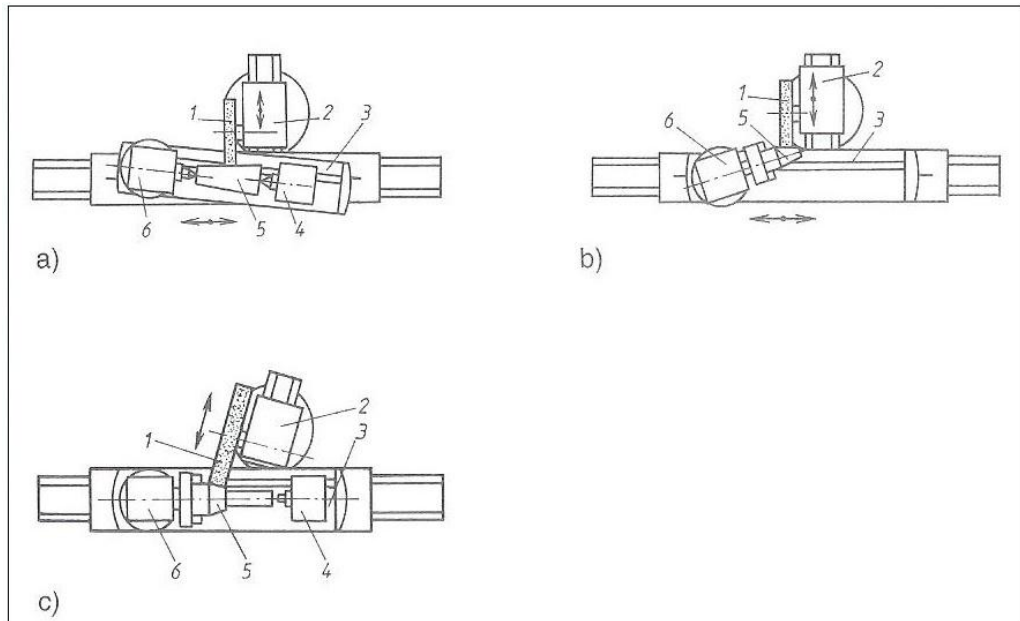
- hrotové - s posuvným stolem nebo posuvným vřeteníkem
- na díry
- bezhroté - pro vnější nebo vnitřní broušení
- rovinné - pracující obvodem nebo čelem kotouče
- nástrojářské
- pásové
- speciální - jemné broušení, závitů, ozubení, na klikové hřídele apod. [9]



Obr. 14. Hrotové brusky [9]

a) s posuvným stolem, b) s posuvným vřeteníkem

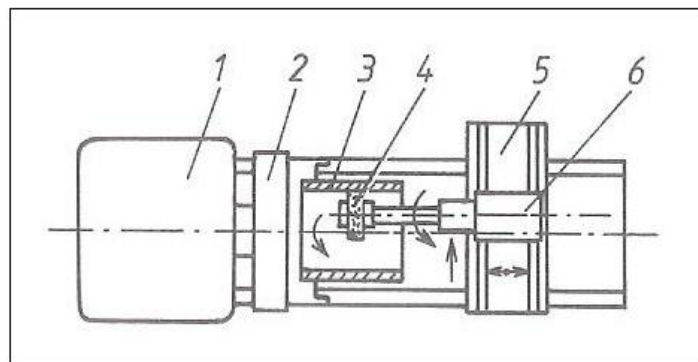
1 - brousící kotouč, 2 - brousící vřeteník, 3 - stůl, 4 - koník, 5 - obrobek, 6 - pracovní vřeteník



Obr. 15. Broušení kuželových ploch [9]

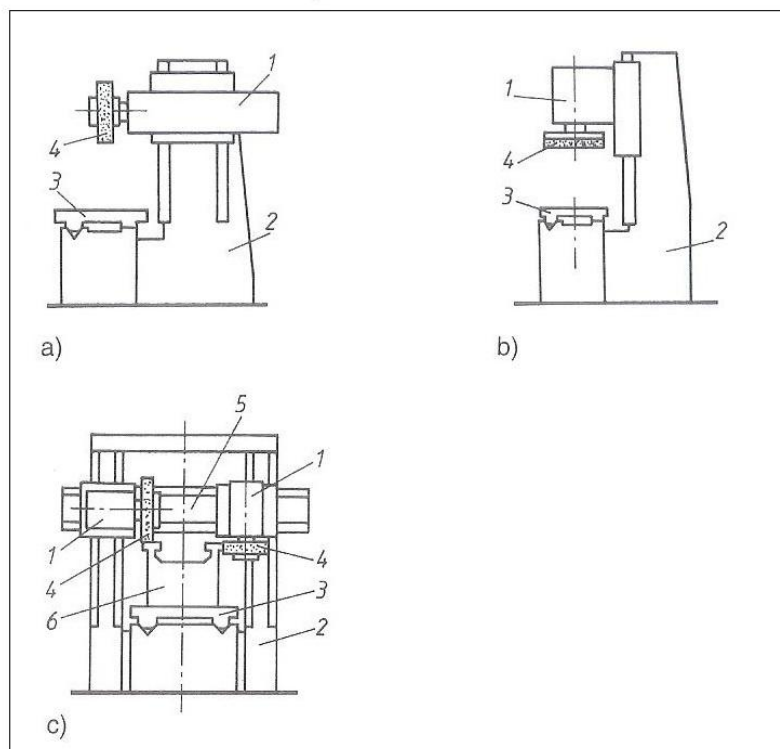
a) natočením pracovního stolu, b) natočením pracovního vřeteníku, c) natočením brousícího vřeteníku

1 - brousící kotouč, 2 - brousící vřeteník, 3 - stůl, 4 - koník, 5 - obrobek, 6 - pracovní vřeteník



Obr. 16. Bruska na díry [9]

1 - pracovní vřeteník, 2 - sklíčidlo, 3 - obrobek, 4 - brousící kotouč, 5 - suport, 6 - brousící vřeteník



Obr. 17. Rovinné brusky [9]

a) bruska pracující obvodem kotouče, b) bruska pracující

čelem kotouče, c) dvojstojanová bruska

1 - vřeteník, 2 - stojan, 3 - pracovní stůl, 4 - brousící kotouč, 5 - příčník, 6 - obrobek

3.6 Dosahované parametry jakosti a přesnosti při broušení

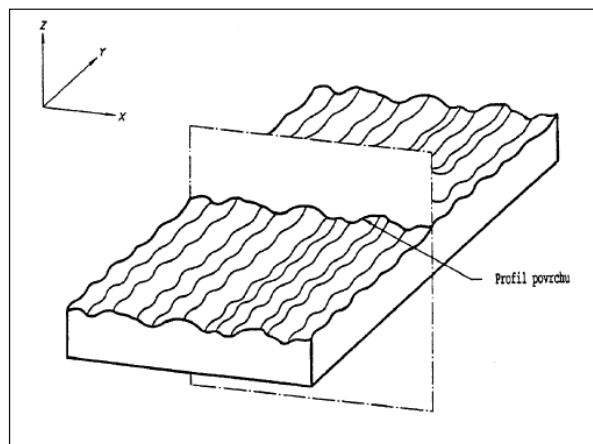
Přesnost rozměrů a jakost obrobené plochy závisí na tuhosti a přesnosti brusky, velikosti zrna a dalších vlastnostech brousícího kotouče, na způsobu broušení a na řezných podmínkách. [9]

