Vliv řezných parametrů dokončovacích metod obrábění s orientací na superfinišování na jakost obráběných povrchů

Bc. Petr Zámečník

Diplomová práce
2016

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Bc. Petr Zámečník**
Osobní číslo:	**T14333**
Studijní program:	**N3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor:	**Výrobní inženýrství**
Forma studia:	**prezenční**

Téma práce: **Vliv řezných parametrů dokončovacích metod obrábění s orientací na superfinišování na jakost obráběných povrchů**

Zásady pro vypracování:

1. **Teoretická studie jakosti povrchu po finálním obrobení superfinišováním s orientací na kvantifikaci závislosti parametrů drsnosti na řezných parametrech se zaměřením na materiál ČSN 14 109.4, DIN 100Cr6 včetně provedení experimentů, formulaci statistických charakteristik výsledků a vyhodnocení získaných hodnot.**
2. **Parametry hodnocení drsnosti povrchu**
3. **teoretické závislosti parametrů drsnosti povrchu po aplikaci dokončovacích metodách obrábění**
4. **Přehled metod měření drsnosti povrchu**
5. **Aplikace regresní analýzy na závislosti drsnosti povrchu a řezných parametrů.**
6. **Metoda provedení experimentů**
7. **Zpracování získaných výsledků analyticky a graficky**
8. **Celkové zhodnocení výsledků a doporučení pro praxi.**

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. **AB SANDVIK COROMANT – SANDVIK CZ, s.r.o. Příručka obrábění. Přel. M. Kudela, 1. vydání Praha: Scietia, s.r.o., 1997. 857 s. 857. ISBN 91-97-22 99-4-**
2. **KOCMAN, K. Technologické procesy obrábění. 1.vyd.. Brno, CERM s.r.o., 2011, 330 s., ISBN 978- 80-7204-722-2**
3. **KOCMAN, K. a kol.: Aktuální příručka pro technologický úsek. Verlag Dashofer, 16. Aktualizované vydání, Praha 2001, ISBN 80-902247-2-5**
4. **ČSN EN ISO 4288 Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu:**
5. **Profilová metoda, Termíny, definice a parametry struktury povrchu. Český normalizační institut, 1999**

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Karel Kocman, DrSc.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **8. ledna 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2016**

Ve Zlíně dne 26. ledna 2016

UNIVERZITA TOMÁŠE BATI VE ZLÍNĚ Fakulta technologická L.S.

doc. Ing. František Buňka, Ph.D.
děkan

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

Příjmení a jméno: Zámečník Petr Obor: Výrobní inženýrství

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 6.4.2016 .....Zámečník.....

[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 nevýdělečně 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 vzdělávacího 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 přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Ve své diplomové práci se zaměřuji na závislost drsnosti povrchu Ra u válcové plochy na rychlosti rotace povrchu v_c a rychlosti kmitavého pohybu v_k. Diplomová práce je rozdělena do dvou částí. Teoretická část se zabývá zhodnocením současného stavu dokončovacích operací, normou ČSN EN ISO 4288, kinematikou superfinišování a přehledu metod měření drsnosti povrchu. Druhá část obsahuje řešení regresní analýzy a vyhodnocení drsnosti povrchu Ra na rychlosti rotace povrchu a rychlosti kmitavého pohybu.

Klíčová slova: Superfinišování, regresní analýza, drsnost povrchu

ABSTRACT

In my dissertation I focus on the dependence of surface roughness Ra of a cylindrical surface on the surface of the rotation speed vc and speed in to oscillatory motion. The thesis is divided into two parts. The theoretical part deals with the evaluation of the current state of finishing operations, CSN EN ISO 4288, kinematics and super- survey methods for measuring surface roughness. The second part contains the solution of the regression analysis and evaluation of the surface roughness Ra on the surface of the rotation speed and the speed of the oscillatory motion.

Keywords: Superfinishing, regression analysis, surface roughness

Mé poděkování patří prof. Ing. Karlovi Kocmanovi, DrSc. za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování diplomové práce věnoval.

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

OBSAH

OBSAH **8**
ÚVOD **11**
I. 12
TEORETICKÁ ČÁST **12**
1 OBECNÝ ÚVOD O SUPERFINIŠOVACÍCH A DOKONČOVACÍCH OPERACÍCH **13**
1.1 DOKONČOVACÍ METODY OBRÁBĚNÍ **13**
1.2 ABRAZIVNÍ METODY OBRÁBĚNÍ **13**
1.2.1 BROUŠENÍ 13
1.2.2 BROUSÍCÍ NÁSTROJE 15
1.2.2.1 Brousící kotouče a jejich značení 16
1.2.2.2 Brousící materiály 17
1.2.2.3 Standardní brousící materiály 17
1.2.2.4 Brousící materiály a jeho druhy 17
1.2.2.5 Tvrdosti brousících materiálů 18
1.2.2.6 Struktura brousících materiálů 19
1.2.2.7 Pojivo brousících kotoučů 19
1.2.3 ZÁKLADNÍ METODY BROUŠENÍ 20
1.2.4 VYBRANÉ METODY BROUŠENÍ 21
1.2.5 HLOUBKOVÉ BROUŠENÍ 23
1.2.6 RADIÁLNÍ BROUŠENÍ 24
1.2.7 BEZHROTÉ BROUŠENÍ 25
1.2.8 PRŮBĚŽNÉ BEZHROTÉ BROUŠENÍ 25
1.2.9 BROUŠENÍ BEZHROTÉ ZÁPICHOVÉ 26
1.2.10 BROUŠENÍ VNITŘNÍCH PLOCH DO KULATA 27
1.2.10.1 Axiální broušení 27
1.2.10.2 Broušení bezhroté 29
1.2.10.3 Bezhroté broušení v tuhých opěrkách 30
1.2.10.4 Broušení planetové 30
1.2.11 Broušení rovinné 31
1.2.12 Obvodové broušení 31
1.2.13 BROUŠENÍ ČELNÍ 32
1.2.14 BROUŠENÍ TVAROVÉ 33
1.3 DOKONČOVACÍ METODY OBRÁBĚNÍ **34**
1.3.1 HONOVÁNÍ 34
1.3.1.1 Technologická charakteristika honování 34
1.3.2 LAPOVÁNÍ 37
1.3.2.1 CHARAKTERISTIKA LAPOVÁNÍ 37
1.3.2.2 Lapovací nástroje 38
1.3.3 SUPERFINIŠOVÁNÍ 38
1.3.3.1 Superfinišovací nástroje 39

1.4 BEZTŘÍSKOVÉ METODY DOKONČOVÁNÍ OBROBENÝCH POVRCHŮ 40
1.4.1 VÁLEČKOVÁNÍ 40
1.4.2 KULIČKOVÁNÍ 42
1.4.2.1 Dynamické kuličkování 42
1.4.2.2 Vibrační kuličkování 43
2 PARAMETRY HODNOCENÍ DRSNOSTI POVRCHU 44
2.1 JAKOST POVRCHU 44
2.2 ZÁKLADNÍ ČSN EN ISO NORMY POPISUJÍCÍ STRUKTURU POVRCHU 45
2.3 ZÁKLADNÍ POJMY A DEFINICE 45
2.3.1 MIKRONEROVNOST 45
2.3.2 MAKRONEROVNOST 46
2.3.3 TVAR 46
2.3.4 VLNITOST POVRCHU 46
2.3.5 DRSNOST POVRCHU 46
2.4 DEFINICE PARAMETRŮ NEROVNOSTÍ PROFILU 47
2.4.1 PARAMETRY VÝŠKOVÉ (PROHLUBNĚ A VÝSTUPKY) 47
2.4.1.1 Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu Ra (μm) 47
2.4.1.2 Nejvyšší výška výstupku profilu, P_p, R_p, W_p: 47
2.4.1.3 Největší hloubka prohlubně profilu P_v, R_v, W_v: 48
2.4.1.4 Největší výška profilu P_z, R_z, W_z: 49
2.4.2 DÉLKOVÉ PARAMETRY 49
2.4.2.1 Průměrná šířka prvků profilu Rsm 49
3 TEORETICKÉ ZÁVISLOSTI PARAMETRŮ DRSNOSTI POVRCHU PO APLIKACI DOKONČOVACÍCH METOD OBRÁBĚNÍ 51
3.1 KINEMATIKA SUPERFINIŠOVÁNÍ 51
3.2 VÝSLEDKY DOSAHOVANÉ PŘI APLIKACI SUPERFINIŠOVÁNÍ 52
4 PŘEHLED METOD MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU 54
4.1 SNÍMÁNÍ JAKOSTI POVRCHU KONTAKTNÍM ZPŮSOBEM 55
4.2 SNÍMÁNÍ JAKOSTI POVRCHU BEZKONTAKTNÍM ZPŮSOBEM 57
2. 61
PRAKTICKÁ ČÁST 61
5 APLIKACE REGRESNÍ ANALÝZY NA ZÁVISLOSTI DRSNOSTI POVRCHU A ŘEZNÝCH PARAMETRŮ 62
5.1 ZADÁNÍ: 62
5.2 ŘEŠENÍ REGRESNÍ ANALÝZY 62
6 METODA PROVEDENÍ EXPERIMENTU 65
6.1 PŘESNOST STROJNÍHO OBRÁBĚNÍ 65
6.2 NORMÁLNÍ ROZDĚLENÍ 66
6.3 NORMOVANÉ NORMÁLNÍ ROZDĚLENÍ 67
6.4 VÝZNAM PARAMETRŮ $\bar{X}$ A S 67
6.5 CHARAKTERISTIKY STATISTICKÉHO SOUBORU 72
7 ZPRACOVÁNÍ ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ ANALYTICKY A GRAFICKY .. 78

7.1 NAMĚŘENÉ HODNOTY RA NA RYCHLOSTI ROTACE POVRCHU (VW) A RYCHLOSTI KMITAVÉHO POHYBU (VK) PRO MATERIÁL Č.1. 78
7.1.1 VÝPOČET JEDNOTLIVÝCH KOŘENŮ PRO DANOU ZÁVISLOST 79
7.1.2 VÝPOČET STATISTIKY 82
7.1.3 GRAFICKÉ ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ 84
7.2 NAMĚŘENÉ HODNOTY RA NA RYCHLOSTI ROTACE POVRCHU (VW) A RYCHLOSTI KMITAVÉHO POHYBU (VK) PRO MATERIÁL Č.2. 87
7.2.1 VÝPOČET JEDNOTLIVÝCH KOŘENŮ PRO DANOU ZÁVISLOST 89
7.2.2 VÝPOČET STATISTIKY 91
7.2.3 GRAFICKÉ ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ 93
7.3 NAMĚŘENÉ HODNOTY RA NA RYCHLOSTI ROTACE POVRCHU (VW) A RYCHLOSTI KMITAVÉHO POHYBU (VK) PRO MATERIÁL Č.3. 96
7.3.1 VÝPOČET JEDNOTLIVÝCH KOŘENŮ PRO DANOU ZÁVISLOST 97
7.3.2 VÝPOČET STATISTIKY 100
7.3.3 GRAFICKÉ ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ 102
8 CELKOVÉ ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ, JEJÍ DISKUZE A DOPORUČENÍ PRO PRAXI.....106
ZÁVĚR.....108
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....109
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....112
SEZNAM OBRÁZKŮ 115
SEZNAM TABULEK.....118
SEZNAM PŘÍLOH.....120

ÚVOD

Broušení a superfinišování se s velkým úspěchem používá k opracování a obrábění kovových materiálů. V jeho dlouhé historii se můžeme setkat s broušením. kdy bylo použito materiálů z přírodních prvků, které v dané době bylo možno sehnat k opracování nástrojů, šperků, zbraní a jiných aplikací.

Broušení a jeho vývoj prošel různými etapami, ale největšího využití se dočkal na počátku 19. století, kdy se začala uplatňovat v praxi sériová, hromadná a velmi přesná výroba součástí.

Slovem broušení a superfinišování si můžeme představit dokončovací operaci, jejíž předností je hlavně velmi vysoká přesnost povrchu, ale také velmi vysoká přesnost geometrie a patří k významným technologiím. Při broušení se za nástroj považuje brousící kotouč a u superfinišování se jako nástroj používá superfinišovací kámen. Význačným parametrem pro brousící kotouč jsou nerovnoměrně rozmístěné zrna po obvodu brousícího kotouče. Zrna nabývají různých velikostí, tvarů a jsou spojena pojivem. Pojiva mohou být buď přírodní, tak i umělá. Brousící kotouče mají různé tvary a různé velikosti.

Broušení a superfinišování může nacházet velmi široké uplatnění hlavně ve strojírenství, ale také v běžném životě. S mnoha věcmi se můžeme setkat např. v domácnosti, které byly vyrobeny právě touto metodou, ať je to např. kuchyňský nůž, nebo noha stolu. Široké uplatnění a aplikaci broušení a superfinišování můžeme najít zejména ve strojních součástkách a to např. ložiska, lamely, vřetena a jiných důležitých součástí.

Od superfinišování a broušení je očekáváno výrazné zlepšení kvality ploch obráběné součásti. Při použití výše zmíněného způsobu obrábění, které řadíme svou přesností a jakostí do skupiny dokončovací operace, dochází ke vzniku velmi vysokých teplot. Proto k brousícím procesům zařazena také chladící kapalina, která má za úkol tyto tepelné rázy eliminovat.

Cílem mé diplomové práce bylo vypočítat střední hodnotu Ra, pomocí regresní analýzy kvantifikovat závislost drsnosti povrchu Ra na rychlosti rotace povrchu a rychlosti kmitavého pohybu, dále je také potřeba vypočítat směrodatnou odchylku, s pravděpodobností 95% vypočítat pro každý soubor maximální a minimální hodnotu $R_{a\ max}$ a $R_{a\ min}$ a pravděpodobnost, že drsnost povrchu bude u jednotlivých časů v rozmezí zadaných hodnot.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 OBECNÝ ÚVOD O SUPERFINIŠOVACÍCH A DOKONČOVACÍCH OPERACÍCH

Operace, které se nazývají dokončovacími nachází v technické praxi široké uplatnění. Hlavní výhodou je vysoká rozměrová přesnost a vysoká jakost výroby a také finančně dostupná technologie. [1]

1.1 Dokončovací metody obrábění

Mezi nejdůležitější a nejpoužívanější dokončovací metody obrábění jsou:

- Broušení
- Honování
- Lapování
- Superfinišování
- Válečkování
- Kuličkování
- Ultrazvukové broušení

1.2 Abrazivní metody obrábění

Mezi abrazivní metody obrábění v technické praxi jsou zahrnuty nástroje s tzv. nedefinovanou geometrii břitu. V dnešní době jsou považovány za nejpoužívanější a nejdůležitější obráběcí procesy strojírenských součástí, u kterých je požadována vysoká kvalita a přesnost obrobených ploch. Mezi tyto metody zahrnujeme například: Broušení, lapování, honování, superfinišování. [1]

1.2.1 Broušení

Operace, která nese název broušení se vyznačuje:

- Vysokou přesností obrobené plochy
- Vysokou kvalitou a jakostí obrobené plochy
- Patří mezi nejrozšířenější a nejvýznamnější technologií obrábění.

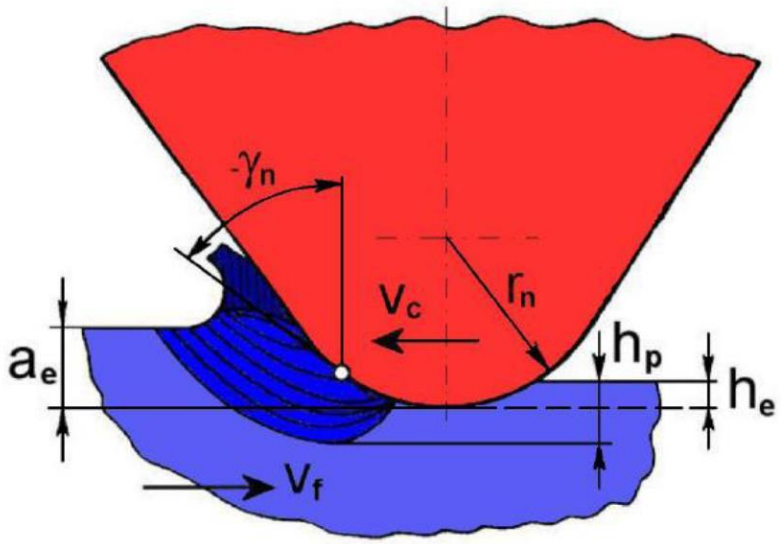
Broušením jsme schopni dosáhnout vyšší a přesnější jak rozměrovou tak i tvarovou kvalitu obráběné součásti. Svou přesností je zařazena mezi vysoce přesné dokončovací operace. Jako nástroj je brousící kotouč, jenž je specifický svým nepravidelným uspořádáním brousících zrn po

celém povrchu nástroje. Brousící kotouč nám umožní z obráběného povrchu součásti odebrat vysoké množství třísek malých rozměrů. [1]

Od jiných metod třískového obrábění se broušení liší tím, že brousící nástroj nemá pevně definovanou geometrii břitu. Mezi jiné specifické vlastnosti broušení od ostatních metod třískového obrábění je velikost odřezané třísky, která je velmi malá s porovnáním od jiných metod třískového obrábění, jako je například soustružení nebo frézování. Nejčastěji se pohybuje v rozmezí od 0,0005 až 0,001 mm². Broušením dochází ke vzniku vysokého množství tepla to je přisuzováno vysoké řezné rychlosti. Toto teplo může být důsledkem reziduálního napětí (500 až 2000 MPa) tím se může negativně odrazit na životnosti povrchů namáhaných cyklicky a dynamicky. [1]

V povrchové vrstvě broušené součásti dochází k deformaci elastické a plastické. V důsledku vysokých změn objemových v určitých vrstvách dochází k tlakovým a tahovým reziduálním napětím. Za pozitivní napětí je považováno napětí tlakové, při němž dochází ke zvýšení pevnosti únavové a zvýší odolnost povrchu proti mechanickým vlivům vnějším. Na druhou stranu napětí tahové, napětí tahové snižuje únavovou pevnost při, které může docházet k porušení dynamicky namáhaných povrchů. Např. oběžné dráhy valivých ložisek. [1]

Víceletý výzkum nových technologií v oblasti přesných a dokončovacích metod obrábění přesných ploch přinesl vývoj inovativních brousících materiálů, která nám v technické praxi umožní zvýšení výkonů a také značné snížení teploty při kontaktu obráběného povrchu s brousícím nástrojem. Výsledkem je získání vyšší kvality a přesnosti broušeného povrchu. Vývoj inovativních brousících materiálů jsou materiály založeny na bázi vysokoporézních brousících materiálů, sintrovaných korundů. To je uměle zhotovený typ mikrokrystalického korundu, který se zhotovuje na malou velikost jeho krystalů a má shodné řezné vlastnosti. Průměrně až 50 krát menší s porovnáním s ušlechtilým korundem. [1]



Obr. 1. Popis úběru brousícího elementu: [2]

γn-normálný úhel čela, r_n-poloměr zaoblení ostří, a_e-pracovní (radiální) záběr,h_p-vrstva ovlivněná plastickou deformací, h_e-vrstva ovlivněna pružnou deformací, v_c-řezná rychlost, v_f posuvová rychlost

Tabulka dosahovaných parametrů:

Tab. 1. Dosahované parametry při broušení [4]

Obráběné plochy	Metoda obrábění		Přesnost rozměrů IT		Drsnost povrchu Ra [μm]	
			střední	rozsah	střední	rozsah
Vnější rotační	Broušení	hrubovací	10	9 ÷ 11	2,4	0,80 ÷ 3,20
		dokončovací	5	5 ÷ 6	0,4	0,20 ÷ 0,60
		jemné	4	3 ÷ 5	0,2	0,05 ÷ 0,40
Vnitřní rotační		hrubovací	10	9 ÷ 11	2,4	1,60 ÷ 3,20
		dokončovací	6	5 ÷ 7	0,8	0,40 ÷ 1,60
		jemné	5	3 ÷ 6	0,2	0,05 ÷ 0,40
Rovinné		hrubovací	10	9 ÷ 11	2,4	1,60 ÷ 3,20
		dokončovací	6	5 ÷ 7	0,8	0,40 ÷ 1,60
		jemné	5	3 ÷ 6	0,2	0,05 ÷ 0,40

Brousící kotouč se vyznačuje od jiných obráběcích nástrojů schopností samoostření. Brousící zrno je k brousícímu kotouči ukotveno. To má za následek vysokých řezných sil, že se brousící zrno odlomí a jejích brousící funkci přebírá zrna neobroušená. [1]

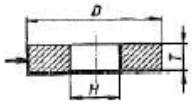
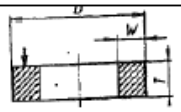
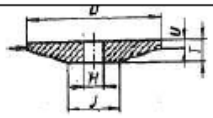
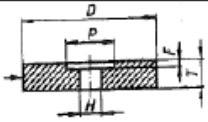
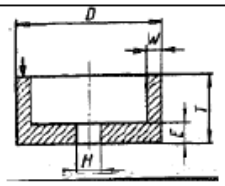
1.2.2 Brousící nástroje

Brousící nástroj je tvořen jemnými zrny brusiva, které je na něm pevně vázáno do různých tvarů a tuhostí kotouče. Dle tuhosti se brousící kotouče dělí brousící, řezací a drážkovací. [6]

1.2.2.1 Brousící kotouče a jejich značení

Brousící kotouče jsou značeny normou dle ČSN ISO 0525 (22 4503). Značení brousících kotoučů odpovídá tvaru, rozměru, specifikaci jeho složení a maximální obvodové rychlosti.
Příklad značení pro ty kotouče: 1-320x60x80-A36L5V-40m.s^{-1} [6]

- 1- Plochý brousící kotouč
- Vnější průměr 320 mm
- Tloušťka brousícího kotouče 60 mm
- Průměr díry 80 mm
- A- Brousící materiál umělý korund
- 36- Velikost zrna
- L- Tvrdost
- 5- Struktura
- V- Keramické pojivo
- 40m.s^{-1}- Maximální obvodová rychlost

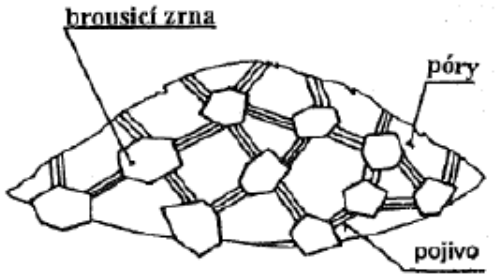
Typ	Vyobrazení	Označení - charakteristika
1		Kotouče ploché Typ 1 – profil – D x T x H
2		Kotouče prstencové Typ 2 – D x T x W
3		Kotouče jednostranně zkosené Typ 3 – D/J D x T /U… x
4		Kotouče s jednostranným vybráním Typ 5 – D x T x H – P…, F
5		Kotouče hrncovité Typ 6 – D x T x H – W…, E

Obr. 2. Přehled označování tvarů a rozměrů brousících kotoučů [6]

1.2.2.2 Brousící materiály

Brousící materiál je tvořen zrny v různých formách a to:

- Zrn volných (lapovací, brousící a leštící prášky)
- Nanesený na pružném podkladu (brousící a leštící papíry nebo plátna)
- Volně rozptýlený v mazadlech a tekutinách (leštící a brousící pasty)
- Zrn spojených pojivy v tuhý tělesa požadovaného a potřebného tvaru



Obr. 3. Znázornění stavby brousícího kotouče – řezné a spojovací části [1]

1.2.2.3 Standardní brousící materiály

Mezi nejpoužívanější brousící materiály v technické praxi patří umělý korund (AL_2O_3) a karbid křemíku (SiC). Vlastnosti brousících kotoučů volíme podle vlastností obráběného materiálu.