Tvar broušené plochy	Způsob broušení	Přesnost rozměrů IT	Jakost obrobené plochy Ra (μm)
Rovinná	hrubování	9 až 11	0,8 až 6,3
	čelem	8 až 11	0,8 až 3,2
	obvodem		
	načisto		
	čelem	5 až 7	0,2 až 1,6
	obvodem	5 až 7	0,2 až 1,6
	jemné broušení	3 až 5	0,025 až 0,4
Vnitřní válcová	hrubování	9 až 11	1,6 až 3,2
	načisto	5 až 7	0,4 až 1,6
	jemné broušení	3 až 6	0,05 až 0,4
Vnější válcová	hrubování	9 až 11	1,6 až 3,2
	načisto	5 až 7	0,4 až 1,6
	jemné broušení	3 až 6	0,025 až 0,4

Tab. 2. Přesnost a jakost ploch obrobených broušením [9]

4 JAKOST POVRCHU

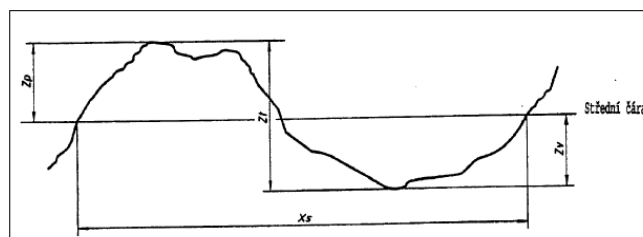
Jakost povrchu je souhrn vlastností, které charakterizují geometrický, fyzikální a chemický stav povrchové vrstvy. Je důležitým činitelem zejména pro dynamicky namáhané součásti, které se začínají porušovat zpravidla od povrchu. Větší drsnost nepříznivě působí na únavovou pevnost součásti, a popřípadě i na jejich odolnost proti otěru. Norma ČSN EN ISO 4287 stanovuje termíny, definice a parametry pro určování struktury povrchu (drsnoti, vlnitosti a základního profilu) profilovou metodou. [2,11]



Obr. 18. Profil povrchu jako průsečnice skutečného povrchu a dané roviny [2]

4.1 Názvy geometrických parametrů

- P (parametr struktury) - parametr vypočítaný ze základního profilu
- R (parametr drsnosti) - parametr vypočítaný z profilu drsnosti
- W (parametr vlnitosti) - parametr vypočítaný z profilu vlnitosti
- prvek profilu - výstupek profilu a přilehlá prohlubeň



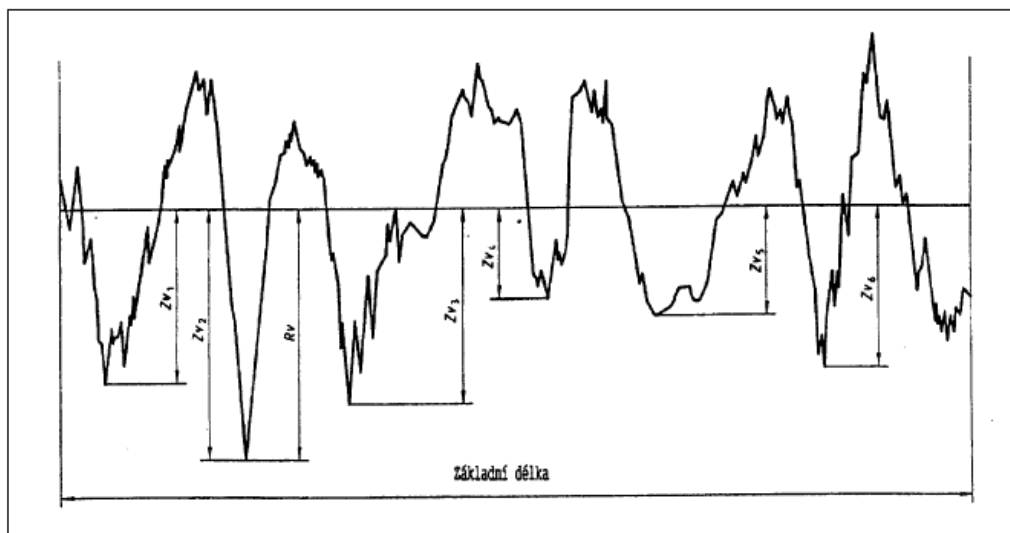
Obr. 19. Prvek profilu [2]

- výška výstupku profilu - Z_p : vzdálenost mezi osou X a nejvyšším bodem výstupku profilu
- hloubka prohlubně - Z_v : vzdálenost mezi osou X a nejnižším bodem prohlubně profilu
- výška profilu - Z_t : součet výšky výstupku a hloubky prohlubně prvku profilu
- šířka profilu - X_s : délka úseku osy X protínající prvek profilu [2]

4.2 Parametry profilu povrchu

V dnešní praxi se používá hodnocení povrchu ve 2D a 3D. 2D hodnocení je nejrozšířenějším způsobem zjišťování geometrie povrchu a patří zde mnoho parametrů určující drsnost povrchu jako jsou: [2,13]

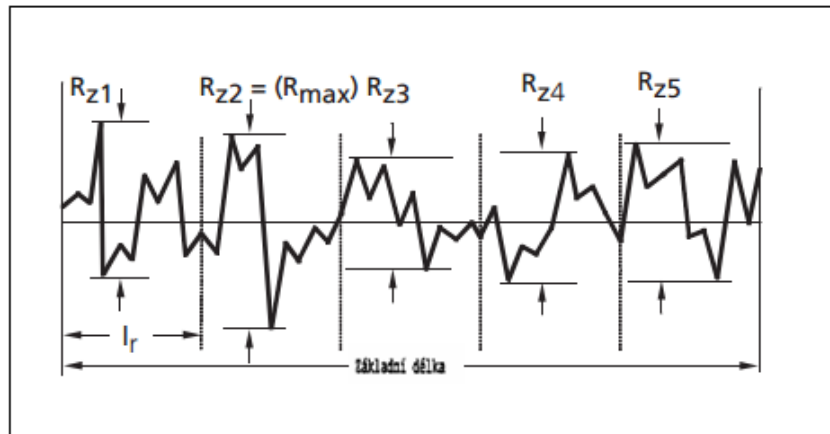
- Největší hloubka prohlubně profilu - R_v
- hloubka Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky



Obr. 20. Největší hloubka prohlubní profilu [2]

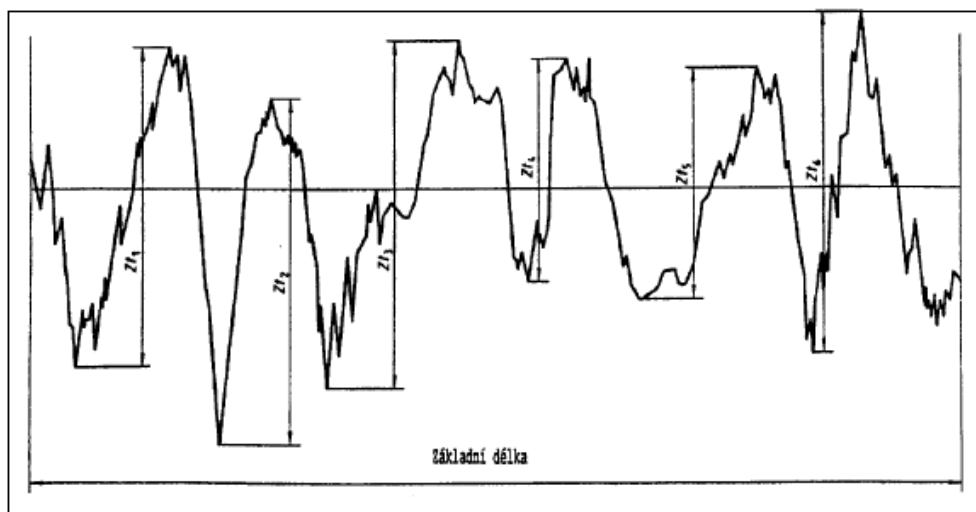
- Největší výška profilu - R_z
- jednotlivá hloubka drsnosti R_{zi} je součtem výšky největší špičky profilu a hloubky největší prohlubně profilu drsnosti jednotlivé měřicí dráhy.

- hloubka drsnosti R_z je aritmetická střední hodnota z jednotlivých hloubek drsnosti R_{z_i} za sebou následujících jednotlivých měřicích drah
- maximální hloubka drsnosti R_{max} je největší jednotlivá hloubka drsnosti uvnitř celkové měřicí dráhy [13]



Obr. 21. Hloubka drsnosti [13]

- Průměrná výška prvků profilu - R_c
- průměrná hodnota výšek Z_t prvků profilu v rozsahu základní délky [2]



Obr. 22. Výška prvků profilu [2]

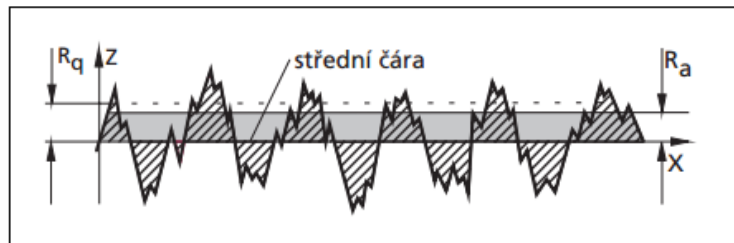
- Střední hodnoty - R_a , R_q
- střední hodnota drsnosti R_a je aritmetickou střední hodnotou všech částí hodnot profilu drsnosti :

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (11)$$

- střední hodnota R_q je kvadratickou střední hodnotou všech hodnot profilu drsnosti:

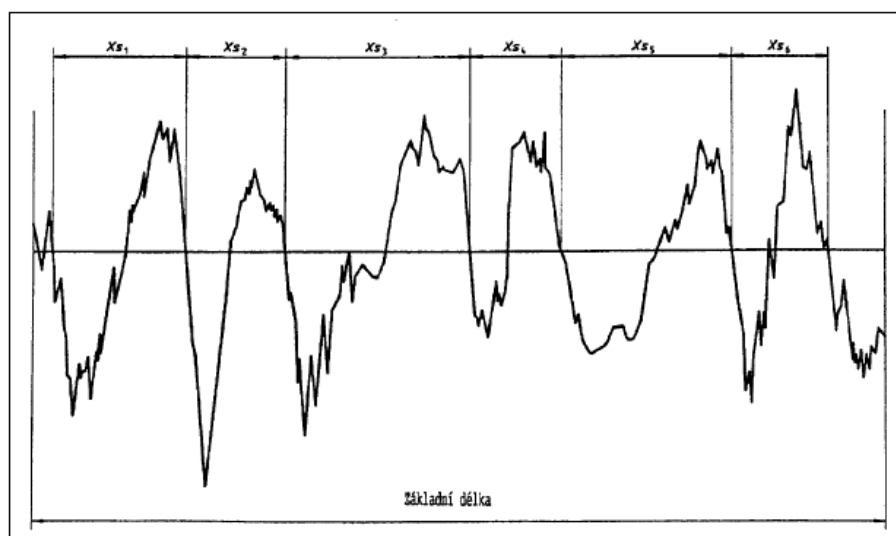
$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx} \quad (12)$$

- $Z(x)$ = profilové hodnoty profilu drsnosti [13]



Obr. 23. Střední hodnoty R_a , R_q [13]

- Průměrná šířka prvků profilu - RS_m
- aritmetický průměr šířek X_s prvků profilu v rozsahu základní délky [2]



Obr. 24. Šířka prvků profilu [2]

5 ZÁVĚR TEORETICKÉ ČÁSTI

Teoretická část bakalářské práce se dá rozdělit na tři části:

- část o statistice - obsahuje základní pojmy statistiky a přibližuje pojem regresní analýza
- část zabývající se broušením - popisuje podstatu metody broušení, používané stroje a nástroje, rezné rychlosti a základní metody broušení
- poslední částí je jakost povrchu - obsahuje názvy geometrických parametrů a hlavní parametry profilu povrchu

Tyto části byly zvoleny s důvodu vhodného popisu problematiky, která bude řešena v rámci praktické části této práce.

PRAKTICKÁ ČÁST

6 STANOVENÍ CÍLŮ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

- 1) Vypracování literární studie popisující základy statistiky, podstatu metody broušení a hlavních parametrů jakosti povrchu
- 2) Měření vybraného parametru drsnosti povrchu na vzorcích, které byly předem broušeny za daných technologických podmínek
- 3) Statistické hodnocení naměřených dat drsnosti povrchu
- 4) Vytvoření systému vycházejícího z regresní analýzy a ze zpracovaných dat, sloužícího pro predikci hodnot parametru jakosti povrchu vzhledem k určeným vstupním parametrům hloubky řezu a_p a posuvové rychlosti v_f .