Tab. 2. Označení jakosti BK [9]

A99	60K	9	V	00/	50
Druh brousícího materiálu	Zrnitost, tvrdost	Struktura	Druh pojiva	Doplňující technologický znak	Maximální obvodová rychlost

1.2.2.4 Brousící materiály a jeho druhy

Volba vhodného brusiva a jeho použití pro vybraný materiál:

- Umělý korund- Vhodný pro ocel, temperované litiny a tvrdé bronzy
- Karbid křemíku- Pro obrábění šedé litiny, mosazi, mědi, slinutých karbidů, keramiky

[1]

Tab. 3. Druhy brousících materiálů [9]

Druh	Název	Využití
A99B	Elektrokorund bílý	broušení rychlořezných, kalených a nerezavějících ocelí
A99	Elektrokorund bílý – barvený červeně	broušení nástrojových, RO, kalených a nerezavějících ocelí
A99 M	Elektrokorund bílý – barvený modře	broušení nástrojových, rychlořezných, kalených a nerezavějících ocelí
A98	Elektrokorund růžový	broušení vysoce legovaných ocelí, velké pevnosti před kalením
A96	Elektrokorund hnědý	broušení nízce legovaných ocelí, kovových materiálů střední a vysoké pevnosti, hrubovací práce
C48	Karbid křemíku černý	broušení šedé litiny, temperované litiny, mosazi, hliníku, organických, minerálních a keramických materiálů
C49	Karbid křemíku zelený	broušení slinutých karbidů, keramických hmot a skla
90M A	Monokrystalický korund	broušení titanové slitiny 58 ÷ 64 HRC
97A	Polokřehký korund	broušení nízce legovaných ocelí, kovových materiálů střední a vysoké pevnosti, hrubovací práce
80A	Zirkonový korund	broušení odlitků, hrubovací práce
CBN	Kubický nitrid bóru	broušení kalených nástrojových a rychlořezných ocelí, má vysokou tvrdost a tepelnou odolnost
AG92	Mikrokrystalický korund	též označován SG korund, broušení těžko obrobitelných materiálů s tvrdostí nad 60 HRC
K	Slinutý korund	dokončovací operace, obtahování ostří, honování, superfinišování

1.2.2.5 Tvrdosti brousících materiálů

Tvrdost definuje jak je hmota brousících nástrojů soudržná a volí se v závislosti na způsobu broušení. Čím tvrdší broušený materiál a větší styčná plocha brousícího kotouče s broušenou plochou, tím se volí měkčí brousící kotouč.

Tab. 4. Tvrdost BK

Tvrdost	Značení			
Velmi měkká	G	H		
Měkká	I	J	K	
Střední	L	M	N	O
Tvrdá	P	Q	R	S
Velmi tvrdá	T	U	V	W

[1]

1.2.2.6 Struktura brousících materiálů

Vyjadřuje vzdálenosti mezi jednotlivými brousícími zrny. Se zvyšujícím se číslem označení se zvyšuje pórovitost brousícího kotouče. Pro broušení houževnatých materiálů se doporučují kotouče s vysokou pórovitostí. Kotouče hutné nacházejí uplatnění pro broušení tvrdých a křehkých materiálů. [9]

Tab. 5. Struktura BK [9]

Struktura	Značení (rozmezí)	
Velmi hutná	1	2
Hutná	3	4
Střední	5	6
Otevřená	7	8
Velmi otevřená	9	10
Zvlášť pórovitá	11	18
Vysokopórézní	10VS	18VS

1.2.2.7 Pojivo brousících kotoučů

Vlastnosti pojiva ovlivňuje takzvané samoostření brousícího nástroje

- Magnezitové pojivo- Pro křehké kotouče a jemný výbrus
- Pojivo z umělé pryskyřice- Pro odolnější kotouče pro hrubování, broušení vnitřních a vnějších ploch, ploch rovinných, řezání kovů, keramiky a kamene
- Pryžové pojivo- Pro elastické nástroje, čištění, leštění a jemné broušení
- Polyuretanové pojivo- Pro jemné broušení a leštění
- Šelakové pojivo- Pro leštění kamenů

Tab. 6. Druhy pojiva a jeho značení [9]

Druh pojiva	Značení
Keramické	V
Umělá pryskyřice	B
Magnezitové	Mg
Pryžové	R

1.2.3 Základní metody broušení

Všechny metody broušení jsou odvozovány a řazeny do příslušných skupin podle posuvu stolu k poloze brusného kotouče. [1]

Ty definujeme jako:

- **Broušení axiální**

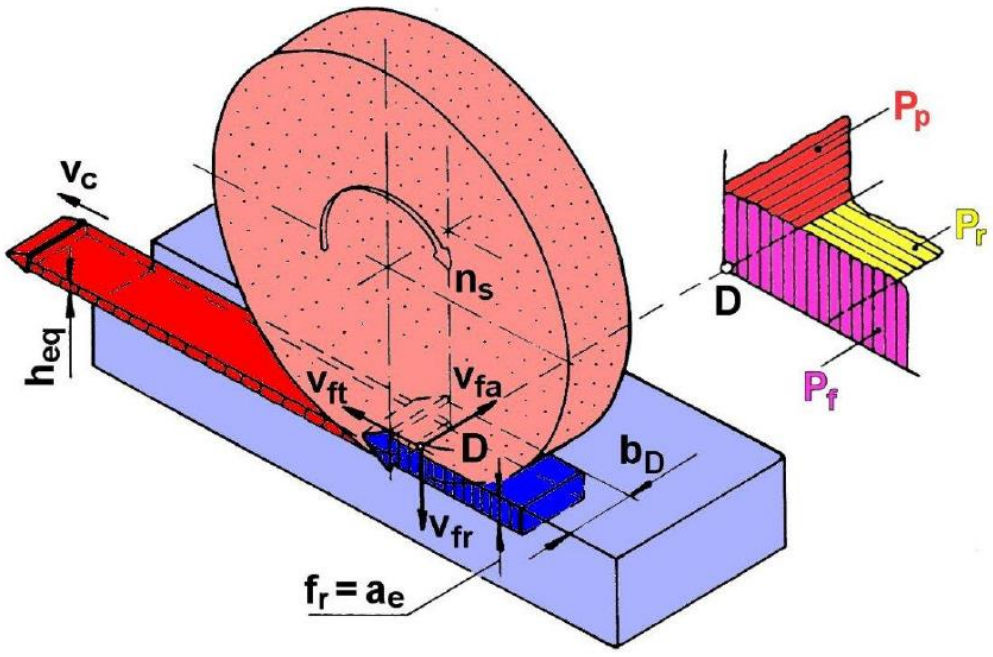
  Brousící kotouč je usazen rovnoběžně s osou hlavního posuvu stolu.
- **Broušení tangenciální**

  Posuv stolu (hlavní) je rovnoběžný s vektorem obvodové rychlosti ve zvoleném bodě D.
- **Broušení radiální**

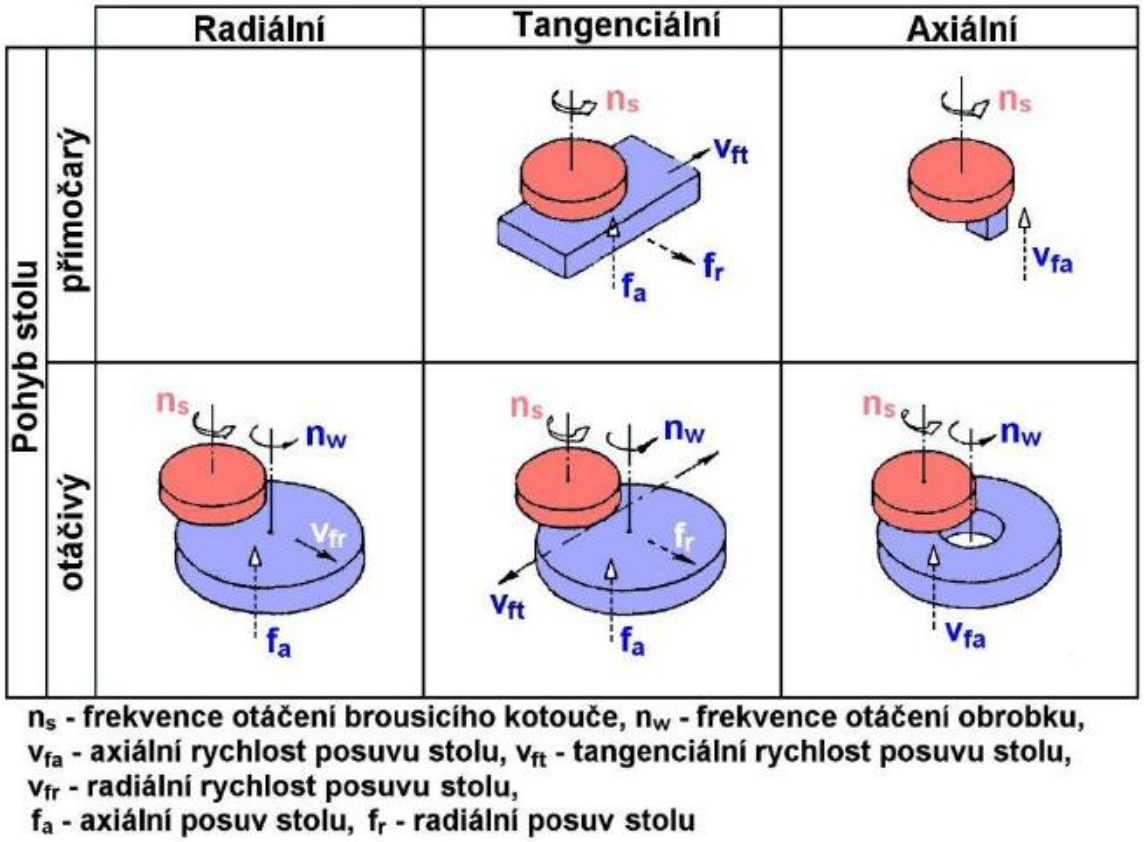
  Posuv stolu (hlavní) ve zvoleném bodě D je radiálním směrem ke kotouči.
- **Broušení obvodové zápichové**

  Rychlost, hlavní posuv stolu a směr je plynule radiální.
- **Broušení čelní zápichové**

  Rychlost, hlavní posuv stolu a směr je plně axiální.



Obr. 4. Kinematické charakteristiky broušení [5]
P_p-Rovina zadní (nástrojová), Pr- Rovina základní (nástrojová), P_f- Rovina boční (nástrojová)



Obr. 5. Vyobrazení a popis základních způsobů broušení čelního[1]

1.2.4 Vybrané metody broušení

Proces broušení je možno popisovat a v technické praxi uskutečňovat odlišnými metodami, které se provádějí dle použité problematiky. [1]

Vnější rotační broušení:

- S podélným posuvem
- S příčným posuvem
- Broušení bezhroté
- Broušení pomocí kluzných opěrek

Broušení vnitřní:

- Při otáčení obrobku
- S posuvem podélným a příčným
- Planetové bezhroté broušení

Rovinné broušení

- Broušení obvodem kotouče
- Broušení čelem brousícího kotouče

Broušení a jeho speciální metody

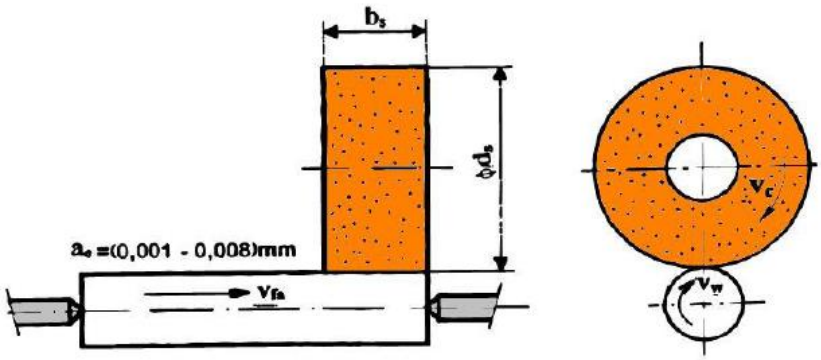
- Tvarové broušení
- Závitové broušení

Popis brousících metod:

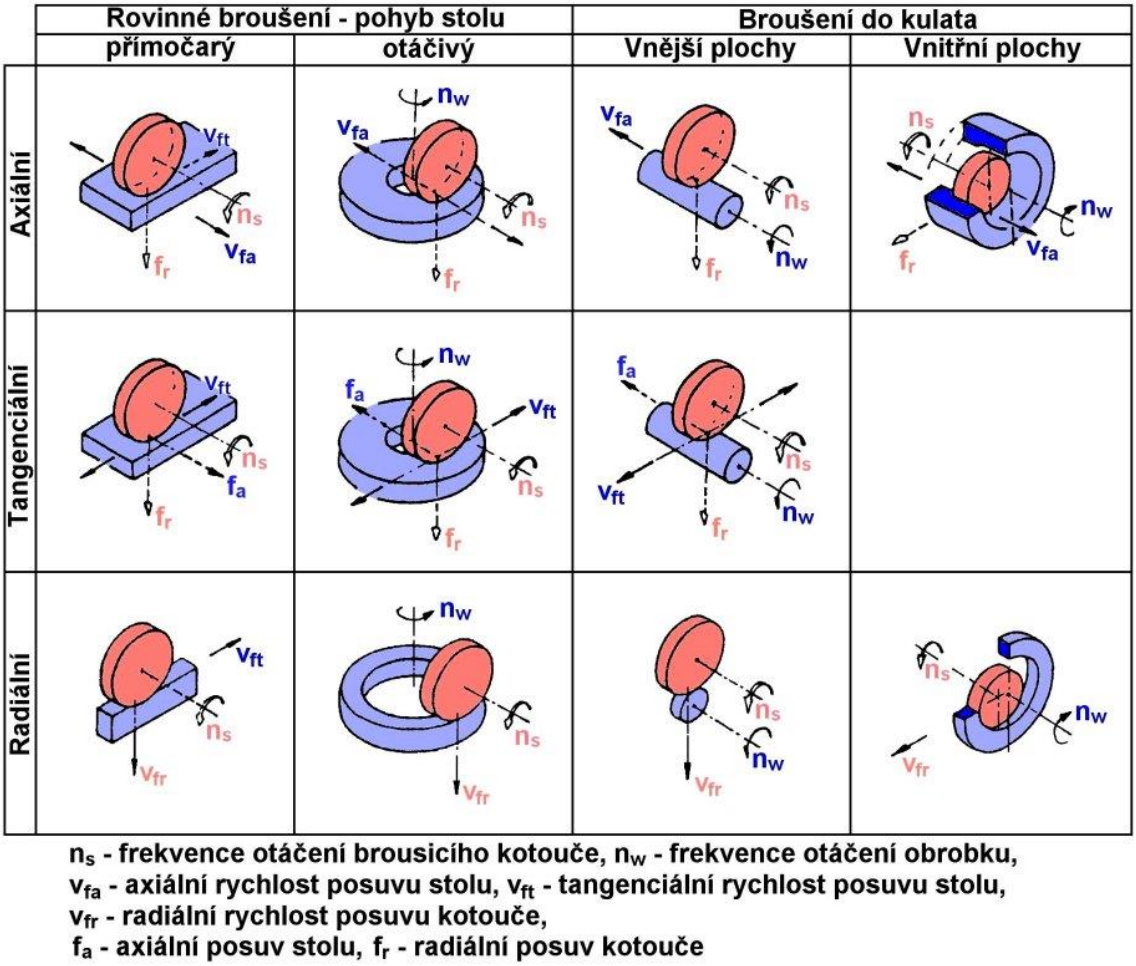
V technické praxi se využívá široké škály metod broušení na konvenčních nebo na moderních plně automatických CNC bruskách a brousících centrech. [1]

Obvodové broušení s axiálním posuvem:

S tímto posuvem se brousících metod používá pří dokončování dlouhých součástí. Broušená součást je upnuta na stroji mezi hroty a vykonává rovnoběžný posuvový pohyb v ose obrobku. [1]



Obr. 6. obvodové broušení s axiálním posuvem[1]



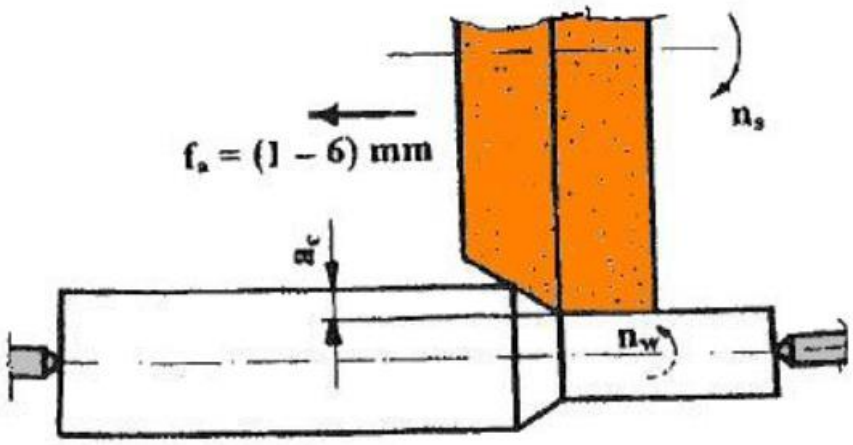
Obr. 7. Nejčastější způsoby obvodového broušení [1]

1.2.5 Hloubkové broušení

Způsob broušení, jehož nástroj je předpřipraven na daný rozměr (hloubkové broušení) je to metoda broušení, při kterém se přídavek ponechán na opracování odbrousí přímo v jediném kroku. Pří této metodě se používá co nejmenší axiální posuv stolu. [1]

V procesu broušení nenalezneme produktivnější metodu, jako je výše zmíněná metoda hloubkového broušení. Hlavní použití nachází při malých přídavcích na opracování. Pracovní záběr se používá v rozmezí (0,1-0,4) mm. Hloubkové broušení má výkon vyšší o 25-75% při porovnání s broušením axiálním. [1]

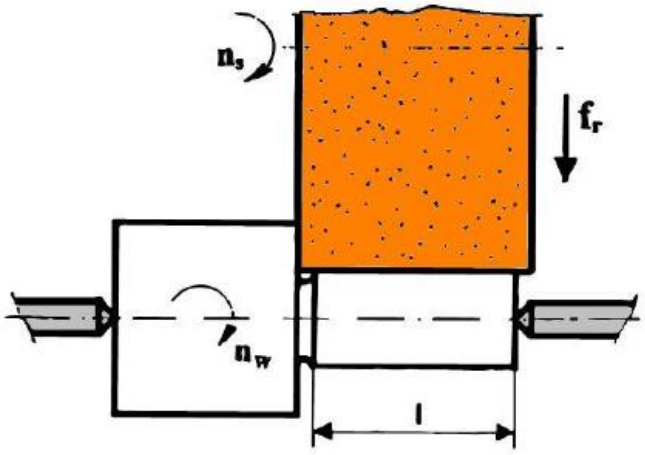
Při hrubovacím broušení se využívá brousících kotoučů s kuželovým zkosením. Získáme tím zlepšení podmínek broušení. Stupňovitého tvarování kotoučů se používá při velkých přídavcích ponechané k opracování. [1]



Obr. 8. Hloubkové broušení [1]
***ns** – frekvence otáčení brousícího kotouče; **nw** – frekvence otáčení obrobku; **fa** – šířka broušené vrstvy*

1.2.6 Radiální broušení

Použití v praxi nachází při broušení tuhých obrobků o délce nepřesahující 350 mm. Výkon broušení je asi o 40-80% vyšší v porovnání s axiálním broušením. [5]



Obr. 9. Princip radiálního broušení [1]
***ns** – frekvence otáčení kotouče; **nw** – frekvence otáčení brouseného obrobku; **fr** – posuv stolu (radiální) na otáčku; **l** – délka broušené plochy*

Pro hrubé broušení se volí posuv stolu na otáčku obrobku: [1]

- f_r=(0,0025-0,0075) mm

Pro broušení na čisto:

- f_r=(0,001-0,005)mm

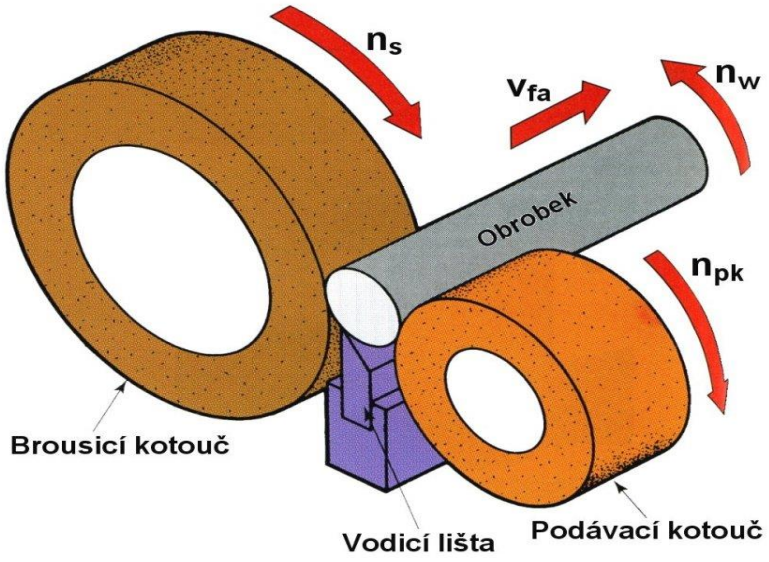
1.2.7 Bezhroté broušení

Bezhroté broušení se vyznačuje vysokou produktivitou vykonané práce pří zápichovém i průchozím (průběžném) broušení. Jeho aplikace se nachází převážně v hromadné a sériové výrobě. [1]

1.2.8 Průběžné bezhroté broušení

Broušení bezhroté průběžné se používá při broušení hladkých a přesných součástí válcového tvaru.