7 BROUŠENÍ VZORKU

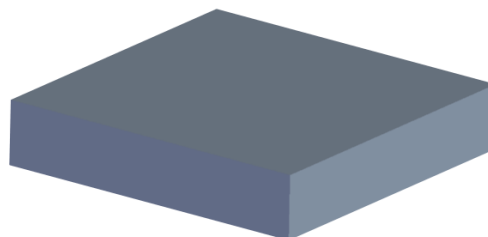
7.1 Materiál vzorku – 14109.4 (102Cr + QW)

Materiálem vzorku je ocel, která je nejpoužívanější zejména pro výrobu ložisek. Také se používá ve velkém množství dalších průmyslových aplikací. Patří do skupiny ocelí, jež jsou legovány chromem popřípadě manganem, či křemíkem a hliníkem. Tyto slitinové oceli umožňují dosáhnout velmi dobrých vlastností bez použití nedostatkových prvků. Obvykle se cementují, zušlechťují, kalí, některé jsou určeny k nitrídování. Na oceli (14 109) jsou kladeny velké požadavky, co se týká mikročistoty materiálu. Sleduje se hlavně velikost a tvar nekovových vměstků, zejména siričků a oxidů, hlavně Al_2O_3 . Rozměry vzorků jsou $50mm \times 50mm \times 10mm$.

Chemické složení materiálu uvádí tab. 3 a model obr. 25.

Prvek	Obsah [%]
Uhlík	0,98 – 1,1
Chrom	1,3 – 1,6
Mangan	0,25 – 0,45
Křemík	0,15 – 0,35
Síra	0,025 max
Fosfor	0,025 max

Tab. 3. Chemické složení skupiny ocelí



Obr. 25. Model vzorku

7.2 Brousící kotouč – EN12413 250x20x76 A99 80 I 8 V 40m.s⁻¹

Jedná se o jemnozrnné kotouče s otevřenou strukturou a keramickým pojivem. Jako základní brusivo je v těchto nástrojích využit bílý elektrokorund A99, který je vhodný na broušení náradí z nástrojových, rychlořezných a korozivzdorných ocelí (Tab. 4).

Parametr	Kotouč A	
	Označení	Popis
Rozměr	–	250x20x76 [mm]
Druh brusiva	A99	Elektrokorund bílý
Zrnitost	80	Jemná
Tvrдост	I	Měkký
Struktura	8	Otevřená
Pojivo	V	Keramické
Obvod. rychlost	–	40 [m.s ⁻¹]

Tab. 4. Charakteristika použitého brousícího kotouče

7.3 Bruska

Broušení bylo realizováno na horizontální brusce *BRH 20.03F* (Obr. 27). Jedná se o brusku s pravouhlým pracovním stolem a horizontálním vřetenem. Je určena pro broušení rovinných a tvarových ploch, součástek z oceli, litiny a ostatních kovových i nekovových materiálů, u kterých se vyžaduje dosažení vysoké přesnosti a kvality zpracování. Obrábění je prováděno obvodem brousícího kotouče. Broušené součástky podle svých rozměrů, tvaru a materiálu se mohou upínat přímo na elektromagnetickou desku, nebo prostřednictvím vhodných upínačů.

Obr. 26 Rovinná horizontální bruska *BRH 20.03*

Bruska pracuje v uzavřeném automatickém pracovním cyklu. K řízení cyklu je vybavena číslicovou indikací *NV 300E fy FAGOR*, která slouží k odměřování dráhy svislého a příčného posuvu při práci v ručním režimu a k řízení posuvu v automatickém pracovním cyklu.

Z hlediska koncepce se bruska *BRH 20.03F* vyznačuje tím, že stůl vykonává podélný pohyb po vedení vyhotoveném na předním loži a příčný posuv vykonává brusný vřeteník spolu se stojanem, ve kterém je vedení pro jeho svislý posuv. Hydraulický agregát a elektrická skříň tvoří samostatné celky umístěné mimo stroj. Bruska také může pracovat s ruční obsluhou v uzavřeném nebo neuzavřeném automatickém cyklu [14].

Zařízení je umístěno v laboratořích Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně.

Parametr stroje	jednotka	hodnota
Výška stroje	$[mm]$	2240
Hmotnost stroje	$[kg]$	1860
Rozměry brousícího kotouče	$[mm]$	250x20 – 50x76
Pracovní plocha stolu	$[mm]$	200 x 630
Rychlost stolu plynule regulovatelná	$[m.min^{-1}]$	1 – 23
Otáčky brousícího vřetena	$[min^{-1}]$	2550

Tab. 5. Vybrané parametry použité brusky

7.4 Technologické podmínky

Broušení bylo realizováno bez chlazení a brousící kotouč byl z důvodu přesnosti broušení staticky vyvážen.

Technologické podmínky broušení jsou uvedeny v tabulce (Tab. 6).

Materiál vzorku	Použitý kotouč	Posuvová rychlost	Hloubka řezu
		v_f [m.min ⁻¹]	a_p [mm]
14109.4 (102Cr6+QW)	EN12413 250x20x76 A99 80 I 8 V 40m.s ⁻¹	7	0,005
		10	0,01
		14	0,025
		21	0,04
		23	0,05

Tab. 6. Podmínky broušení

7.4.1 Vyvážení brousícího kotouče

Statické vyvažování se provádělo pomocí příruby s vyvažovacími tělísky, která se namontovala na kotouč. Následně se kotouč i s přírubou nasadil na kuželový vyvažovací trn, který byl položen na vyvažovací dílenský stojánek. Stojánek byl předem ustaven do vodorovné polohy pomocí vodováhy a vyvažovacích šroubů. Přestavováním pozic vyvažovacích tělísek byl kotouč vyvažován do doby, než se na stojánku ustálil a neotáčel se.



Obr. 27 Brousící kotouč s upínací přírubou s vyvažovacími tělísky



Obr. 28 Dílenský stojánek pro statické vyvažování

8 MĚŘENÍ PARAMETRU DRSNOSTI POVRCHU - RA

Měřeným parametrem drsnosti povrchu byla hodnota R_a . Měření bylo prováděno desetkrát pro danou hloubku řezu a posuvovou rychlost broušení. Tato hodnota byla za dodržení podmínek opakovatelnosti měřena ve směru kolmém na řezný pohyb. Pokud by byla drsnost měřena ve stejném směru jako směr řezného pohybu, měřící hrot by měřil v drážkách po řezném nástroji. To by způsobilo velmi nízké hodnoty drsnosti daného povrchu a tedy nepřesnosti měření.

8.1 Drsnoměr Mitutoyo SJ - 301

Měření parametrů drsnosti povrchu bylo realizováno s využitím přístroje *MITUTOYO SJ – 301* (Obr. 29). Tento přístroj využívá kontaktní metodu měření parametrů jakosti povrchu. Měřené hodnoty se určí z vertikálního posuvu snímacího hrotu, ke kterému dochází, při přejíždění hrotu po povrchu. Tím zařízení kopíruje mikronerovnosti způsobené obráběním. Měření lze realizovat dle nastavení různých norem pro plasty i kovové díly. Výsledky měření je možné zobrazit číselně a graficky na dotykové ovládací obrazovce a pomocí vestavěné tiskárny vytisknout, případně také provádět základní statistická hodnocení.



Obr. 29 Přístroj *Mitutoyo SJ – 301*

8.1.1 Kalibrace přístroje

Kalibrace je obecně seřízení přístroje dle určitého referenčního prvku (etalonu). Pro naše zařízení byla kalibrace realizována při změření hodnoty Ra na destičce se známou velikostí tohoto parametru. Na základě naměřené hodnoty bylo vyladěno nastavení měření přístroje. Kalibrace probíhala při určených podmínkách dle manuálu přístroje. Byla prováděna na začátku měření a vždy při nastavení nové posuvové rychlosti broušení, případně při opuštění pracoviště na delší dobu.

9 VYHODNOCENÍ PARAMETRŮ DRSNOSTI POVRCHU

Naměřená data drsnosti povrchu i jejich statistické charakteristiky jsou umístěny v příloze. V této práci jsou uvedeny pouze ve formátu aritmetického průměru a nejistoty typu A (13).

$v_f = 7 [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$					
$a_p [\text{mm}]$	0,005	0,01	0,025	0,04	0,05
$Ra [\mu\text{m}]$	$0,30 \pm 0,006$	$0,31 \pm 0,006$	$0,32 \pm 0,009$	$0,35 \pm 0,006$	$0,37 \pm 0,005$
$v_f = 10 [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$					
$a_p [\text{mm}]$	0,005	0,01	0,025	0,04	0,05
$Ra [\mu\text{m}]$	$0,32 \pm 0,006$	$0,34 \pm 0,006$	$0,36 \pm 0,003$	$0,40 \pm 0,004$	$0,42 \pm 0,003$
$v_f = 14 [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$					
$a_p [\text{mm}]$	0,005	0,01	0,025	0,04	0,05
$Ra [\mu\text{m}]$	$0,34 \pm 0,009$	$0,38 \pm 0,011$	$0,42 \pm 0,008$	$0,53 \pm 0,023$	$0,60 \pm 0,004$
$v_f = 21 [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$					
$a_p [\text{mm}]$	0,005	0,01	0,025	0,04	0,05
$Ra [\mu\text{m}]$	$0,38 \pm 0,003$	$0,40 \pm 0,003$	$0,48 \pm 0,004$	$0,60 \pm 0,005$	$0,68 \pm 0,004$
$v_f = 23 [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}]$					
$a_p [\text{mm}]$	0,005	0,01	0,025	0,04	0,05
$Ra [\mu\text{m}]$	$0,40 \pm 0,014$	$0,46 \pm 0,008$	$0,52 \pm 0,009$	$0,63 \pm 0,023$	$0,70 \pm 0,004$

Tab. 7. Průměrné hodnoty Ra

Standardní nejistota typu A:

$$u_A = k_{uA} \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (13)$$

k_{uA} - koeficient závislý od počtu opakovaných měření

n - počet měření

x_i - hodnota i -tého měření

\bar{x} - střední hodnota

Koeficient k_{Ua} se stanoví podle počtu měření:

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10 a víc
k_{Ua}	7	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1

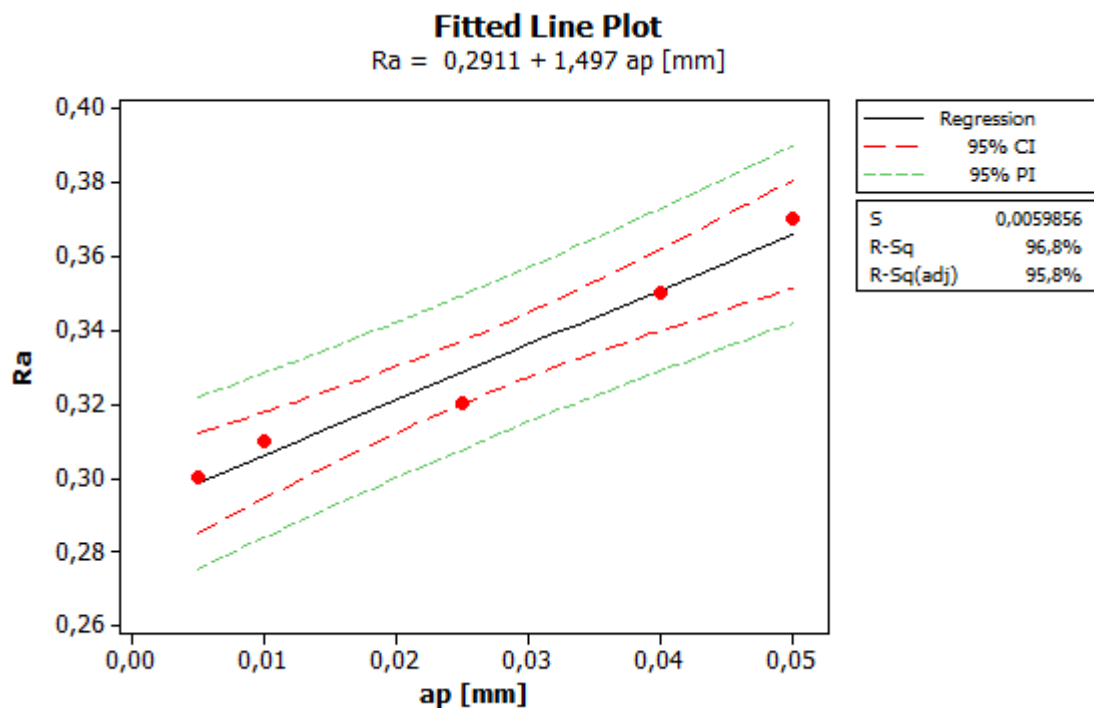
Výsledná nejistota typu A se vypočítá z jednotlivých složek u_{A1} až u_{An} .

$$u_A = \sqrt{u_{A1}^2 + u_{A2}^2 + \dots + u_{An}^2} \quad (14)$$

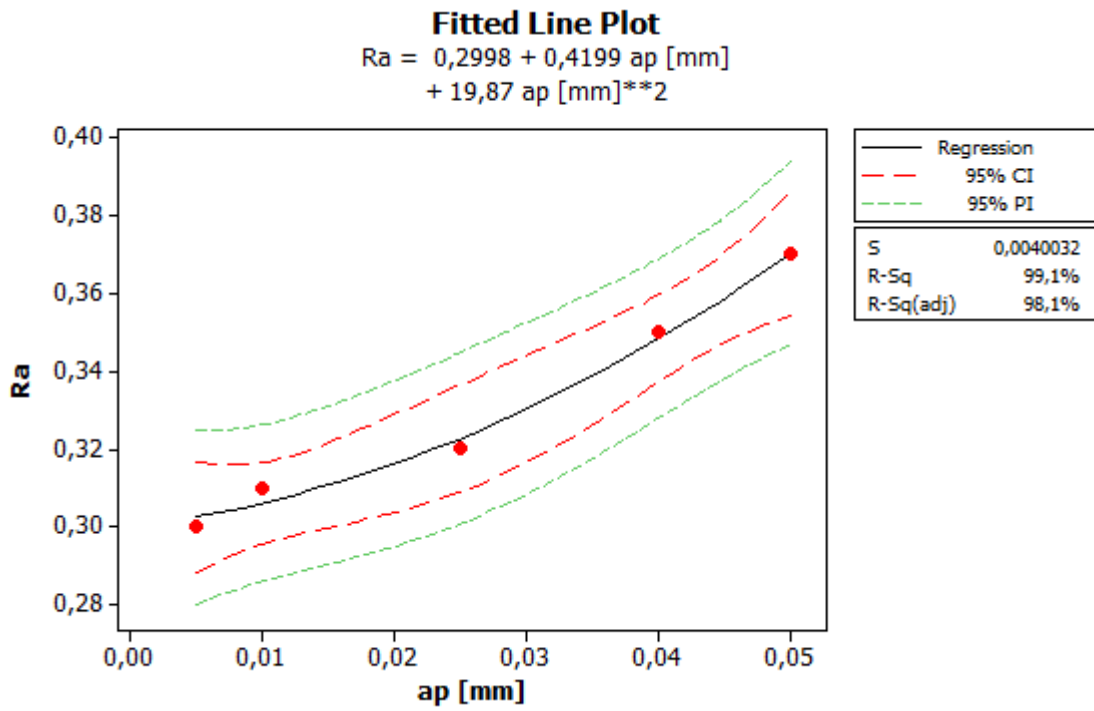
V tabulce (Tab. 7) lze vidět, že se měřená hodnota Ra se zvyšuje s rostoucí hloubkou řezu a zvyšující se posuvovou rychlostí.