Při této metodě je nezbytná aplikace dvou brousících kotoučů, mezi kterými je umístěn obrobek. Oba kotouče plní svou významnou funkci. Jeden kotouč vykonává brousící proces a druhý kotouč je do procesu zaveden jako podávací. Brousící kotouč je význačný svou velikostí jeho průměr je dvojnásobný v porovnání s kotoučem podávacím. Obrobek se při broušení otáčí obvodovou rychlostí, která je ve shodě s rychlostí kotouče podávacího, jehož osa je usazena v mezích od 5-35 mm nad osou jak brousícího, tak kotouče podávacího. Skrz oba kotouče vede vodící lišta, která je kalená a díky ní je obrobek bezpečně veden. Změní-li se úhel kotouče podávacího dojde k rozložení obvodové rychlosti na dvě složky, axiální pohyb uděluje vodorovná složka a druhá svislá složka jim otáčí obvodovou rychlostí. [1]



Obr. 10. Princip bezhrotého průběžného broušení [1]
***n_s** - rychlost obvodová brousícího kotouče; **n_{pk}** - rychlost obvodová podávacího kotouče;*

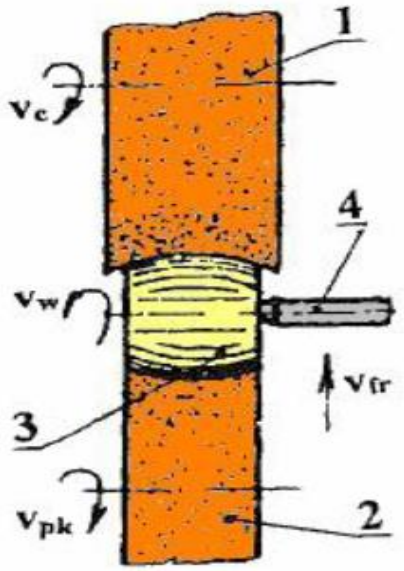
***V_{fa}** - rychlost obvodová obrobku; **V_{fa}** - rychlost axiální posuvu obrobku*

1.2.9 Broušení bezhroté zápichové

Použití bezhrotého zápichového broušení můžeme v technické praxi nalézt hlavně v hromadné výrobě malých a tuhých obrobků. Brousící kotouč provádí posuv radiální kolmo ve směru dané osy obrobku. Broušená plocha bývá menší než 100 mm a to jak z důvodu růstu aktivní plochy kotouče, tak i z důvodu vzniku řezných sil a příkonu potřebného k obrábění součásti. [2]

Bezhrotého zápichového broušení nachází uplatnění u součástí u kterých se nachází tzv. nákružek a které nemají středící důlky. Obrobek se vkládá axiálně z vrchní části k dorazům mezi brousící a podávací kotouč, jejichž osy jsou navzájem rovnoběžné. [5]

Z pravidla se brousí na dva úběry s přídavkem pro úběr druhý. Přídavek na druhý úběr bývá v rozmězí 0,03 až 0,05 mm. [1]



Obr. 11. Princip zápichového broušení bezhrotého [1]
***1** – brousící kotouč; **2** – podávací kotouč; **3** – obrobek; **4** – doraz; **vc** – rychlost obvodová brousícího kotouče; **vw** – obvodová rychlost obrobku; **vpk** – rychlost obvodová podávacího kotouče; **vfr** – rychlost radiální posuvu stolu*

Tab. 7. Řezné podmínky pro bezhroté broušení- způsob průběžný [1]

Druh práce	Průměr broušené součásti d_w [mm]	Přídavek na průměr $2a_e$ [mm]	Úhel nastavení α	Obvodová rychlost podávacího kotouče v_w [m.min^{-1}]
Hrubování	do 10 10 až 25 25 až 75 75 až 150	0,04 až 0,06 0,06 až 0,1 0,1 až 0,3 0,2 až 0,4	3 až 4 2,5 až 3,5 2 až 3,5 1 až 2,5	150 až 80 120 až 50 50 až 10 25 až 8
Broušení na čisto	-	0,005 až 0,02	1,5 až 2	120 až 50

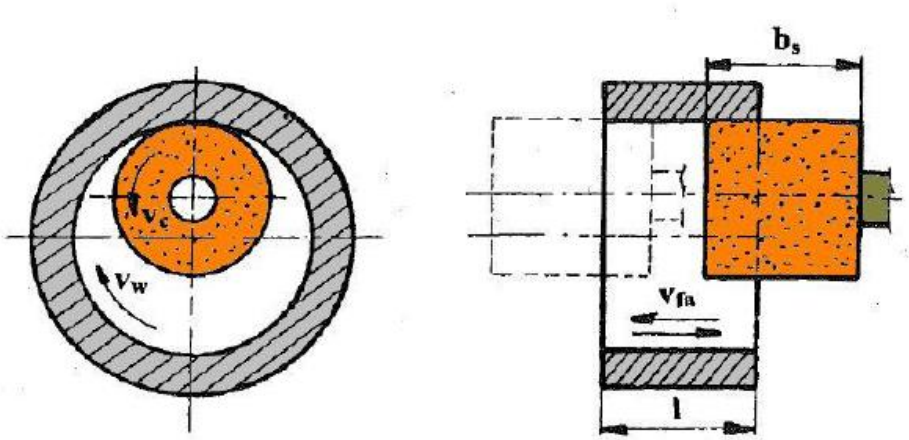
Tab. 8. Řezné podmínky pro broušení bezhroté- způsob zapichovací [1]

Druh práce	Radiální posuv na 1 otáčku obrobku f_r [mm]	Obvodová rychlost podávacího kotouče v_w [m.min^{-1}]
Hrubování	0,005 až 0,02	10 až 25
Broušení na čisto	0,03 až 0,01	10 až 25

1.2.10 Broušení vnitřních ploch do kulata

1.2.10.1 Axiální broušení

Brusný kotouč se otáčí uvnitř otvoru rychlostí v_c tam se plynule posouvá ve směru osy otvoru daným posuvem v_{fa} obrobený díl se otáčí o frekvenci otáčení n_w. Odbroušení přídavku zaručuje vzájemné posunutí dokončovaného dílu a brousícího kotouče kolmo na broušený povrch součásti o radiální hodnotu a_e. [1]



Obr. 12. Broušení vnitřní s posuvem podélným a přísuvem radiálním [1]

Průměr brousícího kotouče je vždy maximálně v rozmezí 0,6-0,85 průměru dokončovaného otvoru. Z tohoto důvodu musí mít kotouč přiměřený průměr pro broušení otvorů menších rozměrů. Brousící

kotouče o malých rozměrech se velmi rychle opotřebovávají, to má za následek vysoké zanášení a z toho důvodu se snižuje potřebná řezná schopnost, tak i tvar brousícího kotouče. To má za následek časté orovnávání brousícího kotouče. Brousící kotouč menších průměrů by měl mít zabezpečené vysoké otáčky a to je někdy obtížné zabezpečit. Z toho důvodu se díry menších rozměrů dokončují menšími rychlostmi a to vede ke snížené kvalitě broušené plochy. [5]

Při volbě obvodové rychlosti součásti v_w je nutno brát v potaz, že když se zvyšuje obvodová rychlost broušené součásti, tak se zvyšuje odvod tepelné energie a tím klesá možnost vzniku tzv. opalů na povrchu broušené součásti. Se zvyšující se frekvencí otáčení obrobku narůstají odstředivé síly, které jsou nežádoucí a ty mají za následek zvyšující se chvění soustavy a to má vliv hlavně na zhoršení technických podmínek stroje. [1]

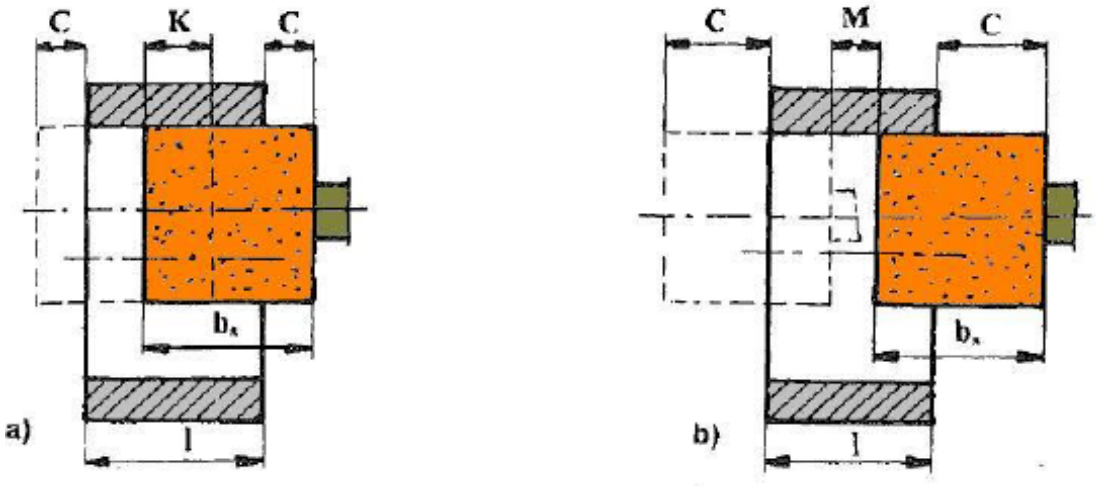
Poměr mezi rychlosti v_w a v_c se volí v rozmezí od 1:60 až 1:100.

Při volbě obvodových rychlostí součásti, nesmíme vynechat následující faktory: [1]

- Tepelného zpracování a jeho druh
- Druh broušeného materiálu
- Řezné parametry
- Typ brousícího kotouče

Tab. 9. Volba řezných parametrů (poměrů) při vnitřním broušení [1]

Druh práce	Podélný (axiální) posuv $\mathbf{f_a}$ [mm]	Pracovní (radiální) záběr $\mathbf{a_e}$ [mm]	Obvodová rychlost obrobku $\mathbf{v_w}$ [m.min^{-1}]
Jednoduché brusky			
▪ hrubování	$(0,4 \div 0,7).b_s$	0,005 ÷ 0,02	20 ÷ 40
▪ broušení na čisto	$(0,25 \div 0,4).b_s$	0,0025 ÷ 0,01	20 ÷ 40
Poloautomatické brusky			
▪ hrubování	$(0,4 \div 0,75).b_s$	0,0025 ÷ 0,005	50 ÷ 150
▪ broušení na čisto	$(0,25 \div 0,4).b_s$	0,0015 ÷ 0,0025	50 ÷ 150

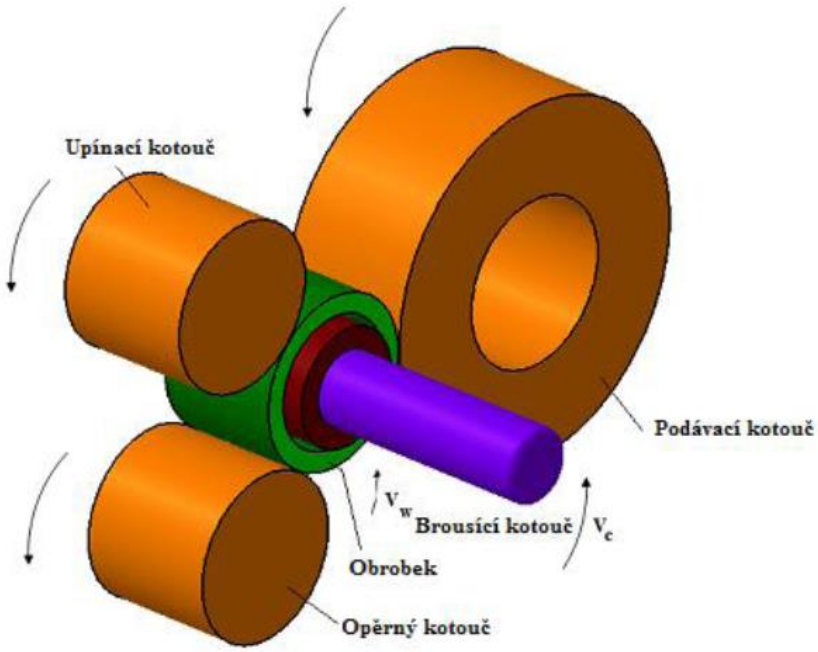


Obr. 13. Princip vnitřního broušení [1]

a *– s překrytím;* ***b*** *– s průsvitem;* ***C*** *– přeběh kotouče;* ***K*** *– překrytí;* ***M*** *– průsvit*

bs *– šířka brousícího kotouče;* ***l*** *– délka obráběné ploch*

1.2.10.2 Broušení bezhroté



Obr. 14. Vnitřního broušení (bezhrotého) [6]

Dokončovaný díl se aplikuje mezi podávací, opěrný a upínací kotouč. Funkce kotouče podávacího zajišťuje neustálý otáčivý pohyb dané broušené součásti. Opěrný kotouč plní funkci zajišťující

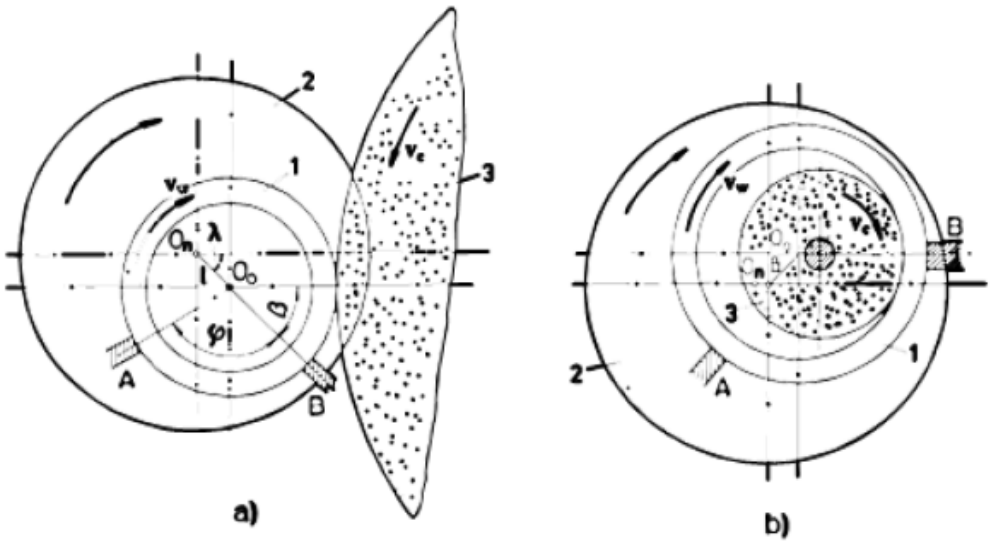
bezpečnou a fixovanou polohu dokončované součásti. Poslední kotouč upínací přitlačuje a tím je zajištěno bezpečné upnutí broušeného dílu během celého procesu. [1]

Tento způsob bezhrotého broušení lze s úspěchem aplikovat jen u těch součástí, které mají:

Požadovaný válcový vnější povrch souosý s broušeným vnitřním povrchem. Nepožadované odchylky povrchu vnějšího broušené součásti mají za následek vznik nepřesnosti při otáčení, protože se zvolená součást ustavuje od povrchu vnějšího. [1]

1.2.10.3 Bezhroté broušení v tuhých opěrkách

Výjimečnou přesnost geometrického tvaru dokončované součásti zajistíme zařazením tzv. bezhrotého broušení v tuhých opěrkách. Tuto metodu lze aplikovat jak pro vnitřní, tak i pro vnější broušení. [1]



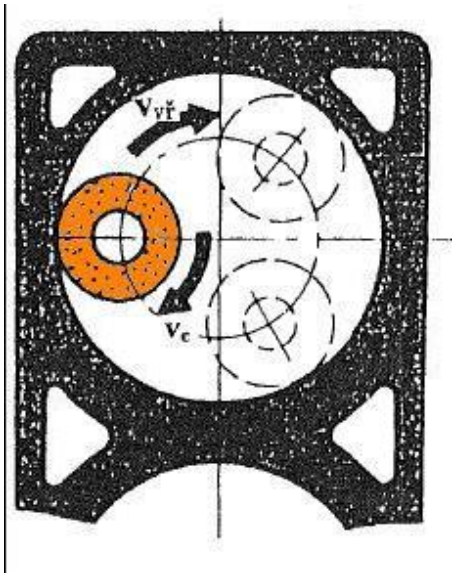
Obr. 15. Princip bezhrotého broušení v tuhých opěrkách [1]

***a** – broušení vnější; **b** – broušení vnitřní; **1** – obrobek; **2** – příruba; **3** – brousící kotouč; **A** – opěrka; **B** – opěrka*

1.2.10.4 Broušení planetové

Tato metoda je vhodná pro broušení děr na strojních součástech, které nelze z nějakých důvodů upnout ve sklíčidle nebo jiném přípravku jako např. čelistech. Pro tyto díry se používá planetové broušení. Jako stroj se používá planetová bruska. Broušená součást je upnuta na stůl planetové brusky a jeho vřeteno, v němž je upnut brousící kotouč, který vykonává otáčivý pohyb kolem

vlastní osy zvolenou obvodovou rychlostí. Hlavní nevýhoda se nachází v přesnosti planetových brusek, která je menší a to z toho důvodu, že vřeteno planetových brusek nemá tak vysokou požadovanou tuhost. [1]



Obr. 16. Princip vnitřního planetového broušení [1]

***vvř** – rychlost otáčení osy brousícího kotouče kolem osy broušeného otvoru; **vc** – obvodová rychlost brousícího kotouče*

1.2.11 Broušení rovinné

Operace, která je zařazena po jemném frézování je právě výše zmíněná operace rovinného broušení, která obstarává odebrání přídavku, který je určen na opracování. Tuto operaci je možno také zařadit i místo zmíněného frézování a to hlavně při obrábění tvrdých a velmi tvrdých materiálů. [5]

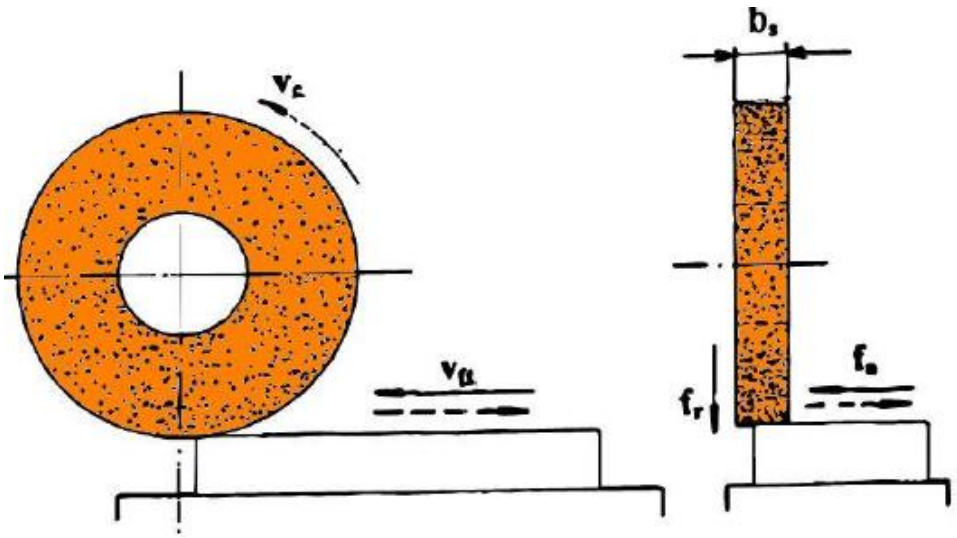
Při broušení ploch rovinných rozeznáváme dva základní principy, které využívají přímočarý pohyb obrobku a to: [2]

- Rovinné broušení obvodem kotouče
- Rovinné broušení čelem kotouče

1.2.12 Obvodové broušení

Řadí se mezi nejpřesnější metody dokončování ploch. Brousí se s velmi úzkým kotoučem, proto předcházíme vzniku vysokých nežádoucích teplot a vzniklé deformace vlivem tepelného účinku jsou menší nebo jen zanedbatelné. [1]

Při broušení touto metodou je možno obrobek buď otáčet, nebo posouvat (přímočaře). Zvolíme-li druhou zmíněnou metodu posuvu (přímočarého) obrobku, otáčí se kotouč zvolenou obvodovou rychlostí v_c a obrobek vykonává podélně vratný pohyb zvolenou posuvovou rychlostí $v_{ft.}$ V jedné nebo i v obou úvratích se brousící kotouč příčně posouvá vzhledem k broušenému dílu o zvolenou hodnotu f_a a po skončení operace se radiálním posuvem f_r nastaví hloubka broušení a to opakovaně až po celkový přídavek na broušení. [1]