10 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

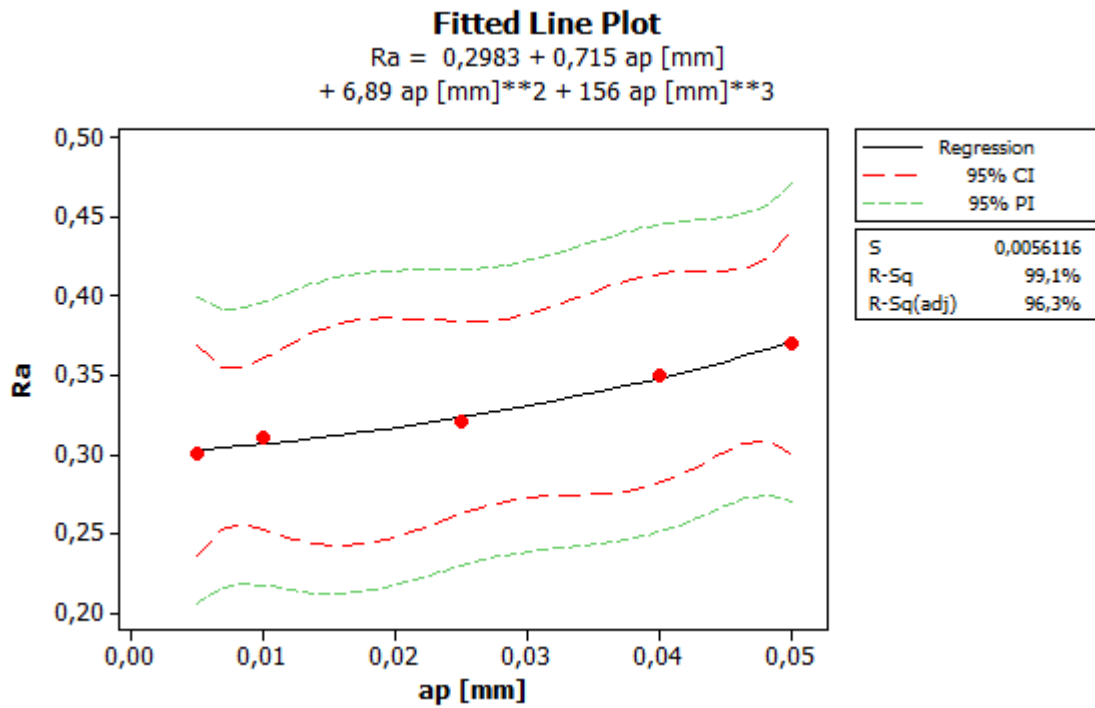
Pro zjištění průběhu naměřených hodnot Ra a parametrů hloubky řezu a_p byla použita regresní analýza. Volba regresní funkce, tedy matematického modelu nejlépe popisujícího danou závislost je závislá na rozboru analýzy vztahů mezi veličinami. Na základě zpracovaných dat byly tedy závislosti jednotlivých proměnných proloženy matematickými křivkami. K tomu se využilo programu *Minitab 16*, pomocí kterého byly vytvořeny tři typy regrese. V prvním případě se jednalo o přímku, reprezentující lineární regresi (Obr. 30), dalším byla parabola, která je grafem parabolické regrese (Obr. 31) a posledním typem je regrese polynomická (Obr. 32). V této práci jsou uvedeny pouze grafy pro rychlost posuvu $v_f = 7 \text{ m.min}^{-1}$, ostatní jsou umístěny v příloze.



Obr. 30 Lineární regrese



Obr. 31 Parabolická regrese



Obr. 32 Polynomická regrese

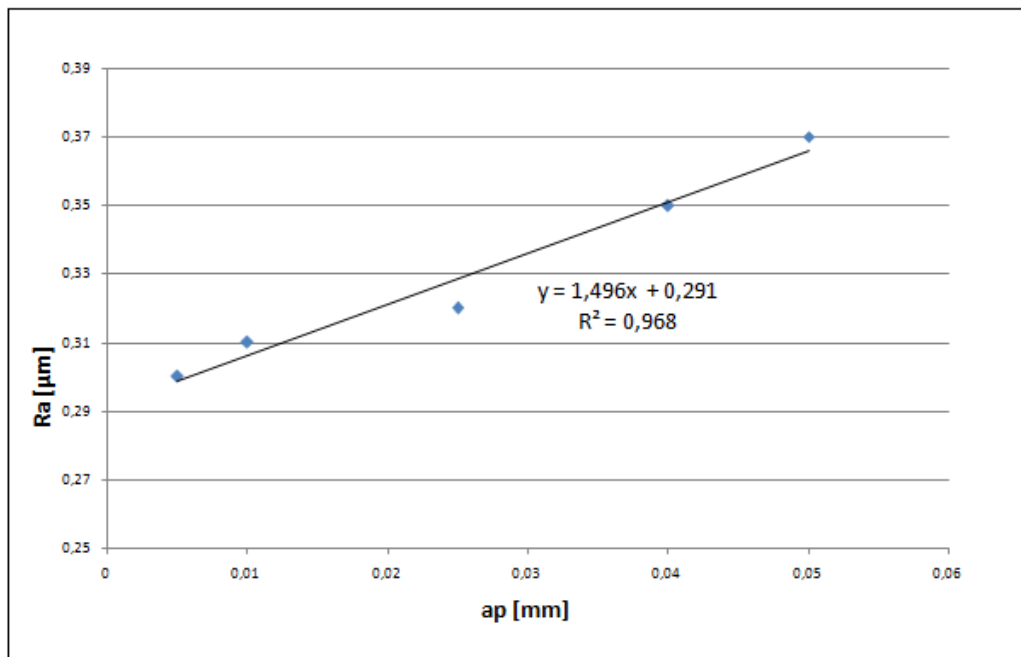
U jednotlivých průběhů byl porovnáván tzv. index determinace R^2 (determinační koeficient). Jeho hodnota se pohybuje v mezích od 0 do 1 (od 0 do 100%). Výše indexu určuje, jakou část variability závislé proměnné hodnoty Ra lze vysvětlit vlivem nezávisle proměnného parametru a_p . Čím vyšší je tato hodnota, tím daná křivka lépe vysvětluje skutečnou závislost mezi proměnnými.