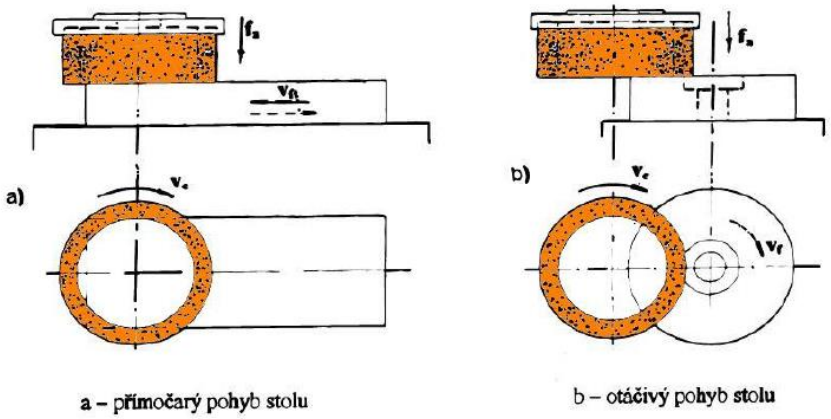


Obr. 17. Princip rovinného broušení obvodového – přímočarý pohyb stolu [2]
***fa** – axiální posuv stolu na otáčku obrobku; **vc** – řezná rychlost; **vf** – posuvová rychlost;*
***vft** – radiální rychlost posuvu stolu*

1.2.13 Broušení čelní

Čelní broušení není tak přesné v porovnání s broušením obvodem kotouče, ale je mnohem výkonnější. Při broušení se broušená součást buď přímočaře posouvá, nebo vykonává otáčivý pohyb. [1]

U brusek rovinných lze sklopit vřeteno vzhledem k broušené ploše o určitý počet stupňů (max. o 5°), aby došlo ke zmenšení styčné plochy nástroje a součásti. Dochází tím ke zlepšení řezných podmínek, dochází k lepšímu odstranění třísek z řezu a dochází k lepšímu účinku chlazení, ale dochází také k horší rovinnosti broušené plochy. [5]

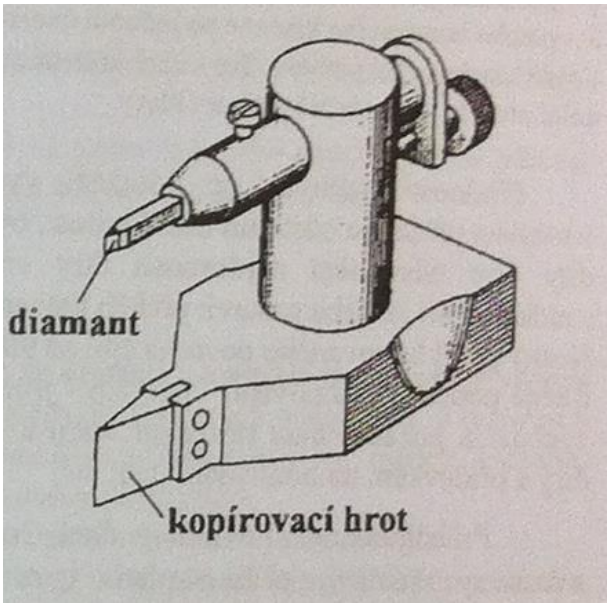


Obr. 18. Princip rovinného broušení čelního[2]
***fa** – posuv stolu (axiální) na otáčku obrobku; **vc** – řezná rychlost;*
***vf** – posuvová rychlost, **vft** – rychlost posuvu stolu (radiální)*

1.2.14 Broušení tvarové

Mimo již zmíněné relativně nenáročné procesy rovinného broušení, tvarů válcových a kuželových. Je důležité taky nezapomenout na broušení ploch tvarových. Složitější a tvarové plochy se zpravidla brousí dvěma způsoby a to: [5]

- **Kotouči profilovými**
- **Brousícími kotouči** s obvyklým tvarem přičemž pohyb, který tvoří požadovaný tvar pomocí tzv. šablony, vykonává brousící kotouč nebo součást. V častých případech se používá broušení pomocí moderních CNC brusek. [5]
  Složitější tvary na obvodu brousícího kotouče se vytváří pomocí kopírovací šablony a diamantu upnutého ve speciálně zhotoveném přípravku, který je vyobrazen na obrázku č.19.



Obr. 19. Přípravek pro tvarování brousícího kotouče pomocí šablony [1]

1.3 Dokončovací metody obrábění

Metody zvané jako dokončovací s výhodou používáme tam, kde požadujeme vysoké nároky na kvalitu obráběného povrchu a jeho přesnost.

1.3.1 Honování

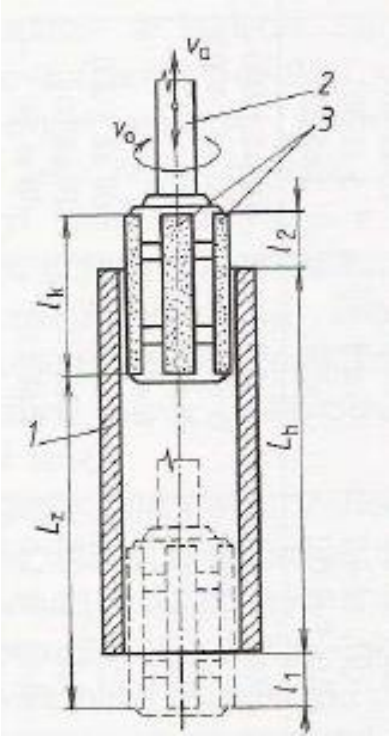
Honování se řadí mezi nejdůležitější dokončovací metody obrábění, při kterém se jakost obrobených povrchů zvyšuje řezným účinkem jemného brusiva. Honováním se dokončují hydraulické, pneumatické a brzdné válce, ložiska vřeten atd. Mezi největší výhody honování je možnost honovat širokou škálu materiálů. Mezi tyto materiály patří jak materiály kalené, tak i oceli nekalené, litiny, hliníkové slitiny, neželezné kovy atd. [1]

Honování se nejčastěji používá pro dokončování válcových ploch vnitřních, to se nazývá vnitřní honování. Honovat lze také válcové díry jak průchozí, tak i neprůchozí, s drážkami odlišných tvarů a velikostí v rozsahu průměrů od 2 až 760 mm. Dále také délek v rozsahu až 24 m. Se speciálním přídavným zařízením lze honovat i kuželové díry. [1]

Lze také honovat vnější válcové plochy to se nazývá vnější honování, které je méně časté. [1]

1.3.1.1 Technologická charakteristika honování

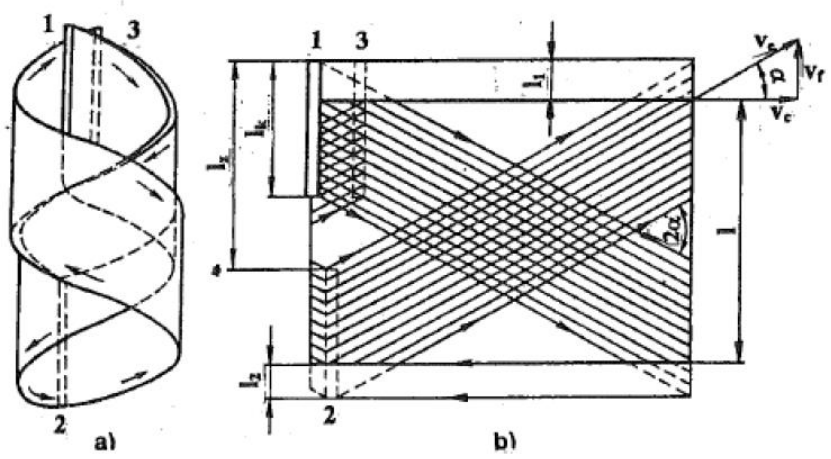
Honování si lze představit jako broušení. A to menší rychlostí pomocí jemného brusiva, které je obsaženo v honovacích kamenech upevněných v honovací hlavě, která může obsahovat až 12 kamenů.



Obr. 20 Popis honovacího nástroje [6]
1-Honovaná součást, 2-Upínací trn,
3-Honovací kameny

Při honování je důležité použití intenzivního chlazení a proplachování pomocí řezných kapalin. Jako řezné kapaliny se používají: Oleje, petrolej.

Při použití vnitřního honování vykonává honovací kámen v díře složený šroubovicový pohyb, který je složen kombinací rotačního pohybu honovacího nástroje s rychlostí v_c tak i posuvného vratného pohybu ve směru osy honování s rychlostí $v_{f.}$ Výsledné dráhy zrn jemného honovacího brusiva se společně překrývají a na tomto povrchu vznikají charakteristické stopy křížového charakteru, které pak společně svírají úhel 2α. [1]



Obr. 21. Schéma honovacího procesu [4]
***a** – složený pohyb honovacích kamenů; **b** – rozvinutá plocha honovaného povrchu součásti; **1** – počáteční poloha honovacího kamene; **2** – poloha honovacího kamene v dolní části úvrati; **3** – poloha honovacích kamenů po jednom dvojzdvihu; **vc** – řezná rychlost; **vt** – posuvová rychlost; **ve**- rychlost řezného pohybu; **2α** – úhel křížení stop; **lk** – délka honovacích kamenů; **l1,2** – horní a dolní přeběh, **lz** – zdvih honovací hlavy*

Mezi značné výhody honování patří hlavně vysoké přesnosti geometrického tvaru. Honováním se dají odstranit různé nepřesnosti vzniklé po předchozích operacích jako např. kuželovitost, soudkovitou, ovalitu, ale změnit polohu honované díry nelze. Požadujeme li od této operace eliminace nepřesností díry ve směru její osy je třeba přeběh kamenů nastavit o 0,3 až 0,4 délky dané honovací hlavy. [1]

Mezi základní faktory, které ovlivňují řezné podmínky honování jsou např.:

- Honovaný materiál
- Použitý druh brusiva
- Průměr díry

Přídavek na honování se volí v rozmezí od 0,02 až 0,08 mm.
Čas honování je relativně krátký od 2-3 min.
Dále dělíme honování na jednostupňové a honování dvoustupňové. [1]

Průběh honování výrazně ovlivňuje úhel 2α. Hodnota tohoto úhlu α závisí hlavně na posuvové rychlosti a řezné rychlosti. Doporučené hodnoty α jsou od 20° do 55°. Při aplikaci větších úhlů se získá menší drsnost honované plochy. [1]

Honovací kameny jsou k dokončovanému povrchu přitlačovány tlakem, který tvoří taktéž součást řezných podmínek. [1]

1.3.2 Lapování

1.3.2.1 Charakteristika lapování

Řadí se mezi nejvýznamnější dokončovací metody obrábění. Lapováním je možno dosáhnout nejpreciznější rozměrové přesnosti a nejnižší drsnosti povrchu. Jeho uplatnění v praxi se nachází v dokončování ploch:

- Rovinných
- Válcových
- Tvarových vnějších
- Tvarových vnitřních

Lapováním se zhotovují funkční plochy měřidel (koncové měrky, kalibry), ozubení, součásti motorů automobilů apod. [5]
Touto metodou se dají dokončovat měkké i tvrdé materiály a to buď ručně pro kusovou výrobu, nebo strojně v hromadné a sériové výrobě. Lapování lze srovnávat jako zvláštní druh broušení, při němž k úběru materiálu dochází pomocí volného brusiva, které je přiváděno mezi pohybující se lapovací nástroj a lapovaný obrobek. U měkčích lapovacích nástrojů mohou být zrna brusiva zamačkána nebo jinak upevněna v lapovacím nástroji. [1]
Z technologického hlediska se lapování rozlišuje jako hrubovací (činná plocha je rýhovaná), jemné a velmi jemné (činná plocha kotoučů je hladká). Při hrubovacím lapování dochází k odřezávání výstupků a nerovností obráběného povrchu velkým počtem zrn brusiva. Při velmi jemném lapování dochází k plastickým deformacím povrchové vrstvy lapované plochy. [5]
Mezi brusiva pro lapování patří:

Umělý korund pro oceli

Karbid křemíku pro litiny, keramiku a sklo

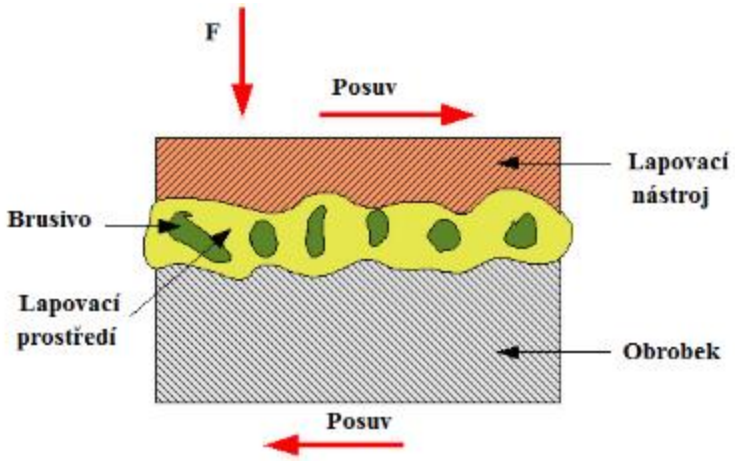
Karbid bóru, kubický nitrid bóru a diamant pro zvlášť tvrdé materiály jako slinuté karbidy a rychlořezné oceli

Oxid železitý, oxid chromový nebo vídeňské vápno pro měkké materiály

1.3.2.2 Lapovací nástroje

Tyto nástroje mají negativní tvar ploch lapovaných. Jsou vyráběny z litiny, mědi a taky měkké oceli, olova apod. Pro velmi jemné lapování nachází uplatnění také nástroj z kalené oceli nebo tvrdě chromované nástroje. Pro ruční lapování se používají lapovací desky pro lapování rovinných ploch, lapovací trny se používají pro lapování děr a lapovací prstence nacházejí uplatnění pro lapování vnějších válcových ploch. [16]

Při strojním lapování se pro rovinné plochy používají lapovací kotouče z litiny nebo brousící kotouče s vázaným brusivem a keramickou vazbou. Pro lapování vnějších rotačních ploch se používá bezhrotý zapichovací nebo průběžný způsob, kdy jako nástroj slouží kotouč s brusivem v keramické vazbě. [16]



Obr. 22. Schéma řezného procesu při lapování [5]

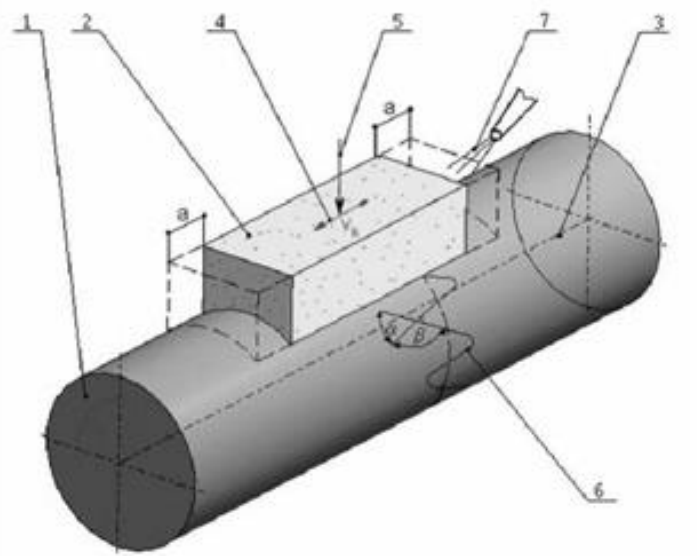
1.3.3 Superfinišování

Superfinišování se řadí mezi vysoce produktivní metody dokončovacího obrábění jak vnějších tak i vnitřních rotačních, tvarových a rovinných ploch. Hlavní uplatnění nachází při dokončování valivých ložisek a součástí v automobilovém průmyslu. Superfinišují se jak součásti z kalené, tak i nekalené oceli, litiny, slitin těžkých kovů a taky plastů. Největšího úběru se dosahuje při křížená drah $\alpha = 40 - 60°$, ale obrobený povrch má matný vzhled. Při úhlech $\alpha < 40°$ se snižuje řezivost superfinišovacího kamene a povrch tím získá vysoký lesk. [5]

Jako řezná kapalina (vyplachovací) se nejčastěji používá petrolej s 10 – 15 % minerálního oleje nebo oleje s přídavnými aditivy. Pro jemné superfinišování (dosažení vysokého lesku) a měkčí materiály je doporučeno použít kapalin s vyšší viskozitou např. olej. Pro superfinišování s větším úběrem jsou vhodné kapaliny s viskozitou nižší např. petrolej. [1]

Průběh superfinišování ovlivňuje hlavně rychlost kmitavého pohybu, obvodová rychlost obrobku,

velikost tlaku a viskozita zvolené řezné kapaliny. Superfinišování má dvě fáze. První fází je fáze hrubovací a druhou fází je fáze leštící, pro které je důležitý poměr rychlosti kmitavého pohybu nástroje a obvodové rychlosti obrobku, který určuje úhel zkřížení drah zrn zvoleného brusiva 2α. Operace která je řazena v technologických postupech před superfinišováním je operace broušení, popřípadě jemné soustružení. [1]



Obr. 23. Schéma superfinišování [2]

1 – obrobek, 2 – superfinišovací kámen, 3 – osa obrobku, 4 – frekvence kmitavého pohybu, 5 – tlaková síla superfinišovacího kamene působící na obrobek, 6 – stopa po jednom zrnu brusiva, 7-přívod řezné kapaliny, a - amplituda, α, β – úhel sklonu stopy po jednom zrnu brusiva

1.3.3.1 Superfinišovací nástroje

Superfinišovací kameny se používají s brusivem z umělého korundu s keramickou, nebo bakelitovou vazbou pro superfinišování ocelí. Pro superfinišování litiny, ocelí nižších pevností, nerezavějící oceli, nebo neželezných kovů se používá superfinišovacích kamenů z brusiva karbidu křemíku. Pro superfinišování vysoce legovaných ocelí nachází využití superfinišovací kámen z kubického nitridu bóru v keramické vazbě, pro materiály ze slinutých karbidů se používá superfinišovací kámen ze syntetického diamantu v organické vazbě. [5]
Kameny jsou do superfinišovacích hlav upevněny mechanicky nebo se lepí na ocelové podložky. [5]

1.4 Beztřískové metody dokončování obrobených povrchů

Spočívá v plastické deformaci dokončované povrchové vrstvy. Tato deformace proniká do hloubky několika setin popř. desetin milimetrů, čímž dochází ke zlepšení parametrů struktury povrchu a ke zvyšování pevnosti a tvrdosti dokončované plochy. [1]

V povrchové vrstvě dochází ke vzniku tzv. tlakových napětí a dochází ke zvyšování mezu únavy, odolnosti proti opotřebení a odolnosti proti korozi a vnějším vlivům. [1]

Mezi nejdůležitější a nejpoužívanější beztřískové metody dokončování povrchů patří válečkování, kuličkování a vyhlazování povrchu pomocí diamantu. [1]

1.4.1 Válečkování

Válečkováním se dokončují plochy jak vnitřní tak i vnější. Pří válečkování dochází k plastické deformaci a ta má za následek vyhlazení nerovností způsobené předchozím obráběním. Mimo jiné dochází při válečkování ke zkvalitnění a ke zpevnění povrchové vrstvy. [5]

Zvyšuje se:

- Tvrdost
- Pevnost
- Mez únavy.

Válečkování se dělí na:

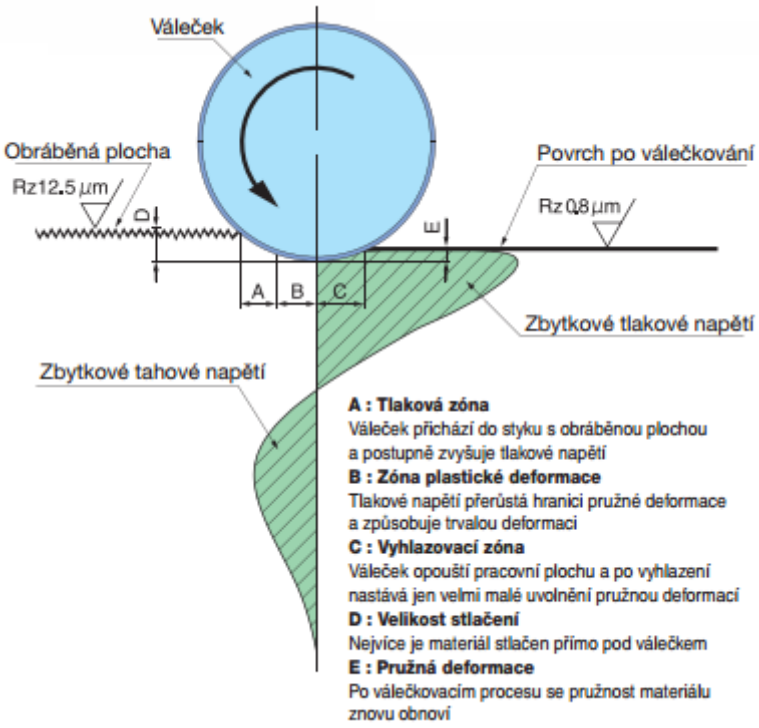
- Statické
- Dynamické

Pří válečkování statickém se po povrchu odvaluje váleček. Cílený efekt závisí hlavně na průměru válečku. U menších průměrů válečků dochází ke zvyšování hlouby zpevnění. U větších průměrů válečků získáváme povrchy s nižší drsností. [1]

Při válečkování dynamickém je povrch dokončované součásti deformován silovými impulzy tvářecích prvků, vyvozenými rotujícím trnem nebo také kroužkem s vačkovými plochami. Technologické podmínky jako je posuv se nedá přesně určit musí být ověřen experimentálně. Hlavní výhodou dynamického válečkování je vyšší jakost zpevněné povrchové vrstvy. [5]

Obr. 24. Válečkovací nástroj [3]

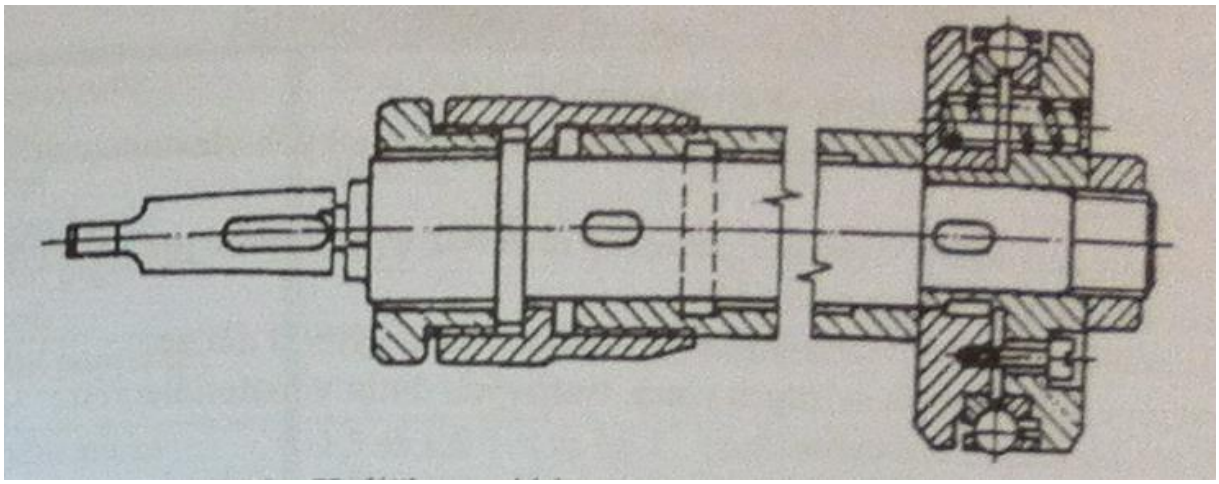
Válečkováním dochází ke změně rozměrů součásti v rozmezí od 0,01 až 0,03. Tím dojde k dosažení vyšší přesnosti od IT6 do IT8. Drsnost povrchu bývá v rozmezí Ra= 0,1 až 0,3 μm. [2]



Obr. 25. Schéma válečkování [5]

1.4.2 Kuličkování

Statické kuličkování se dá srovnat se statickým válečkováním, ale na místo válečků je aktivním nástrojem kalená kulička odvalující se po dokončovaném povrchu. [1]



Obr. 26. Schéma kuličkové hlavy pro statické kuličkování děr [1]

Kuličkování se používá pro dokončování vnitřních a vnějších rotačních ploch. Uplatnění nachází také pro tvarové a rovinné plochy. [1]

Na nenáročné operace se používají držáky s jednou kuličkou. Pro náročnější operace a pro zvýšení výkonu se používá držáků s více kuličkami. Válcové plochy vnitřní se kuličkují stavitelnými rotačními trny, umožňují kuličkování v určitém rozsahu průměrů. [1]

Obvodová rychlost při kuličkování se volí od 40 až 150 $m.min^{-1}$, posuv na otáčku obrobku se volí v rozmezí od 0,1 až 0,4 mm. Jako mazivo se používá řezných a minerálních olejů. Dosahovaná rozměrová přesnost povrchu je cca od IT7 až IT9, drsnost povrchu je v rozmezí od 0,1 až 0,4 μm. [1]

Kuličkování se dělí na:

- Dynamické kuličkování
- Vibrační kuličkování

1.4.2.1 Dynamické kuličkování

Slouží ke zpevňování tvarově složitých součástí, při kterém se na povrch vrhá proud kuliček o průměru od 0,3 až 3 mm nejčastěji z oceli nebo bílé litiny rychlostí cca. 60 $m.s^{-1}$. [15]

Obdobou kuličkování je tzv. hydrofiniš, kdy je na povrch aplikováno brusivo v proudu tlakové kapaliny. Na místo brusiva je možno použít skleněné kuličky, tzv balotiny o průměru od 0,03 až 0,8 mm, které jsou na dokončovaný povrch tryskány buď vodou, nebo také vzduchem. Dosahovaná drsnost povrchu je pak v rozmezí od 0,8 až 1,6 μm. [1]

1.4.2.2 Vibrační kuličkování

Jeho hlavní uplatnění se nachází pro dokončování tvarově složitých součástí. Proces je realizován nárazy kuliček na součást umístěnou v nádobě, které je udělen kmitavý pohyb ve třech směrech. [1]

2 PARAMETRY HODNOCENÍ DRSNOSTI POVRCHU

2.1 Jakost povrchu

Splnění požadované jakosti povrchu jsou považovány za nejvýznamnější úkoly technologie výroby. Jakost je pojem, který zahrnuje jak rozměrovou, tak i geometrickou přesnost, ale taky vlastnosti povrchové vrstvy a změny nastanou v dané povrchové vrstvě. Každá plocha, která je označena jako funkční má svoji specifickou jakost, tj. Drsnost, rozměr, tvar. [7]

Hodnocení jakost- Hodnocení objektivní

- Komparační
- Kontaktní- Přímé
- Bezkontaktní- Přímé

Hodnocení jakosti- Hodnocení subjektivní

- Vzhled
- Barva

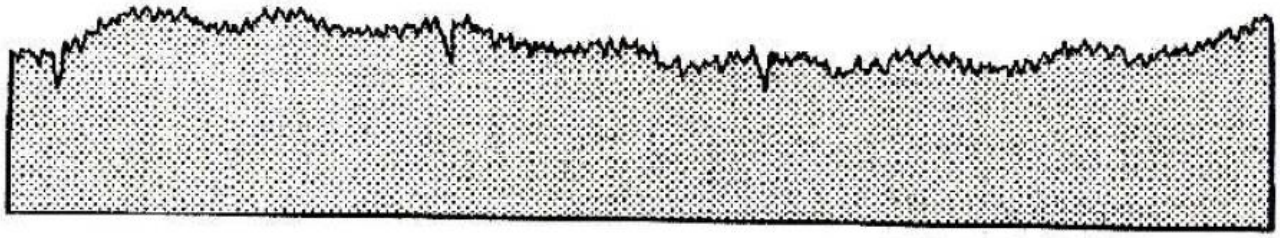
Drsnost povrchu je ovlivněna mnohými faktory, které jsou zahrnuty do výrobního procesu mezi tyto faktory významně zasahuje hloubka obráběné třísky, řezná rychlost, velikost posuvu, ale značný vliv na výslednou drsnost povrchu má taky volba aplikované technologie, která bude použita na obrábění daného povrchu jako např. volba nástroje a jeho předepsaná geometrie, způsob řezání a druh pohybů. Profil drsnosti povrchu je vytvářen odebráním třísky, obráběcím materiálem a nepravidelnostmi, způsobené určitou drsností povrchu nástroje, lomy částic materiálu, změny na nástroji, lomy a opotřebení nástroje, tvrdé částice třísky, které abrazivně působí na obráběný povrch. [8]

2.2 Základní ČSN EN ISO normy popisující strukturu povrchu

Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu	ČSN EN ISO 4287 01 4450
Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Pravidla a postupy pro posuzování struktury povrchu	ČSN EN ISO 4288 01 4449

Obr. 27. Normy týkající se struktury povrchu [7,8]

2.3 Základní pojmy a definice

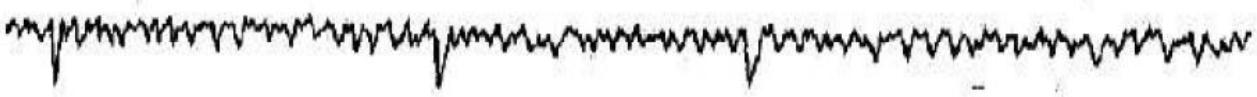


Obr. 28. Skutečný profil povrchu

Jako struktura se rozumí úsek geometrických úchylek povrchu (skutečného) s poměrně malou vzdáleností za sebou následujících nerovností. [8]

2.3.1 Mikronerovnost

Jde o jemnou nerovnost známou pod názvem drsnost povrchu- Je složena ze stop, které zanechává obráběcí nástroj. Např. Soustružnický nůž.



Obr. 29. Drsnost povrchu (jemná nerovnost) [8]

2.3.2 Makronerovnost

Je to rozlehlejší nerovnost známá taky pod názvem vlnitost povrchu. Které jsou způsobeny hlavně vibrací soustavy Stroj- Nástroj- Obrobek- Prostředí [8]

Obr. 30. Vlnitost povrchu [8]

2.3.3 Tvar

Základní obecný tvar povrchu po vyloučení drsnosti a vlnitosti (Jmenované úchylky mohou být způsobeny špatnou přímostí a kalibrací vodících ploch obráběcího stroje, nedostatečnou tuhostí soustavy obráběcího stroje nebo teplem vzniklým během výrobního procesu, při které může docházet k částečné nebo úplné deformaci obráběných ploch). [8]

Obr. 31. Obecný tvar povrchu [8]

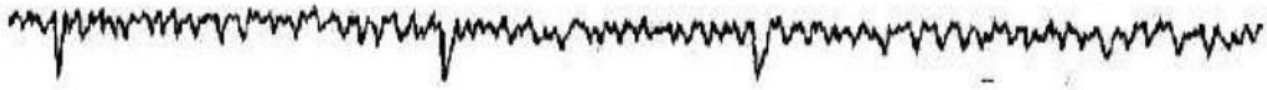
2.3.4 Vlnitost povrchu

Je část textury povrchu, na které se nachází drsnost. To může být zapříčiněno nežádoucími účinky jako je např. Chvění soustavy, zpevněním materiálu, deformací obrobku (v technické praxi je považována za vliv stroje, např. Nevyvážeností brousících kotoučů, nepřesností vodících částí obráběcího stroje nebo také malou tuhostí soustavy obráběcího stroje). [8]

Obr. 32. Vlnitost povrchu [8]

2.3.5 Drsnost povrchu

Jsou popsány jako nepravidelnosti, které jsou důsledkem výrobních procesů (je to výsledek vzájemně relativního pohybu vykonávaný mezi obrobkem a nástrojem). Mimo jiné je povrch ovlivněn hlavně mechanizmem tvoření třísky, což se projeví např. Vytrháváním částic materiálu a to ovlivní náhodný charakter povrchu. [8]



Obr. 33. Drsnost povrchu [8]

2.4 Definice parametrů nerovností profilu

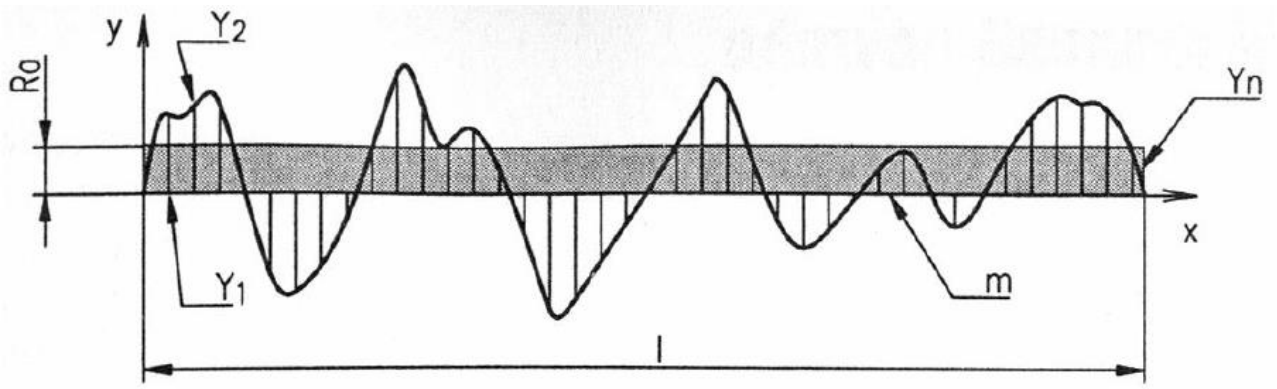
Parametry profilu nerovnosti se dělí na:

- **Amplitudové**
- **Frekvenční parametry**
- **Hybridní parametry**

2.4.1 Parametry výškové (prohlubně a výstupky)

2.4.1.1 Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu Ra (µm)

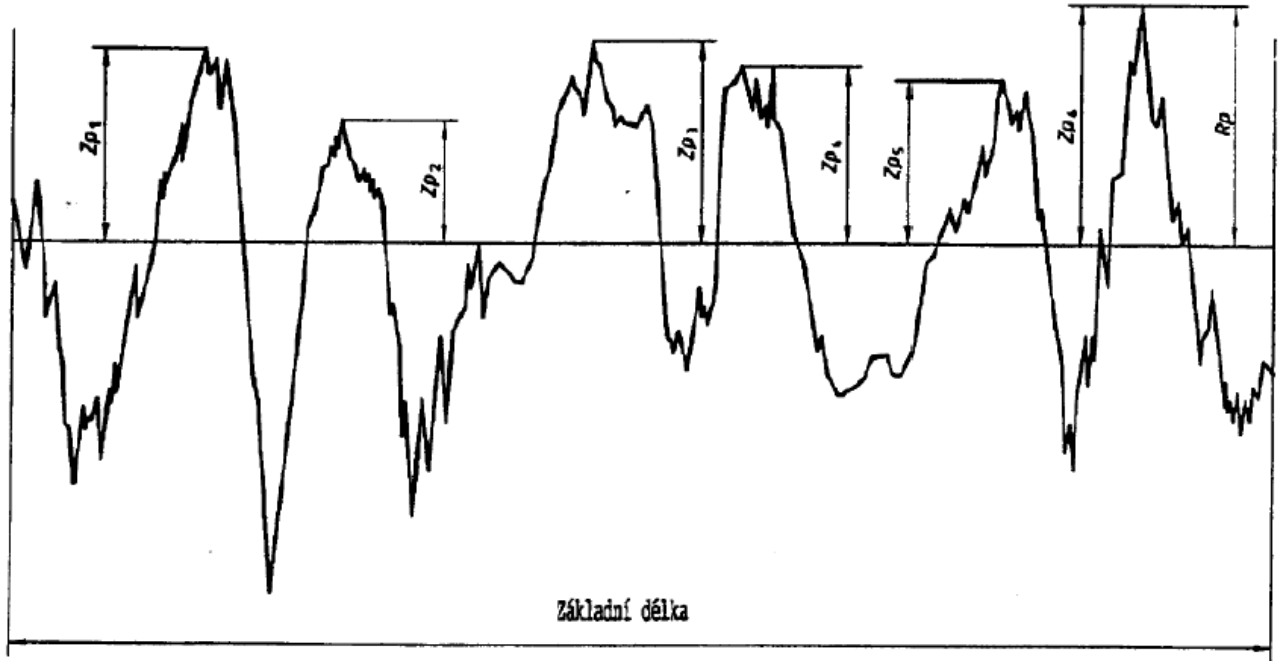
Ra- Průměrná aritmetická hodnota posuzovaného profilu je aritmetický průměr absolutních hodnot úchylek profilu v rozsahu základní délky [µm]. [8]



Obr. 34. Posuzování drsnosti povrchu Ra

2.4.1.2 Nejvyšší výška výstupku profilu, P_p, R_p, W_p:

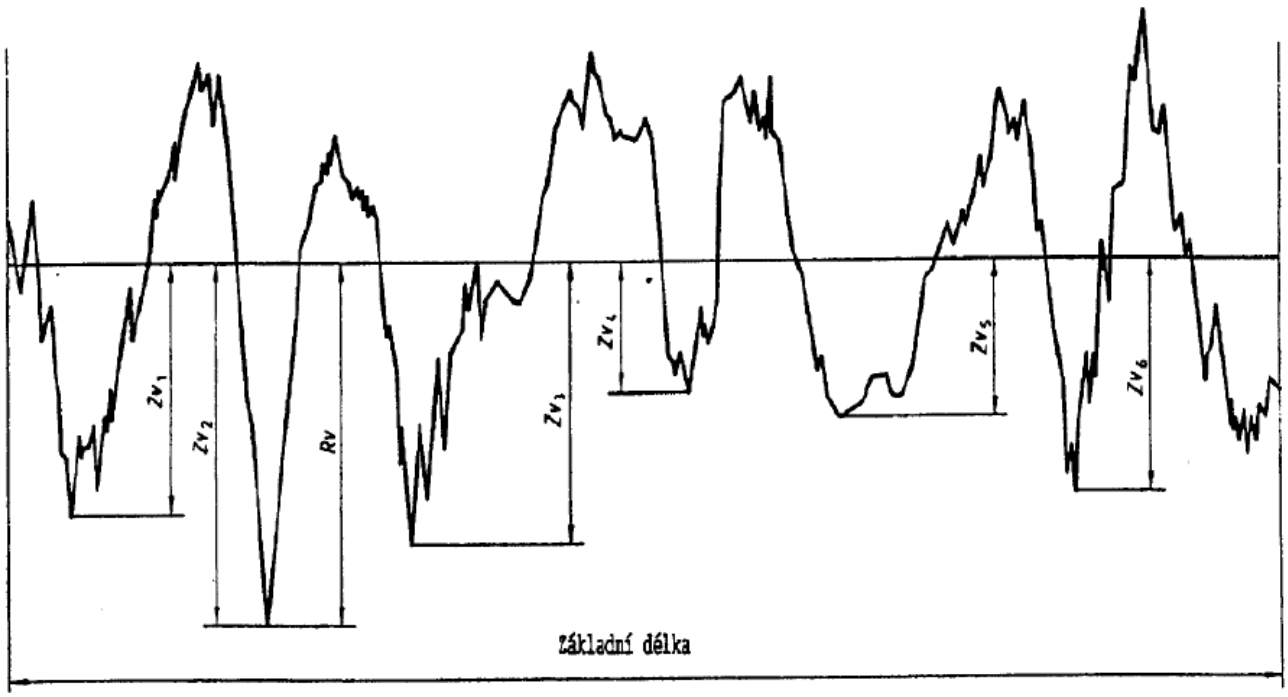
Jedná se o výšku Z_p nejvyššího výstupku profilu v rozsahu základní délky. [7]



Obr. 35. Nejvyšší výška výstupku profilu [7]

2.4.1.3 Největší hloubka prohlubně profilu P_V, R_V, W_V:

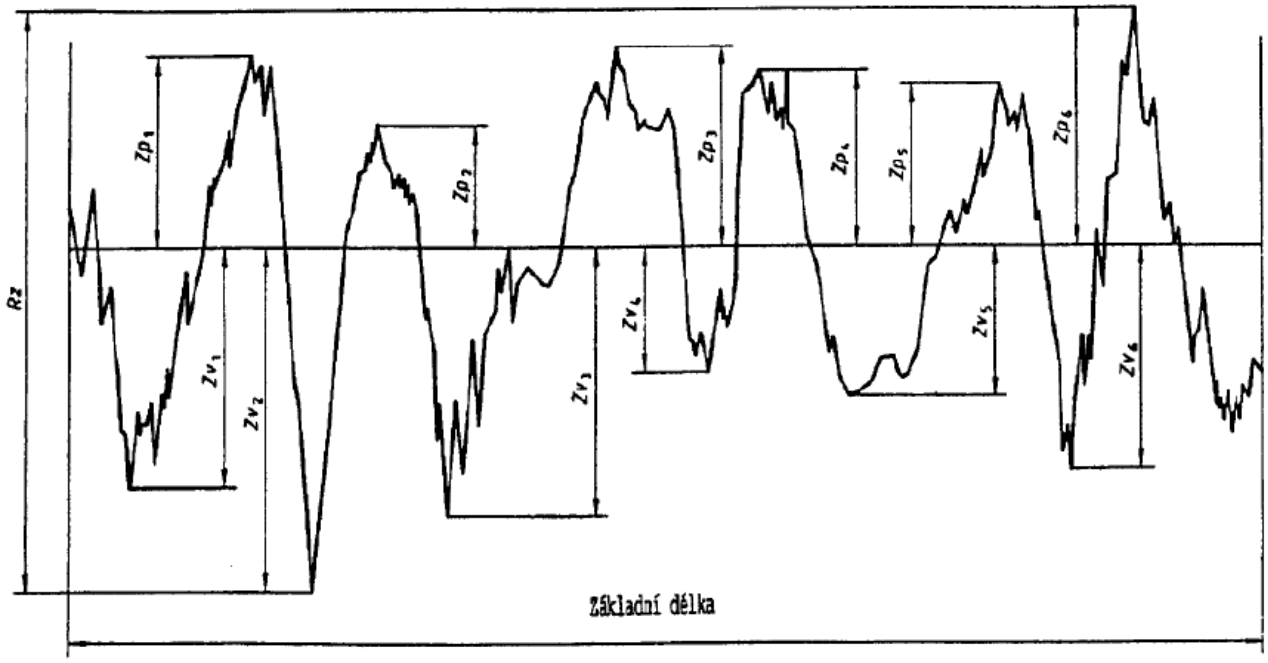
Jedná se o hloubku Zv prohlubně která je nejnižší na měřeném profilu v rozsahu základní délky. [7]



Obr. 36. Největší hloubka prohlubně profilu [7]

2.4.1.4 Největší výška profilu P_z, R_z, W_z:

Jedná se o součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v prohlubně která je nejnižší na vyhodnocovaném profilu v celém rozsahu základní délky. [7]