Tvar a šíře ohraničujících konfidenčních intervalů spolehlivosti (Obr. 30, 31, 32) je dalším faktorem, na kterém závisí volba regresní funkce. Určují, že naměřené hodnoty se s 95% pravděpodobností budou vyskytovat v daných mezích. Čím je šířka daného intervalu větší, tím větší je variabilita polohy dané přímky, paraboly, křivky. Daným regresním modelem je pak závislost jednotlivých proměnných popsána méně přesněji.

Jednotlivé regresní modely byly tedy porovnány na základě těchto faktorů a jako nejvhodnější závislost byla vyhodnocena závislost lineární (Obr. 30). Byl nalezen lineární regresní model, tedy určena matematická rovnice nejlépe hodnotící závislost naměřených hodnot Ra na technologických podmínkách. Jedná se o lineární regresní model s lineárními koeficienty.

10.1 Systém pro predikci parametru jakosti povrchu - Ra

Veškeré zpracované hodnoty drsnosti povrchu Ra byly s využitím vytvořených regresních analýz zaneseny do systému, ve kterém lze velmi snadno získat hodnoty Ra po zadání zvolené hloubky řezu. Tato určení vycházejí z naměřených výsledků a jejich aplikací (s konfidenční úrovní 95%). Dle nalezeného matematického modelu a při daných technologických podmínkách, systém určí výslednou hodnotu Ra po zadání hloubky řezu a_p , aniž bychom musely daný povrch jakkoliv měřit (Obr. 34). Možnost určování je ale limitována oblastí, kde platí daná matematická závislost. Součástí systému jsou také intervaly spolehlivosti parametrů regresní funkce (Obr. 34) a graf závislosti parametru drsnosti povrchu Ra na hloubce řezu a_p (Obr.33). Na grafu lze vidět, jak s rostoucí hloubkou řezu a_p roste i parametr drsnosti povrchu Ra . Tento průběh platí pro oblast, která byla měřena. Systém je včetně všech podkladů, závislostí a souvisejících dat umístěn v přílohách práce.



Obr. 33 Graf závislosti drsnosti povrchu Ra na hloubce řezu pro posuv 7 m.min^{-1}

Intervaly spolehlivosti parametru regresní funkce

0,291	0,29	1,496	1,040
	0,31		1,630

Obr. 34 Intervaly spolehlivosti parametru regresní funkce

a_p [mm] (x)	0,005
Ra [µm] (y)	0,299

Lze zadat hodnotu hloubky řezu pro zjištění Ra pro daný kotouč a posuvovou rychlost.

Obr. 35 Systém pro predikci parametru Ra

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo vytvoření systému sloužícího pro predikci hodnot parametrů jakosti povrchu vycházejícího z regresní analýzy. Nejdříve byly vybroušeny vzorky z materiálu, kterým byla ocel s označením *14109.4 (102Cr + QW)*. Broušení probíhalo na brusce *BHV 20.03F*. Jde o brusku s horizontálním vřetenem a pravoúhlým pracovním stolem. Byly zvoleny posuvové rychlosti *7, 10, 14, 21, 23 m.min⁻¹* a hloubky řezu *0,005; 0,1; 0,025; 0,04; 0,05 mm*. Broušení bylo prováděno kotoučem s označením *EN12413 250x20x76 A99 80 I 8 V 40m.s⁻¹*. Šlo o jemnozrnný kotouč s otevřenou strukturou a keramickým pojivem. Kotouč byl před broušením staticky vyvážen na dílenském vyvažovacím stojánku. Tím byly vzorky připraveny k měření daného parametru drsnosti povrchu.

Měření parametru drsnosti povrchu *Ra* bylo prováděno desetkrát pro danou hloubku řezu a posuvovou rychlost broušení. Tato hodnota byla měřena ve směru kolmém na řezný pohyb. Měření tohoto parametru bylo realizováno s využitím přístroje *MITUTOYO SJ – 301*. Přístroj byl před měřením kalibrován měřením hodnoty *Ra* na destičce se známou velikostí tohoto parametru.

Naměřená data byla zaznamenána do tabulky spolu s výpočtem aritmetického průměru, nejistoty typu A a dalších statistických charakteristik. Pro zjištění průběhu naměřených hodnot *Ra* a parametrů hloubky řezu *a_p* byla použita regresní analýza. Na základě zpracovaných dat byly závislosti jednotlivých proměnných proloženy matematickými křivkami. S využitím programu *Minitab-16* byly vytvořeny 3 regresní modely, které se na základě určitých faktorů mezi sebou porovnávaly. Jako nejvhodnější závislost byla vyhodnocena závislost lineární.

Veškeré zpracované hodnoty drsnosti povrchu *Ra* byly s využitím vytvořených regresních analýz zaneseny do systému. Dle nalezeného matematického modelu a při daných technologických podmínkách, systém určí výslednou hodnotu *Ra* po zadání hloubky řezu *a_p*, aniž bychom musely daný povrch jakkoliv měřit. Výstupem systému jsou také intervaly spolehlivosti a grafická závislost parametru drsnosti povrchu *Ra* na hloubce řezu *a_p*, která lineárně roste.

Systém je úspěšně realizován i pro hodnoty řezných sil při broušení a lze jej využívat i pro jiné technologie obrábění. Vždy je však vázán úpravou prvků regresní analýzy.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] CYHELSKÝ, L., SOUČEK, E. *Základy statistiky*. Praha: 2009. ISBN 978-80-7408-013-5.
- [2] ČSN EN ISO 4287:1999/A1 (014450). *Geometrické požadavky na výrobky (GPS)-Struktura povrchu: Profilová metoda-Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 2010. 24 p.
- [3] DOBROVOLNÝ, B. *Broušení kovů*. Praha: SNTL, 1962.
- [4] GAŠPÁREK, J. *Dokončovacie zposoby obrábania*. 1979: ALFA Bratislava.
- [5] HINDLS, R., HRONOVÁ, S., SEGER, J. *Statistika pro ekonomy*. 5.th ed. Praha: Professional Publishing, 2004. 417 p. ISBN 80-86419-59-2.
- [6] HINDLS, R., KAŇOKOVÁ, J., NOVÁK, I. *Metody statické analýzy*. Praha: 1997. ISBN 80-85943-44-1.
- [7] HLUCHÝ, M., KOLOUCH, J. *Strojírenská technologie 1 - Nauka o materiálu - 1. díl*. Praha: Scinetia, 2007. ISBN 978-80-86960-26-5.
- [8] MASLOV, J., KLUŇA, J. *Teorie broušení kovů*. 1.st ed. Praha: SNTL, 1979. 246p.
- [9] ŘASA, J., GABRIEL, V. *Strojírenská technologie 3- Metody, stroje a nástroje pro obrábění - 1. díl*. Praha: Scientia, 2005. ISBN 80-7183-337-1..
- [10] ŘEZNÁKOVÁ, H., LÖSTER, T. *Základy statistiky*. Praha: 2013. ISBN 978-80-245-1957-9.
- [11] *Tumlikovo.cz: Metal Cutting Technologies* [online]. 2010 [cit. 2014-19-1]. Drsnost obrobeného povrchu. Dostupné z WWW:
<<http://www.tumlikovo.cz/drsnost-obrobeneho-povrchu/>>.
- [12] VASILKO, K., BOKUČAVA, G. *Brúsenie kovových materiálov*. 1988: ALFA Bratislava.
- [13] *Zeiss.cz: Carl Zeiss spol. s.r.o.* [online]. [cit. 2014-19-1]. Parametry (drsnosti) povrchu. Dostupné z WWW:

<[http://www.zeiss.cz/C12571AF002D4699/EmbedTitelIntern/Prospekt_Drsnost/\\$File/drsnost.pdf](http://www.zeiss.cz/C12571AF002D4699/EmbedTitelIntern/Prospekt_Drsnost/$File/drsnost.pdf)>.

- [114] OVSÍK, M. *Výzkum vlivu jakosti formy na jakost povrchu výrobku: diplomová práce*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2010. 112, 16 p.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

y	Výstupní (závisle) proměnná [-]
x	Vstupní (nezávisle) proměnná [-]
b_0	Výběrové regresní koeficienty [-]
b_1, b_2	Výběrové regresní koeficienty [-]
a_0, a_1	Výběrové regresní koeficienty [-]
x_i	Hodnota nezávisle proměnné [-]
y_i	Skutečná (empirická) hodnota závisle proměnné [-]
Y_i	Teoretická (vypočtená) hodnota závisle proměnné [-]
s_{xy}	Kovariance [-]
s_x^2	Rozptyl nezávisle proměnné [-]
R^2	Index determinace [-]
γ_0	Úhel čela [°]
α_0	Úhel hřbetu [°]
r_n	Poloměr ostří [μm]
v_k	Řezná rychlost [m/s]
D	Průměr brusného kotouče [mm]
n	Otáčky brusného kotouče [min^{-1}]
v_{ob}	Obvodová rychlost obrobku [m/min]
v_s	Podélný posuv [mm/min]
$h(v_p)$	Přísuv [mm/min]
H	Šířka brousícího kotouče [mm]
L	Délka broušené plochy [mm]
n_k	Otáčky brousícího kotouče [min^{-1}]
n_o	Otáčky obrobku [min^{-1}]

Ra	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu [μm]
Rc	Průměrná výška profilu [μm]
Rp	Největší výška výstupku profilu [μm]
Rq	Průměrná kvadratická úchylka [μm]
RSm	Průměrná šířka profilu [μm]
Xs	Aritmetický průměr šířek prvků profilu v rozsahu základní délky [μm]
Rt	Celková výška profilu [μm]
Rv	Největší hloubka prohlubně profilu [μm]
Rz	Největší výška profilu [μm]
R _{max}	Maximální hloubka drsnosti [μm]
Z	Výška největšího výstupku profilu [μm]
Zp	Výška nejvyššího výstupku profilu v rozsahu základní délky [μm]
Zt	Výška prvků profilu v rozsahu základní délky [μm]
Zv	Hloubka nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky [μm]
a _p	Hloubka řezu [mm]
v _f	Posuvová rychlost [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Graf lineární regresní funkce	15
Obr. 2. Grafické znázornění principu metody nejmenších čtverců [5]	16
Obr. 3. Graf kvadratické regresní funkce [5]	17
Obr. 4. Graf hyperbolické regresní funkce [5]	18
Obr. 5. Graf exponenciální regresní funkce [5]	19
Obr. 6. Tvar zrna brousícího kotouče [9]	21
Obr. 7. Struktura kotouče	22
Obr. 8. Příklad označení brousícího kotouče [9]	24
Obr. 9. Některé tvary brousících kotoučů [9]	24
Obr. 10. Schéma broušení vnějších válcových ploch posuvem podél osy obrobku [8]	25
Obr. 11. Vnější broušení do kulata [9]	26
Obr. 12. Vnitřní broušení do kulata [9]	27
Obr. 13. Rovinné broušení [9]	28
Obr. 14. Hrotové brusky [9]	29
Obr. 15. Broušení kuželových ploch [9]	30
Obr. 16. Bruska na díry [9]	30
Obr. 17. Rovinné brusky [9]	31
Obr. 18. Profil povrchu jako průsečnice skutečného povrchu a dané roviny [2]	33
Obr. 19. Prvek profilu [2]	33
Obr. 20. Největší hloubka prohlubní profilu [2]	34
Obr. 21. Hloubka drsnosti [13]	35
Obr. 22. Výška prvků profilu [2]	35
Obr. 23. Střední hodnoty R_a , R_q [13]	36
Obr. 24. Šířka prvků profilu [2]	36
Obr. 25. Model vzorku	40
Obr. 26. Rovinná horizontální bruska BRH 20.03	42
Obr. 27. Brousící kotouč s upínací přírubou s vyvažovacími tělísky	44
Obr. 28. Dílenský stojánek pro statické vyvažování	44
Obr. 29. Přístroj <i>Mitutoyo SJ – 301</i>	45
Obr. 30. Lineární regrese	49
Obr. 31. Parabolická regrese	50

Obr. 32 Polynomická regrese.....	50
Obr. 33 Graf závislosti drsnosti povrchu Ra na hloubce řezu pro posuv 7 m.min^{-1}	52
Obr. 34 Intervaly spolehlivosti parametru regresní funkce.....	52
Obr. 35 Systém pro predikci parametru Ra	52

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Materiály brusiva [9]	22
Tab. 2. Přesnost a jakost ploch obrobených broušením [9]	32
Tab. 3. Chemické složení skupiny ocelí	40
Tab. 4. Charakteristika použitého brousícího kotouče.....	41
Tab. 5. Vybrané parametry použité brusky	42
Tab. 6. Podmínky broušení	43
Tab. 7. Průměrné hodnoty Ra	47

SEZNAM PŘÍLOH

- P I Naměřená data drsnosti povrchu parametru Ra a jejich statistické charakteristiky.
- P II Výpočet nejistot typu A pro jednotlivé hloubky řezu a posuvové rychlosti.
- P III Tabulka aritmetických průměrů naměřených hodnot s jejich nejistoty typu A.
- P IV Průběh naměřených hodnot Ra a parametrů hloubky řezu a_p s využitím regresní analýzy v programu *Minitab 16*.
- P V Systém pro predikci parametru drsnosti povrchu pro jednotlivé posuvové rychlosti.