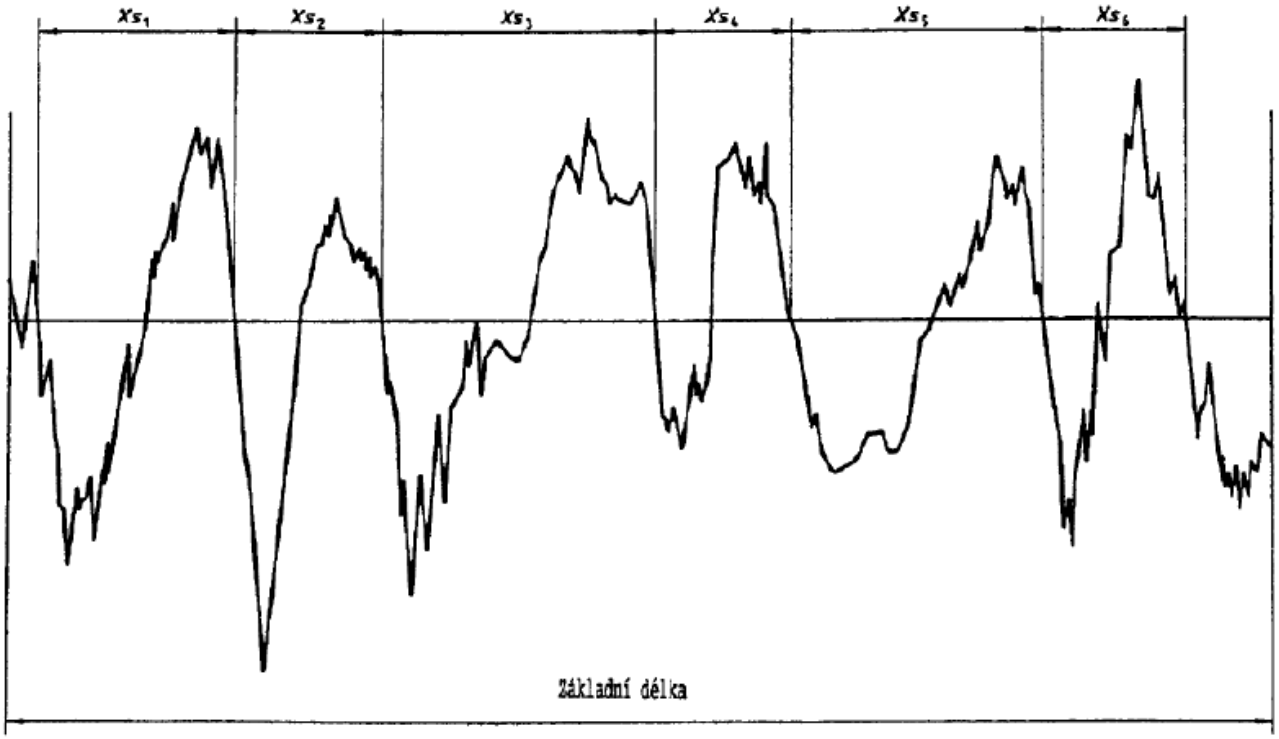


Obr. 37. Největší výška profilu [7]

2.4.2 Délkové parametry

2.4.2.1 Průměrná šířka prvků profilu Rsm

Parametr, který se nazývá jako frekvenční a je to aritmetický průměr šířek X_S prvků profilu v celém rozsahu základní délky. [8]



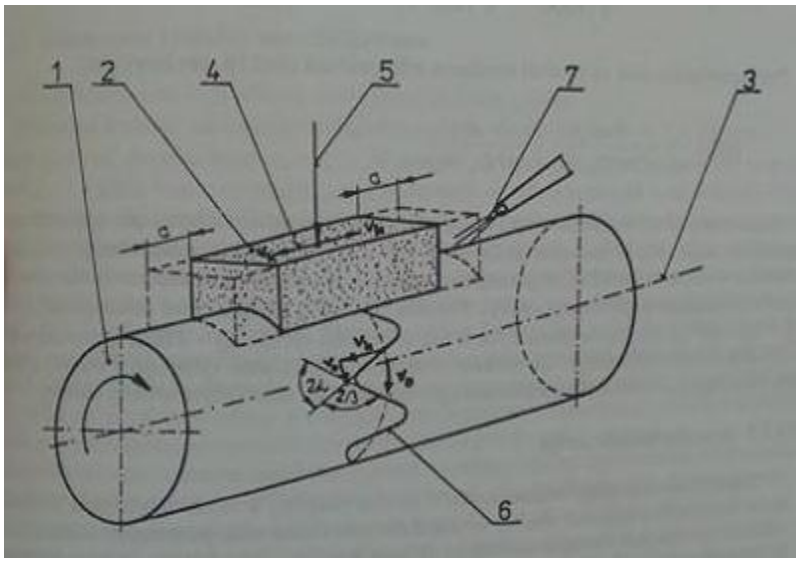
Obr. 38. Šířka prvku profilu [7]

3 TEORETICKÉ ZÁVISLOSTI PARAMETRŮ DRSNOSTI POVRCHU PO APLIKACI DOKONČOVACÍCH METOD OBRÁBĚNÍ

3.1 Kinematika superfinišování

Popišme si a vysvětleme si kinematické poměry superfinišovaní jen při kmitavém pohybu nástroje, který je základní a rotačním pohybu obrobku. Tento případ nastane při aplikaci hrotového zápichového superfinišování. Kinematické poměry v sobě zahrnují otázky tvaru dráhy vybraného hrotu nástroje (použitého superfinišovacího zrna), jeho geometrických charakteristik (úhlu dráhy s vybranými směry) i jeho kinematických veličin (frekvencí a rychlostí amplitud) pohybů při superfinišování. [10]

S ohledem na vybraný rozebíraný způsob superfinišování (zápichovém hrotovém superfinišování), tvar dráhy řezného pohybu má sinusoidou tvar vyznačený na obrázku. Ve směru kmitavého pohybu nástroje svírá úhel α, se směrem otáčivého pohybu svírá úhel β. [10]



Obr. 39. Přehledný princiup superfinišování [10]
1-Obrobek, 2- nástroj (superfinišovací kámen), 3- Osa otáčení obrobku, 4- Oscilační pohyb, 5- Přítlak superfinišovacího kamene, 6- Stopa po jednom brusném zrnu, 7- Vyplachovací kapalina

Výsledná rychlost kmitavého pohybu nástroje je:

$$v_s = \frac{4av}{1000} = \frac{4Av}{1000} \quad (\mathrm{m.min^{-1}})$$

Kde α značí amplitudu základního kmitavého pohybu (mm)

ν značí frekvenci základního kmitavého pohybu (min^{-1})

A značí dvojnásobnou amplitudu základního kmitavého pohybu (mm) [10]

Výsledná obvodová rychlost obrobku bude:

$$v_n = \frac{\pi D_w n_w}{1000} \quad (m.min^{-1})$$

Kdy D_w značí průměr superfinišovaného obrobku (mm)

n_w značí frekvenci otáčení superfinišovaného obrobku (min^{-1})

Při aplikaci superfinišování je komplikované poznat, zda li je hlavní pohyb kmitavý pohyb nástroje nebo pohyb otáčení obrobku, nebo můžeme pracovat i s vs > vw a taky vs < vw, proto budeme při superfinišování charakterizovat výslednou řeznou rychlostí v_e.

$$v_e = \sqrt{v_n^2 + v_w^2} = \sqrt{\left(\frac{2Av}{1000}\right)^2 + \left(\frac{\pi D_w n_w}{1000}\right)^2} = \sqrt{\frac{4A^2v^2 + \pi^2 D_w^2 n_w^2}{1000}} \quad (m.min^{-1}),$$

Při aplikaci superfinišování se jako úhel křížení stop pokládá úhel 2β, pro který platí:

$$tg\beta = \frac{v_s}{v_n} = \frac{4 . a . v}{\pi . D_w . n_w} = \frac{4 . A . v}{\pi . D_w . n_w}$$

Úhel křížení stop po aplikaci superfinišování je důležitý pro samostatný proces superfinišování. Jestli, že je tento úhel nepatrně malý (2β<15°), převládá zaleštění vrcholů a dochází k výraznému snížení fyzikálních parametrů obrobené plochy. Jestli, že je úhel 2β=20-60° převládá dokončování povrchu, při úhlu 2β=60-90° nastává hrubování plochy. Jestli, že nastane že bude úhel křížení stop vetší 2β>120°, převládá tzv. superfinišování volným zrnem a dojde ke snížení geometrických parametrů opracované plochy. [10]

3.2 Výsledky dosahované při aplikaci superfinišování

Při aplikaci superfinišování se používají následující veličiny s danými hodnotami:

Průměrná rychlost kmitavého (základního) pohybu nástroje bývá v_s=7-30 $m.min^{-1}$, průměrná obvodová rychlost obrobku je v rozmezí v_w=16-32 $m.min^{-1}$. Tlak superfinišovacích kamenů bývá volena v rozmezí 0,3-1,6 MPa. Proces superfinišování je velmi krátký 6-60 sekund. Přídavek na opracování je volen v rozmezí 3 až 10 μm. Úběr materiálu při superfinišování se nedá nastavit jako

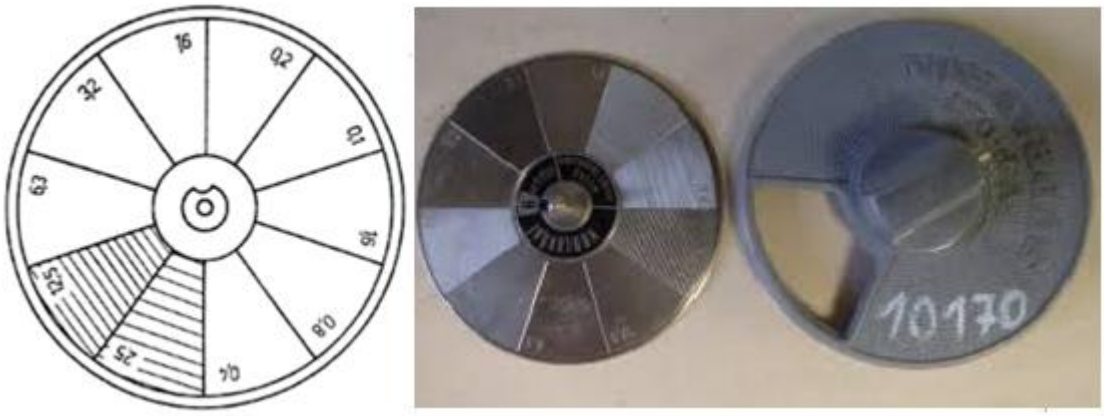
při klasickém broušení. Nastavuje se řezná síla. Úběr odebraného materiálu se musí vypočítat. V prvních okamžicích superfinišování se superfinišovací kámen zaběhává, to může trvat několik málo sekund, po této době úběr materiálu roste. V těchto okamžicích, kdy je superfinišovací kámen zaběhnut (přibližně při 2 sekundách) je rychlost úběru materiálu největší s největším úbytkem drsnosti. Na druhou stranu dochází k největší rychlosti opotřebená superfinišovacího kamene. S přibývajícím časem úběr materiálu postupně klesá, ale nezastaví se. Úběr materiálu se stabilizuje a je konstantní. Drsnost na vstupu do procesu superfinišování by neměla být příliš velká a ani příliš malá. Obojí se jeví jako velmi nehospodárné. Jako nejvhodnější je považována drsnost povrchu v rozmezí Ra=0,3-0,4 μm. [10]

Superfinišováním lze dosáhnout drsnosti povrchu, které lze srovnávat s metodou lapování za předpokladu aplikace jemných superfinišovacích kamenů. Průměrná drsnost dosahována superfinišováním je Ra=0,08-0,12 μm. Také přesnost rozměrů a tvarů je velmi vysoká a můžeme uvažovat o stupnici přesnosti IT 1. Od předchozích operací vyžaduje superfinišování některé hodnoty, jako jsou např. hranatost atd. Superfinišování nelze řadit mezi operace, které se využívají k vylepšení nedostatků po předchozích operacích. Superfinišování vyžaduje precizní disciplínu obsluhy stroje. Superfinišování se řadí mezi nejvhodnější procesy dokončovacích obrábění. Superfinišování je vhodné na výrobu součástek jako např. součástek valivých ložisek ty není možno vyrobit jinak, než superfinišováním. [10]

4 PŘEHLED METOD MĚŘENÍ DRSNOSTI POVRCHU

V měření jakosti a převážně u měření drsnosti povrchu můžeme sledovat výrazný pokrok v posuzování a vyhodnocování vlastností povrchu. V minulosti se povrch posuzoval převážně pohledem nebo hmatem, ale tahle doba je již dávno pryč. S moderními technologiemi se do popředí dostávají moderní měřící přístroje, které dosahují velmi přesných naměřených dat a výsledků. Důležité je brát ohled na požadavky daného měření a zde je v dnešní době ve značné míře zařazována výpočetní technika, podpora PC techniky a poměrně často i forma bezkontaktního měření, např. 3D scanner atd. Z tohoto pohledu se tedy měření drsnosti povrchu dělí na formu kontaktní a bezkontaktní. Povrch je možno posuzovat kvalitativním a taky kvantitativním způsobem.[18]

Kvalitativní způsob- Je to způsob, kdy dochází k porovnání dvou ploch vůči sobě samotným. Dochází k porovnávání povrchu, u kterého dochází ke zjištění, je-li hrubší nebo jemnější než povrch na vzorkovnici, jehož drsnost povrchu je již známá. Je tedy možné zjistit, zda se drsnost povrchu porovnávaného pohybuje v určitých mezích např. od 0,8 až 1,6 μm. U této metody lze porovnávat pouze povrchy, které byly zhotoveny shodnou metodou obrábění jako povrch na vzorkovnici. K porovnání se tedy používá tzv. vzorkovnice drsnosti povrchu, na které jsou plochy obrobeny odlišnými způsoby opracování a tedy s různou stupnicí drsnosti. [17]



Obr. 40. Schéma vzorkovnice drsnosti [17]

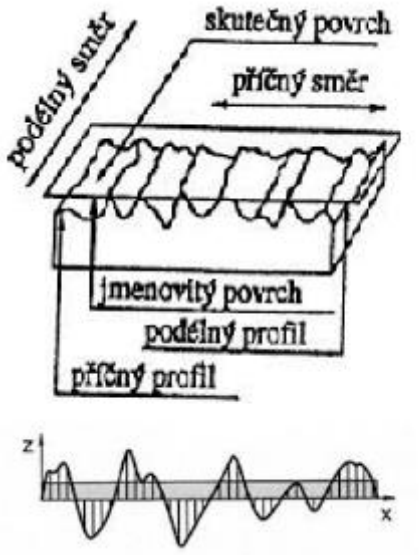
Kvantitativní způsob- U tohoto principu měření drsnosti se drsnost povrchu vyjadřuje číselně a to v určitých parametrech jako jsou např. Ra, Rz atd. Při tomto způsobu měření drsnosti povrchu se měří převážně za pomocí přístrojů, které posléze vyhodnocují dané odchylky od nulové hodnoty. Může se tedy říct, že u kvantitativního způsobu měření drsnosti povrchu ploch, je získaným výsledkem soubor odchylek povrchu od nulové hodnoty komparátoru. Tyto přístroje jsou v různých

provedeních s různými způsoby měření. Mezi takové způsoby měření řadíme např. dotykový profiloměr. [17]

Obr. 41. Schéma dotykového profiloměru [19]

4.1 Snímání jakosti povrchu kontaktním způsobem

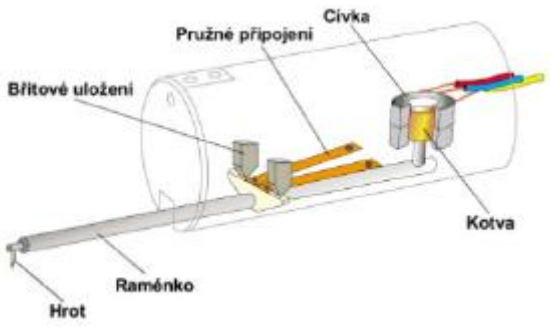
Při měření struktury požadovaného povrchu nachází využití speciální jednoúčelové měřící přístroje tzv. profilometry, které nám umožní snímat profil měřeného povrchu. Dle potřeby vyhodnocení nasnímaných dat měřeného povrchu a možnosti přístupu k dané části plochy, se již předem volí způsob daného měření a typ přístroje, kterým bude měření prováděno. V případě vyhodnocování dat přímo přístrojem, jsou pouze omezené možnosti vyhodnocení, především se zde určí pouze číselné vyhodnocení. Jestliže je přístroj připojen k počítači nabízí se možnost s naměřenými daty dále pracovat pomocí speciálního softwaru určenému k těmto operacím. Softwary jsou naprogramovány a přímo jednoúčelově vyčleněny k využití u daného přístroje. Pracuje se tak s naměřenými výsledky a minimalizují tím vliv a chyby měření způsobené obsluhou přístroje. Tyto přístroje jsou koncipovány k vysoce přesnému a citlivému měření a vyhodnocování výsledků, a tím pádem je zde výrazně důležitý aspekt, jakým způsobem bylo měření provedeno a při jakých podmínkách. Důležité je také důkladné očištění povrchu měřené plochy a celková údržba přístroje. V dnešní době se jako nejčastější metoda používá dotyková metoda je to tzv. profilová metoda zobrazená na obrázku č. 41. [19]



Obr. 42. Princip profilové metody [20]

Jako snímač je profilometr. Základní prvek profilometru je diamantový hrot. Nejdůležitějším geometrickým parametrem hrotu je kulové zakončení na špičce a jeho vrcholový úhel.Tato metoda spočívá v posuvu hrotu měřícího přístroje po měřeném povrchu. Mechanický signál, jenž je přenesen na měřící hrot, je indukčně převáděn na signál elektrický. Jako konečný výstup této metody je digitalizovaný profil povrchu s jediným řezem povrchu, který byl kontrolován. Profil se dále vyhodnocuje pomocí normalizovaných i nenormalizovaných parametrů. Profilometr nebo naprogramovaný software vyhodnocuje naměřená data. Nepřesnosti vzniklé při kontaktním měření jsou způsobeny nepřesným pohybem dotykového hrotu. Z tohoto důvodu musí být pohyb po měřeném povrchu pohybovým dotykem přesný, a to z důvodu rovnoměrnosti a také přímosti. [20]

Dotykový hrot se pohybuje po měřeném povrchu ve dvou polohách. V první poloze dotyk snímá povrch a ten měří drsnost a druhá poloha je zpětná. Ve zpětné fázi se dotyk vrací do nulové pozice, která je dána výrobcem přístroje. [20]



Obr. 43. Schéma dotykového drsnoměru [21]

U kontaktního měření může být několik nevýhod. Mezi běžné chyby se při tomto měření řadí např. chyba, že dotyk ve fázi snímání povrchu je špatně nakloněn, a tak se po povrchu posunuje i rameno nebo okolí, ve kterém je upevněn diamantový hrot a měření není správné. Při tomto snímání se povrch materiálu může poškrábat a dochází k jeho znehodnocení. Z těchto zmíněných důvodů se tedy používají dokonalejší přístroje, a to např. bezdotykové a, nebo také CNC přístroje používané k měření drsnosti povrchu. Poměrně často se ve výrobních fázích výrobku využívá automatických a poloautomatických CNC strojů. Neméně často je tomu tak i v metrologii, kde se rovněž využívá CNC přístrojů s možností naprogramování měřících cyklů. Tím dochází ke zdokonalování a zpřesnění měření. Z tohoto důvodu je vyřazena jakákoliv nesrovnatelnost, ohledně snímání povrchu jinou částí než diamantovým dotykem. Pro přesné polohování je stroj vybaven tzv. posuvným stolem, který koná pohyb ve dvou osách a to ve směru osy X a osy Y. Nástroj se k měřené ploše pohybuje pomocí třetí osy a to je osa Z. U přístrojů které jsou vybaveny α-osou, je možné provádět kontinuální měření na vodorovných a šikmých plochách motoricky nakláněnou posuvovou jednotkou. [22]

4.2 Snímání jakosti povrchu bezkontaktním způsobem

Mezi důležité aspekty v zavádění měření optickými přístroji je situace, kdy není možno použít dotykového snímání povrchu. Mezi tyto povrchy se řadí technické povrchy některých nových konstrukčních materiálů, jako jsou např. součásti paměťových zařízení, soustavy mikro rozměrných čoček apod. [23]

Mezi základní přednosti bezdotykového způsobu měřená je vyloučení jakéhokoliv poškození povrchu během měření a je zde docíleno daleko přesnějších výsledků. Mezi další významné přednosti jsou považovány potenciální možnosti, kdy je operátor téměř okamžitě schopen poskytovat naměřené výsledky. V závislosti na požadavcích vyhodnocování daného povrchu, je zde možnost zařazení tzv. integrálnosti, což nám umožňuje poskytnout vyhodnocení získaných informací o povrchu buď menší, nebo také větší plochy povrchu. [24]

Jako značnou nevýhodu bezdotykového měření je poměrně vysoká cena přístroje a samotného softwaru. V případě, že se paprsek neodrazí do detektoru správně, nemusí se měřená data zaznamenat. S tímto problémem se můžeme setkat u náhle měřených míst na profilu nebo v hraničních oblastech. Ztráta dat může být způsobena i velmi vysokou nebo také nízkou odrazivostí povrchu. [24]

Obr. 44. Bezdotykový profiloměr

Princip bezkontaktního měření spočívá v tom, že na místo diamantového hrotu je použit světelný paprsek, který je odražen případně rozptýlen na měřeném povrchu. [20]

Výsledek měření je ovlivněn hloubkou vniknutí světelného paprsku. V závislosti na součiniteli absorpce měřeného materiálu a tato hloubka se mění. Měření mohou také ovlivnit vlastnosti měřeného materiálu. Mezi kritická místa jsou zařazeny také sklony (úhly) textury, neboť v těchto místech může dojít k různé odrazivosti. [20]

Pro hloubku **z** je intenzita **E(z)** vyjádřena vztahem: $E(z) = E_0 \exp(-\alpha 2)$

Kde α- je považována za absorpční koeficient, závislý na dopadající vlnové délce

E_0- je intenzita v dané hloubce z

Intenzita E_0 v místě dopadu na povrch je udávána jako poměr dopadajícího světla k jeho odrazu.

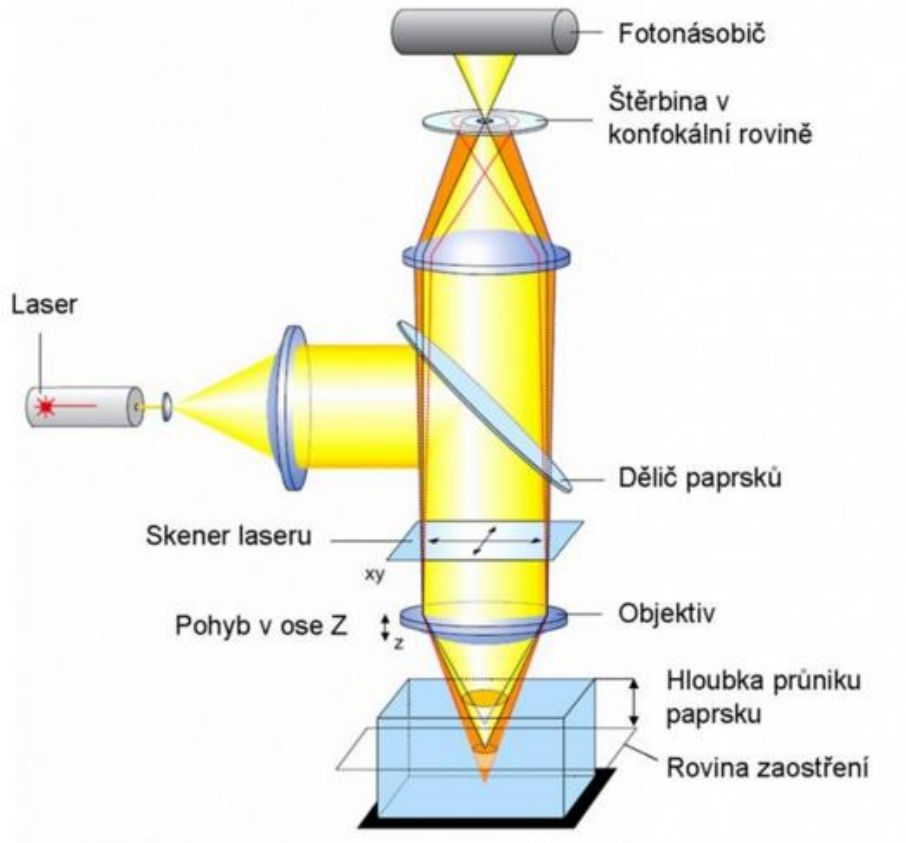
Obr. 45. Profilometr Zygo NewView 7000 [13]

U povrchů kovových je součinitel absorpce a odrazu poměrně vysoký. Pro jiné materiály, kde dopadající světlo proniká do materiálu, jsou součinitele poměrně nízké. Bezkontaktně měřících systémů je dnes již široká škála. Hlavním aspektem je potřeba a požadavky dané firmy, jakou formu měření drsnosti ploch zvolí. Tyto měřící systémy mohou pracovat na různých principech, např. optické, rastrovací, skenovaní, elektronové atd. V mnohých případech dochází ke stálému zlepšování, zdokonalování a rozšiřování koncepcí přístrojů a znázornění 3D povrchů. Pro povrchy, které není možno změřit dotykovým snímačem, se používají přístroje, které jsou vybaveny senzorem bílého světla. Zde snímač při měření získá informace o absolutní výšce pomocí rozkladu vertikálně dopadajícího bílého světla na barevné složky. Pomocí interferenčních obrazců a jejich zpracování vzniká výsledná 3D topografie měřeného povrchu. Tento princip se využívá např. u měření opticky leštěných ploch. [12]

Pro měření pevných materiálů jako jsou keramika, polymery, dřevo, zuby, kosti atd. se využívá speciální metoda tzv. konfokální laserová rastrovací mikroskopie (CLSM). Konfokální laserová rastrovací mikroskopie je optická kombinovaná zobrazovací technika, která díky vynikajícímu rozlišení, výbornému kontrastu a velkému rozsahu zvětšení přemosťuje prostor mezi elektronovou a optickou rastrovací mikroskopií bez nutnosti speciální úpravy vzorků. 3D zobrazení povrchu je dosaženo pomocí konfokálního principu a laserového paprsku, který je ve formě bodového rastrování. [13]

Obr. 46. Mikroskop Lext OLS 3000, Olympus [14]

Systém konfokální optiky je místo, které je s polohou zaostření opticky sdruženo a je zde umístěna clona, díky níž je odstraněno světlo, které přichází z míst mimo obrazovou rovinu objektivu. Následně se prostorový vzorek dělí na určité optické řezy a může snímat zaostřené doby roviny v optické ose (osa Z). Software následně vyhodnotí samotné složení optických řezů a vytvoří výškové obrazy. [14]



Obr. 47. Schéma a popis konfokálního principu [11]

2. PRAKTICKÁ ČÁST

5 APLIKACE REGRESNÍ ANALÝZY NA ZÁVISLOSTI DRSNOSTI POVRCHU A ŘEZNÝCH PARAMETRŮ

Cílem této kapitoly je výpočet regresní analýzy dle přiděleného zadání.

5.1 Zadání:

S orientací na regresní analýzu kvantifikujte u operace superfinišování závislost drsnosti povrchu R_a u válcové plochy na rychlosti rotace povrchu V_k a rychlosti kmitavého pohybu V_w.

5.2 Řešení regresní analýzy

- Při aplikaci regresní analýzy s orientací na mocninnou funkci platí:

$$R_a = C\,R_a \cdot V_k^{Xk} \cdot V_w^{Yw} \qquad (1)$$

- Součet čtverců odchylek naměřených a vypočtených hodnot:

$$S = \sum(\ln R_a - \ln C\,R_a - X_k.\ln V_k - Y_w.\ln V_w)^2 \qquad (2)$$

- Odhady parametrů $C\,R_a$, X_K, Y_W v rovnici č. (2) se vypočítají z podmínky, že součet čtverců odchylek naměřených a vypočtených bude minimální, musí tedy platit:

$$\frac{\partial S}{\partial \ln C\,R_a} = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial \ln X_k} = 0$$

$$\frac{\partial S}{\partial \ln Y_w} = 0$$

- Po výpočtu derivací a patřičné úpravě:

$$n.\ln C\,R_a + X_k.(\sum \ln V_k) + Y_w.(\sum \ln V_w) = \sum \ln R_a \qquad (3)$$

$$(\sum \ln V_k).\ln C\,R_a + X_k.(\sum (\ln V_k)^2) + Y_w.(\sum (\ln V_w.\ln V_k)) = \sum (\ln R_a.\ln V_k) \qquad (4)$$

$$(\sum \ln V_w).\ln C\,R_a + X_k.(\sum (\ln V_k.\ln V_w)) + Y_w.(\sum (\ln V_w)^2) = \sum (\ln R_a.\ln V_w) \qquad (5)$$

- Po úspěšném derivování je nutno předešlé tři vztahy dosadit do příslušných determinantů. Které se následně řeší pomocí Cramerova pravidla:

Dosazení do determinantu soustavy:

$$D=\begin{bmatrix} n & \ln V_k & \ln V_w \\ \ln V_k & \ln V_k{}^2 & \ln V_w . \ln V_k \\ \ln V_w & \ln V_w . lnV_k & \ln V_w{}^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Výpočet determinantu soustavy:

$$\boldsymbol{D = \left(n . ln\, V_k^2 . ln\, V_w^2\right) + (ln\, V_k . ln\, V_w . ln\, V_k . ln\, V_w) + (ln\, V_k . ln\, V_w . ln\, V_k . ln\, V_w)}$$
$$\boldsymbol{- \left(ln\, V_w . ln\, V_w . ln\, V_k^2\right) - (ln\, V_w . ln\, V_k . ln\, V_w . ln\, V_k . n) - (ln\, V_k . ln\, V_k . ln\, V_w^2)}$$

Dosazení do determinantu D ln C R_a:

$$D \ln C\ R_a=\begin{bmatrix} \ln R_a & \ln V_k & \ln V_w \\ \ln R_a . \ln V_k & \ln V_k{}^2 & \ln V_w . \ln V_k \\ \ln R_a . \ln V_w & \ln V_w . \ln V_k & \ln V_w{}^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Výpočet determinantu D ln C R_a:

$$\boldsymbol{D\ ln\ C\ R_a = \left(ln\, R_a . ln\, V_k^2 . ln\, V_w^2\right) + (ln\, V_k . ln\, V_w . ln\, V_k . ln\, R_a . ln\, V_w)}$$
$$\boldsymbol{+ \left(\ ln\, R_a . ln\, V_k . ln\, V_w . ln\, V_k . ln\, V_w\right) - \left(ln\, V_w . ln\, V_k^2 . ln\, R_a . ln\, V_w\right)}$$
$$\boldsymbol{- (ln\, V_w . ln\, V_k . ln\, V_w . ln\, V_k . ln\, R_a) - (ln\, V_k . ln\, R_a . ln\, V_k . ln\, V_w^2)}$$

Dosazení do determinantu Dx_k:

$$Dx_k = \begin{bmatrix} n & \ln R_a & \ln V_w \\ \ln V_k & \ln R_a . \ln V_k & \ln V_w . \ln V_k \\ \ln V_w & \ln R_a . \ln V_w & \ln V_w{}^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Výpočet determinantu Dx_k:

$$\boldsymbol{DX_k = (n . ln\, R_a . ln\, V_k . ln\, V_w^2) + (ln\, R_a . ln\, V_w . ln\, V_k . ln\, V_w) + (ln\, V_k . ln\, R_a . ln\, V_w . ln\, V_w)}$$
$$\boldsymbol{- (ln\, V_w . ln\, V_w . ln\, R_a . ln\, V_k) - (ln\, V_w . ln\, V_k . ln\, R_a . ln\, V_w . n)}$$
$$\boldsymbol{- (ln\, R_a . ln\, V_k . ln\, V_w^2)}$$

Dosazení do determinantu Dy_w:

$$Dy_w = \begin{bmatrix} n & \ln V_k & \ln V_w \\ \ln V_k & \ln V_k{}^2 & \ln V_w . \ln V_k \\ \ln R_a & \ln R_a . \ln V_k & \ln R_a . \ln V_w \end{bmatrix} \quad (9)$$

Výpočet determinantu Dy_w:

$$\boldsymbol{D\,Y_w = \left(n.\ln V_k^2.\ln R_a.\ln V_w\right) + (\ln V_k.\ln V_w.\ln V_k.\ln R_a) + (\ln V_k.\ln R_a.\ln V_k.\ln V_w) - \left(\ln V_w.\ln V_k^2.\ln R_a\right) - (\ln V_w.\ln V_k.\ln R_a.\ln V_k.n) - (\ln V_k.\ln V_k.\ln R_a.\ln V_w)}$$

- Po výpočtu příslušných determinantů následuje dosazení výsledků determinantů a k výpočtu odhadů parametrů

Odhad parametrů C R_a

$$C_{Ra} = e^{\frac{D_{Ra}}{D}} = e^{\frac{(\ln Ra.\ln Vk^2.\ln Vw^2)+(\ln Vk.\ln Vw.\ln Vk.\ln Ra.\ln Vw)+(\ln Ra.\ln Vk.\ln Vw.\ln Vk.\ln Vw)-}{(n.\ln Vk^2.\ln\ln Vw^2)+(\ln Vk.\ln Vw.\ln Vk.\ln Vw)+(\ln Vk.\ln Vw.\ln Vk.\ln Vw)-}}$$

$$\frac{-(\ln Vw.\ln Vk^2.\ln Ra.\ln Vw)-(\ln Vw.\ln Vk.\ln Vw.\ln Vk.\ln Ra)-(\ln Vk.\ln Ra.\ln Vk.\ln Vw^2)}{-(\ln Vw.\ln Vw.\ln Vk^2)-(\ln Vw.\ln Vk.\ln Vw.\ln Vk.n)-(\ln Vk.\ln Vk.\ln Vw^2)}$$

Odhad parametrů X_k

$$X_k = \frac{D_{Xk}}{D} = \frac{(n.\ln Ra.\ln Vk.\ln Vw^2)+(\ln Ra.\ln Vw.\ln Vk.\ln Vw)+(\ln Vk.\ln Ra.\ln Vw.\ln Vw)-}{(n.\ln Vk^2.\ln Vw^2)+(\ln Vk.\ln Vw.\ln Vk.\ln Vw)+(\ln Vk.\ln Vw.\ln Vk.\ln Vw)-}$$

$$\frac{-(\ln Vw.\ln Vw.\ln Ra.\ln Vk)-(\ln Vw.\ln Vk.\ln Ra.\ln Vw.n)-(\ln Ra.\ln Vk.\ln Vw^2)}{-(\ln Vw.\ln Vw.\ln Vk^2)-(\ln Vw.\ln Vk.\ln Vw.\ln Vk.n)-(\ln Vk.\ln Vk.\ln Vw^2)}$$

Odhad parametrů Y_w

$$Y_w = \frac{Dy_w}{D} = \frac{(n.\ln Vk^2.\ln Ra.\ln Vw)+(\ln Vk.\ln Vw.\ln Vk.\ln Ra)+(\ln Vk.\ln Ra.\ln Vk.\ln Vw)-}{(n.\ln Vk^2.\ln Vw^2)+(\ln Vk.\ln Vw.\ln Vk.\ln Vw)+(\ln Vk.\ln Vw.\ln Vk.\ln Vw)-}$$

$$\frac{-(\ln Vw.\ln Vk^2.\ln Ra)-(\ln Vw.\ln Vk.\ln Ra.\ln Vk.n)-(\ln Vk.\ln Vk.\ln Ra.\ln Vw)}{-(\ln Vw.\ln Vw.\ln Vk^2)-(\ln Vw.\ln Vk.\ln Vw.\ln Vk.n)-(\ln Vk.\ln Vk.\ln Vw^2)}$$

Tyto samotné výsledky regresní analýzy budou aplikovány pro praktický výpočet požadovaných parametrů.

6 METODA PROVEDENÍ EXPERIMENTU

6.1 Přesnost strojního obrábění

V technické praxi a to zejména v technologii obrábění se často naskýtá jev, že i při dodržení shodných technologických podmínek není žádný rozměr na výkrese vyrobitelný a zhotovitelný opakovaně ve shodné jmenovité velikosti a ani žádné výrobní zařízení neumožňuje trvale vyrábět danou veličinu absolutně stejných rozměrů. Proto je nutno v technické praxi tyto nepřesnosti brát na zřetel předem a předepisovat meze formou příslušných tolerancí. A to tak aby vyrobený díl mohl splňovat požadavky určené k jeho funkci. [1]

Nepřesnosti vzniklé při obrábění mohou být způsobeny mnoha vlivy a vzniklé odchylky můžeme brát v podstatě jako chyby vzniklé při výrobě, které s ohledem na jejich původ můžeme dělit jako výrobní chyby: [1]

- Chyby systematické
- Chyby náhodné

U výrobních chyb jmenované jako systematické chyby je možno zjištění původu jejich vzniku, protože se řídí přesnými a danými pravidly.

U výrobních chyb spadající mezi náhodné chyby je důležitá znalost zákona, kterému chyby náhodné podléhají a kterými se tento zákon řídí. Znalost tohoto zákona je možno použít k odlišení chyb systematických a chyb náhodných. [1]

Pojmem „zákon rozdělení“ je nutno pochopit znalost všech důležitých hodnot, které může náhodná veličina nabývat, včetně pravděpodobnosti, se kterou každé možné hodnoty nabývá. Obecně známe celou škálu rozdělení, ale všechna nejsou vhodná k aplikaci hodnocení přesnosti a jakosti výrobního zařízení. Pro strojírenskou technologii jsou nejčastěji aplikovaná tyto rozdělení: [1]

- Alternativní rozdělení
- Binomické rozdělení
- Poissonovo rozdělení
- Rovnoměrné rozdělení
- K – rozdělení
- Normální rozdělení

- Normované normální rozdělení

6.2 Normální rozdělení

Jedním z nejdůležitějších rozdělení pro tuto práci je rozdělení normální. To je rozdělení spojité s náhodnou veličinou x̄ s hustotou dané pravděpodobnosti: [1]

$$f_{(x)}= \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} . \exp\left[-\frac{(xi-\bar{x})^2}{2s^2}\right]$$

Pro interval $-\infty < x < +\infty$ a $s > 0$

Výpočet střední hodnoty:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} xi$$

Po úpravě:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} xi \;\; ni$$

Výpočet rozptylu:

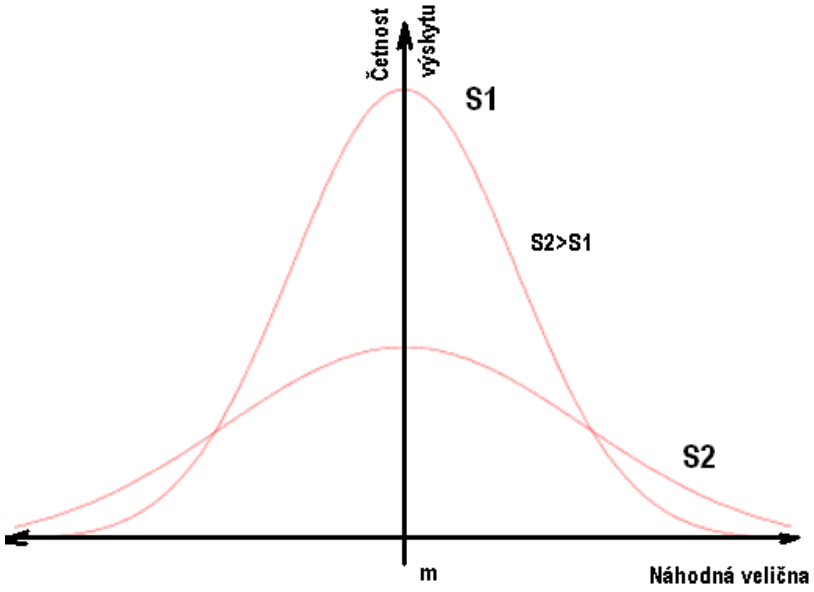
$$s^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(xi - \bar{x})^2$$

Po úpravě:

$$s^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} xi^2 - (\bar{x})^2$$

Výpočet směrodatné odchylky:

$$s = +\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(xi - \bar{x})^2} = +\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} xi^2 - (\bar{x})^2}$$



Obr. 48. Hustota normálního rozdělení pro různé hodnoty směrodatné odchylky

6.3 Normované normální rozdělení

Dalším důležitým rozdělením pro tuto práci je rozdělení normované normální. To je rozdělení normované spojité a náhodné veličiny $z = \frac{x - \bar{x}}{s}$ s hustotou pravděpodobnosti: [1]

$$f_{(z)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} . \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) \quad \text{nebo:} \quad \emptyset_{(z)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{\frac{z^2}{2}} dz$$

Pro: $-\infty < z < +\infty$ je rozptyl: $s^2_{(z)} = 1$

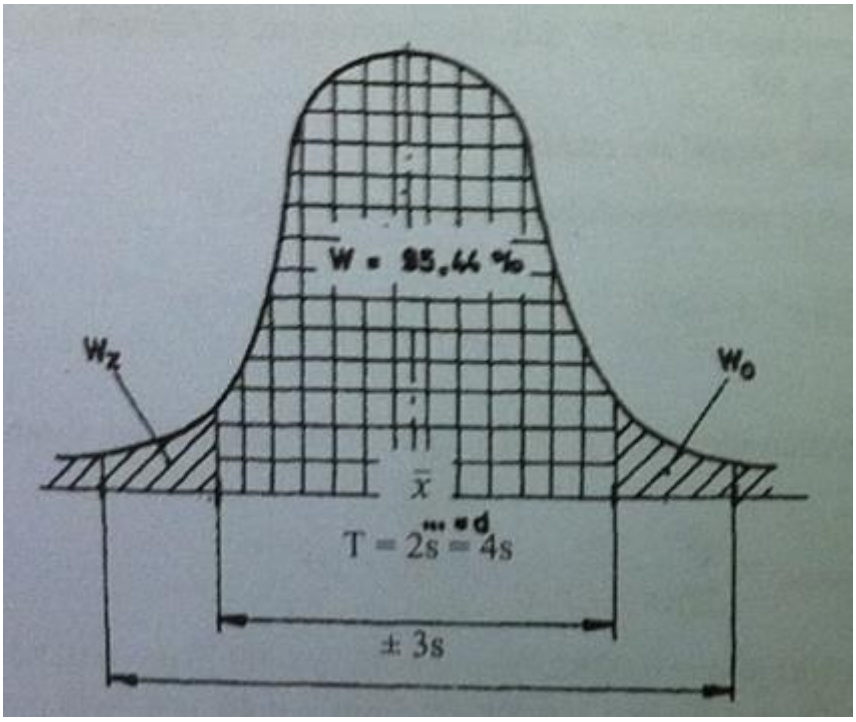
Mezi hustotou pravděpodobnosti normálního rozdělení a normovaného normálního rozdělení platí následující vztah: [1]

$$f_{(x)} = \frac{f_{(z)}}{s}$$

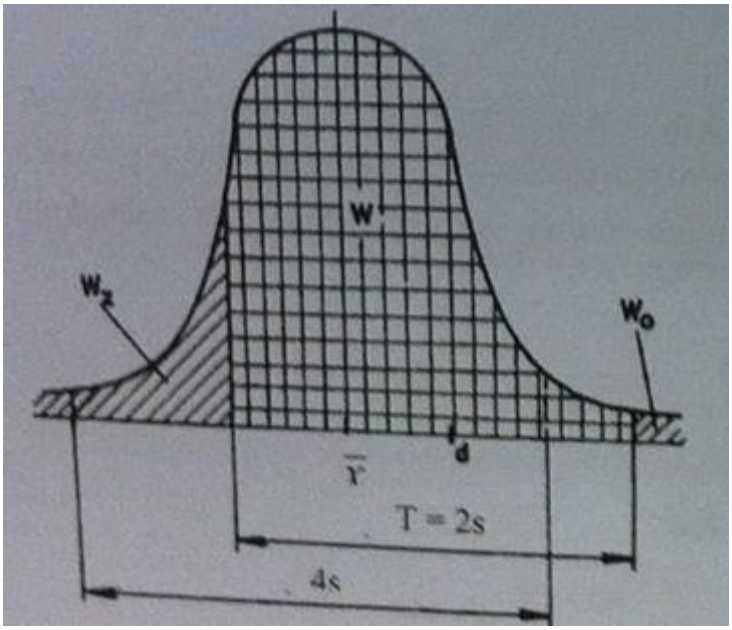
6.4 Význam parametrů $\bar{x}$ a s

Na přiloženém obr. 48 jsou zaznamenány případy možného rozdělení chyb výrobních stejného stroje při různém seřízení. Je-li určen rozměr vnější plochy a jeho tolerance T. Pro názornou ukázku budeme předpokládat, že provozní nepřesnost stroje je $L = 2\delta = 4s$, mohou nastat tři případy seřízení. [1]

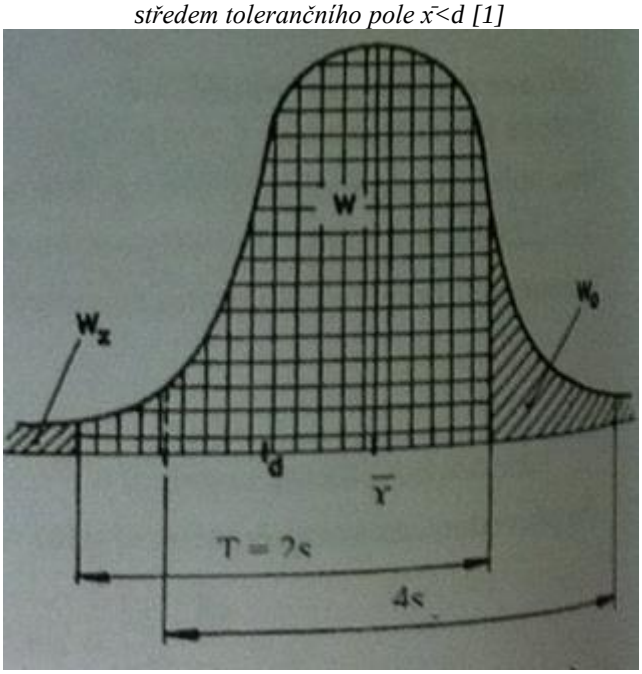
a) Při souměrné poloze tolerančního pole vzhledem ke střední hodnotě hustoty pravděpodobnosti $\bar{x}$, obr. 48, jsou výsledky z hlediska počtu dílců s rozměry mimo toleranci nejpříznivější. Je-li střední hodnota $\bar{x}$ seřízena na menší hodnotu než je samotný střed tolerančního pole, objeví se větší počet dílců s rozměry mimo toleranční pole W_Z a je-li seřízena na větší rozměr, větší počet dílců mimo toleranční pole W_O. Jde-li o rozměr vnější plochy, např. Ø hřídele, pak W_Z je určité procento neopravitelných rozměrů. [1]



Obr. 49. Rozdělení výrobních chyb při seřizování stroje na jmenovitou hodnotu $\bar{x}=d$ [1]



Obrá.50. Procento výrobních chyb při seřízení stroje pod středem tolerančního pole $\bar{x}$<d [1]



Obr. 51. Procento výrobních chyb při seřízení stroje nad středem tolerančního pole $\bar{x}$>d [1]

a) Při seřízení dle obr. 49, kdy seřízení stroje je takové, že střední hodnota hustoty pravděpodobnosti $\bar{x}$ má menší hodnotu než střední hodnota tolerance, se sníží procento dílců s rozměry v určité toleranci W, zvýší se procento dílců s neopravitelnými rozměry W_Z a sníží se procento dílců s rozměry opravitelnými W_O. Určité hodnoty W, W_O a W_Z jsou dány velikostí posunutí d- $\bar{x}$ a je tedy možné stanovit pomocí rovnice: [1]

$$f_{(z)}=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}.\exp\left(-\frac{z^2}{2}\right)$$

b) Je-li stroj seřízen tak, že střední hodnota hustoty pravděpodobnosti $\bar{x}$ bude větší než střední hodnota tolerance dle obr. 50, sníží se procento dílců s rozměry v toleranci W, zvýší se procento dílců s rozměry opravitelnými W_O a sníží se procento dílců s rozměry neopravitelnými W_Z. Určité hodnoty W, W_O a W_Z jsou opět dány velikostí posunutí $\bar{x}$-d. [1]

V praxi se otázka seřízení nástroje zpravidla hluboce podceňuje a seřízení je provedeno pouze pomocí kalibru nebo měrky. Z uvedených analýz je zřejmé, že seřízení nástroje a ověření správnosti seřízení střední hodnoty hustoty pravděpodobnosti $\bar{x}$ na střední hodnoty tolerance je nutné provádět absolutními měřidly. Zejména u číslicově řízených obráběcích strojů (NC a CNC) je žádoucí přesně zjistit skutečnou hodnotu seřízení nástroje a případnou diferenci mezi touto hodnotou a střední hodnotou tolerance je nutno opravit, např. pomocí korelačních přepínačů. [1]

Opodstatnění přesného seřízení obráběcího stroje je zejména v případě, když ve výrobě vedle náhodných vlivů působí i vlivy systematické. Rozměr, na který má být obráběcí stroj seřízen, se stanoví na základě analýzy výrobního pochodu s využitím znalosti rozložení chyb výrobních. [1]

Směrodatná odchylka charakterizuje provozní nepřesnosti stroje „L“ a je ve vztahu k předepsané velikosti tolerančního pole „T“ rozměru na obráběném dílci je definován ukazatel ekonomické přesnosti výrobního zařízení „V“: [1]

$$V = \frac{L}{T}$$

Kde:

V- Je ukazatel ekonomické přesnosti obráběcího stroje

L- Je provozní nepřesnost stroje (např. pro normální rozdělení L= 4s)

T- Je velikost tolerančního pole obráběného rozměru

a) Je-li provozní nepřesnost obráběcího stroje menší než předepsaná tolerance obráběného rozměru, tj. L<T, pak ukazatel ekonomické přesnosti V<1 a obráběcí stroj za předpokladu správného seřízení střední hodnoty $\bar{x}$ na střed tolerančního pole bude obrábět dílce v užší toleranci, než je požadováno a přesnost obráběcího stroje nebude plně využita. [1]

b) Je-li provozní nepřesnost obráběcího stroje o shodné velikosti jako ukazatel ekonomické přesnosti L=T, pak ukazatel V=1 a při správném seřízení obráběcí stroj zaručí obrobení daného rozměru v požadované toleranci. [1]

c) Je-li provozní nepřesnost obráběcího stroje větší než předepsaná tolerance L>T, pak ukazatel ekonomické přesnosti V>1 a obrábění probíhá s menší přesností, než je požadováno a obráběcí stroj nezaručí výrobu daného rozměru s požadovanou tolerancí. [1]

Obdobně jako stanovení ekonomické přesnosti obráběcího stroje z hlediska rozměrů, lze stanovit ekonomickou přesnost vzhledem k úchylkám geometrického tvaru, kde se předpokládá rozložení hustoty pravděpodobnosti pomocí rovnice: [1]

$$f_{(z)}=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}.\exp\left(-\frac{z^2}{2}\right)$$

Provozní nepřesnost je tedy dána vztahem:

$L= p_b \sqrt{b_2}$

Kde:

p_b- Je funkcí pravděpodobnosti s jakou očekáváme, že sledované úchylky nepřekročí danou hodnotu, závislé na veličině b a je dán výrazem: [1]

$$b=\frac{b_2}{b_1^2}=\frac{\sum_{i=1}^{n} y_i^2}{\left(\sum_{i=1}^{n} y_i\right)^2}.n$$

Kde:

y_i- Je naměřená úchylka tvaru

n- Je počet sledovaných hodnot

$$b_1=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i$$

$$b_2=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} {y_i}^2$$

Kde: n- Je počet měřených dílců

Podle hodnoty b se pro pravděpodobnost 0,95 v tab. 10 odečte hodnota p_b.

Tab.10. Hodnoty p_b pro výpočet provozní nepřesnosti stroje s pravděpodobností 95%.[1]

b	p_b	b	p_b	b	p_b
1,5708	1,9600	1,42	1,8236	1,26	1,6687
1,57	1,9600	1,41	1,8139	1,25	1,6590
1,56	1,9592	1,40	1,8042	1,24	1,6493
1,55	1,9550	1,39	1,7946	1,23	1,6396
1,54	1,9398	1,38	1,7849	1,22	1,6299
1,53	1,9301	1,37	1,7752	1,21	1,6202
1,52	1,9204	1,36	1,7655	1,20	1,5990
1,51	1,9108	1,35	1,7558	1,19	1,5837
1,50	1,9011	1,34	1,7461	1,18	1,5738
1,49	1,8914	1,33	1,7365	1,17	1,5579
1,48	1,8817	1,32	1,7268	1,16	1,5477
1,47	1,8720	1,31	1,7171	1,15	1,5364
1,46	1,8623	1,30	1,7074	1,14	1,5161
1,45	1,8527	1,29	1,6977	1,13	1,5051
1,44	1,8430	1,28	1,6880	1,12	1,4852
1,43	1,8333	1,27	1,6784	1,11	1,4546

6.5 Charakteristiky statistického souboru

Průměr statistického souboru

a) **Prostý aritmetický průměr** $\bar{x}$ kvantitativního znaku x je dán jeho průměrnou hodnotou: [1]

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

Kde: n- Je počet naměřených hodnot

b) **Vážený průměr**- kde každé jeho hodnotě je přidělena „četnost"- váha. [1]

$$\bar{x}_M = \frac{f_1 . x_1 + f_2 x_2 + \cdots f_n x_n}{f_1 + f_2 + \cdots f_n} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \cdot j_i$$

Kde: n- je počet intervalů (souborů)

c) **Geometrický průměr** se využívá zejména k výpočtu souborů charakteristik průměrného ročního tempa růstu průmyslové výroby a směrodatné odchylky náhodné proměnné. [1]

$$\bar{x}_G = \sqrt[n]{x_1^{f_1} . x_2^{f_2} \ldots . x_n^{f_n}}$$

Kde: n- je počet měřených hodnot

d) Harmonický průměr nachází využití když nastane situace jsou-li hodnoty znaku nerovnoměrně rozloženy kolem aritmetického průměru, nebo když jsou hodnoty extrémně nízké nebo naopak vysoké. Harmonický průměr je definován: [1]

$$\bar{x}_H = \frac{n}{\frac{1}{x_1}+\frac{1}{x_2}+\cdots+\frac{1}{x_n}} = \frac{n}{\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{x_i}}$$

Pokud nastane situace, že má hodnota x_1 četnost n_1, x_2 četnost n_2, až hodnota x_k četnost n_k, kde $n_1+n_2+\ldots+n_k = n$, pak harmonický průměr se vypočítá podle vztahu: [1]

$$\bar{x}_H = \frac{n}{\sum_{i=1}^{n}\frac{n_i}{x_i}}$$

e) Kvadratický průměr:

$$\bar{x}_H = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} n_i . x_i^2}{\sum_{i=1}^{n} n_i}}$$

f) Modus je nejčastěji se vyskytující hodnota, tj. hodnota nejvyšší četnosti náhodné proměnné (Vrchol křivky rozdělení, podle počtu jednomodální, dvoumodální,..) [1]

g) Medián je hodnota středního prvku $\bar{x}$ statistického souboru, který je uspořádán podle velikosti. Pokud nastane sudý počet prvků, tak se medián počítá jako aritmetický průměr dvou středních prvků. [1]

h) Variační koeficient V, udává se v procentech a používá se někdy k vyloučení vlivu jednotek měření a počítá se podle vzorce: [1]

$$V = 100\,\frac{s}{\bar{x}}\ [\%]$$

i) Rozptyl s^2 hodnot znaku x je součet součinu čtverců odchylek náhodně proměnné od její střední hodnoty s příslušnou pravděpodobností: [1]

$$s^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(xi - \bar{x})^2$$

j) Směrodatná odchylka náhodné proměnné je kladně vzatá druhá odmocnina ze samotného rozptylu: [1]

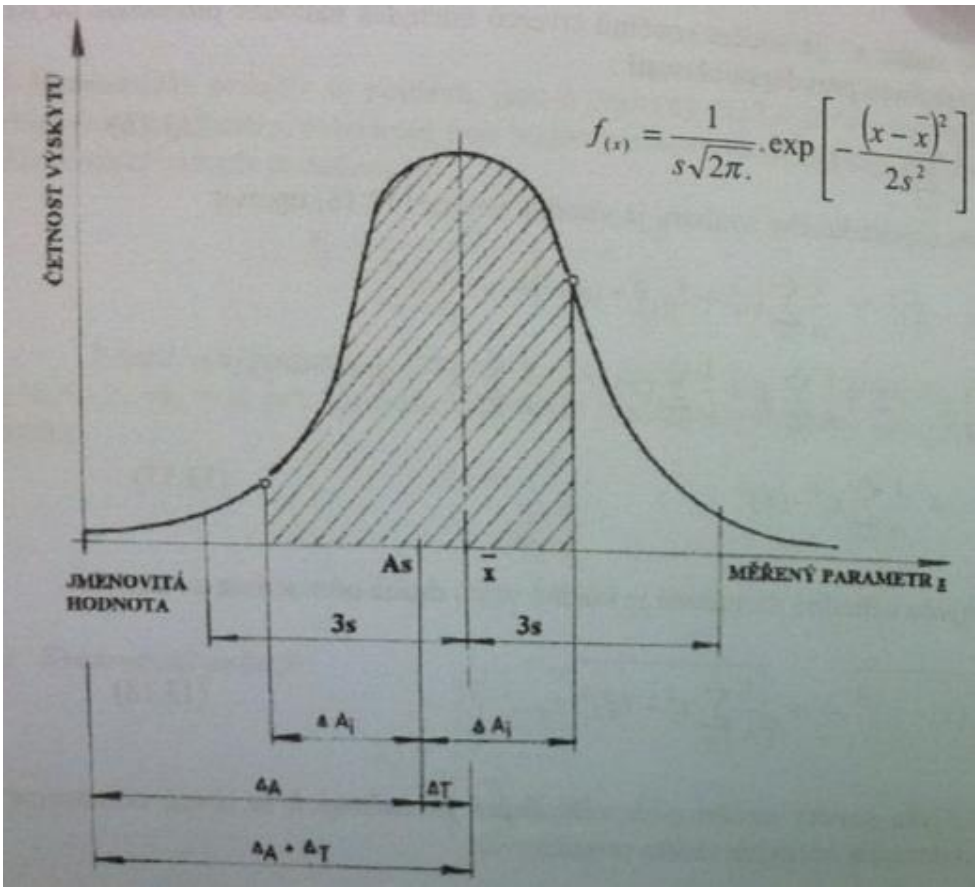
$$s = +\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(xi - \bar{x})^2} = +\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} xi^2 - (\bar{x})^2}$$

k) Součinitel poměrné asymetrie α charakterizuje nesouměrnost rozdělení vzhledem ke středu tolerančního pole, tj. určuje hodnotu posunutí středu křivky rozdělení vzhledem ke středu tolerančního pole. Např. pro rozdělení normální platí vztahy z obr. 51. [1]

$$\propto = \frac{\bar{x} - A_S}{\delta} = \frac{\Delta_r}{\delta}$$

Kde: Δ_r- Je to vzdálenost středu tolerančního pole od jmenovité hodnoty rozměru měřeného parametru

A_S- Je to souřadnice středu tolerančního pole daného členu



Obr. 52. Charakteristika součinitele α pro normální rozdělení (∆Ai=δ) [1]

Je-li křivka rozdělení souměrná ke středu tolerančního pole, je α=0 a systematická složka výrobní chyby se bude rovnat ∆A. Je-li tolerance souměrná ke jmenovitému rozměru, pak ∆A=0 a systematická složka výrobní chyby se již nevyskytuje. [1]

Pokud ukazatel ekonomické přesnosti výrobního zařízení W=1, tj. v případě, že provozní nepřesnost výroby je stejně velká jako tolerance (6s=2δ), je možné vyrábět v dovolených mezích ve shodě s přijatým procentem neshodných výrobků. Toto platí za předpokladu, že střed tolerančního

pole je ve shodě se středem křivky rozdělení. Jsou-li oba středy vzájemně posunuty o určitou hodnotu ∆ T, budou úšeky, které leží mimo oblast ±δ vyjadřovat množství součástí určitého členu, jehož rozměry přesahují meze předepsaných úchylek, tzv. neshodné výrobky (kusy). [1]

l) Normální rozdělení (tzv. Gaussovo) je charakterizováno křivkou zvonovitého charakteru. Modus náhodné proměnné se shoduje se středem seskupení. Obě větve křivky se přibližují asymptoticky k tzv. ose úseček. Křivka má dva body obratu (inflexní body), jejichž souřadnice se rovnají „+s“ a „-s“ od středu seskupování. [1]

Hustota pravděpodobnosti normálně rozdělených náhodných veličin nabývajících hodnot x v intervalu $\langle -\infty | +\infty \rangle$ je vyjádřen následujícím vztahem:

$$y = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} . \exp\left[-\frac{(xi-\bar{x})^2}{2s^2}\right]$$

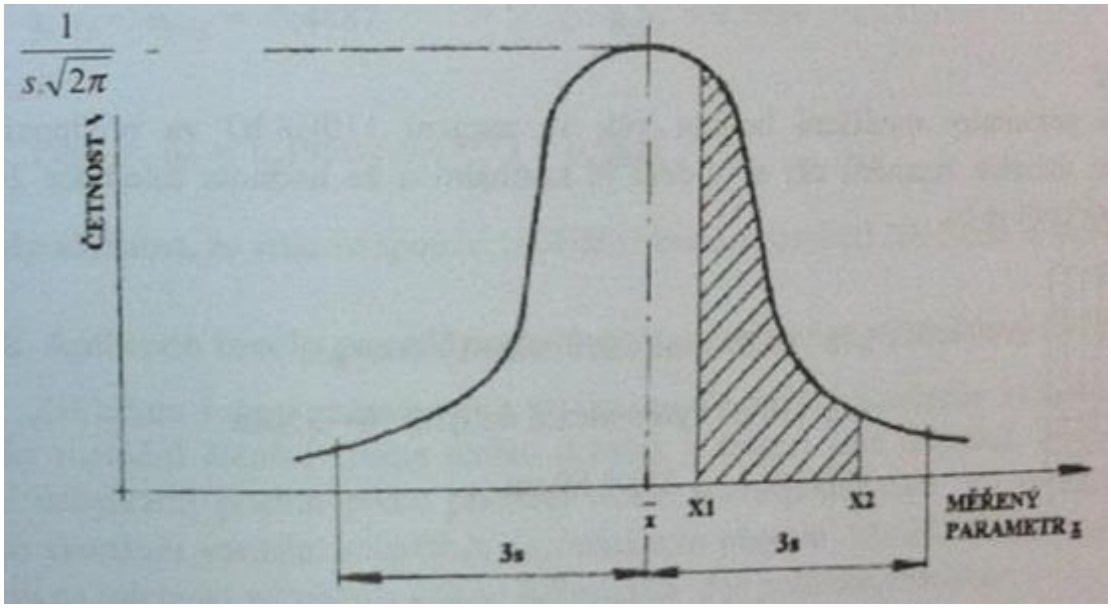
pro x=0 je $y_{MAX} = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}}$

Pravděpodobnost, že náhodná proměnná nabude hodnoty mezi x_1 a x_2 je dána obsahem obrazce rovinného:

$$P\{x_1 \leq x \leq x_2\} = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \int_{x_1}^{x_2} e^{-\frac{(x_i-\bar{x})^2}{2s^2}} dx$$

Obsah plochy ležící mezi celou křivkou rozdělení a osou úseček se rovná jedné:

$$P\{-\infty \leq x \leq \infty\} = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} dx = 1$$



Obr. 53. Normální rozdělení četnosti [1]

Zavedením substituce z = $\frac{x-\bar{x}}{s}$, převedeme vztah y = $\frac{1}{s\sqrt{2\pi}}.\exp\left[-\frac{(xi-\bar{x})^2}{2s^2}\right]$ na normované normální rozdělení, které bude mít tento tvar:

$f_{(z)}=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}.\exp\left(-\frac{z^2}{2}\right)$ nebo: $\emptyset_{(z)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_0^z e^{\frac{z^2}{2}}\,dz$

a jako takové se s použitím určité tabulky používá pro praktický výpočet hojně aplikovaný v technické praxi. [1]

Protože hustota pravděpodobnosti je symetrická okolo nuly, platí že $\emptyset_{(-Z)} = \emptyset_{(Z)}$. Z vlastnosti distribuční funkce vyplývá, že: [1]

$P\ (Z_1<Z<Z_2) = \emptyset_{(Z2)} = \emptyset_{(Z1)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_0^{z2} e^{\frac{z2^2}{2}}\,dz - \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_0^{z1} e^{\frac{z1^2}{2}}\,dz$

Normovaná náhodná veličina má normální rozdělení se střední hodnotou nabývající hodnotu 0 a rozptyl 1. Platí, že pravděpodobnost výskytu měřeného parametru je pro: [1]

± s resp. $-1 \le z \le 1$ P= 0,6827

± 2 s resp. $-2 \le z \le 2$ P= 0,9545

± 3 s resp. $-3 \le z \le 3$ P= 0,9973

7 ZPRACOVÁNÍ ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ ANALYTICKY A GRAFICKY

V tabulkách jsou uvedeny hodnoty drsnosti povrchu Ra v závislosti na rychlosti rotace povrchu Vw a rychlosti kmitavého pohybu Vk v četnosti 6 měření pro 10 různých řezných rychlostí. Měření bylo aplikováno pro 3 různé materiály obrobku a 3 různé brusné materiály.

Pro každý soubor bylo nutno vypočítat:

- Střední hodnotu Ra
- Pomocí regresní analýzy kvantifikovat závislost drsnosti povrchu Ra u válcové plochy na rychlosti rotace povrchu Vw a rychlosti kmitavého pohybu Vk s předpokládanou závislostí $R_a = C\,R_a \,.\, V_k^{\,Xk} \,.\, V_w^{\,Yw}$ (výpočet konstant „C R_a“, „X_k“, „Y_w“)
- Výběrovou směrodatnou odchylku „s“
- S pravděpodobností 95% vypočítat pro každý soubor maximální a minimální hodnotu $R_{a\,max}$ a $R_{a\,min}$
- Určit jako je pravděpodobnost, že drsnost povrchu bude u jednotlivých souborů v rozmezí zadaných hodnot pro jednotlivé časy
- Zhodnocení výsledků měření dle přehledných grafů

7.1 Naměřené hodnoty Ra na rychlosti rotace povrchu (Vw) a rychlosti kmitavého pohybu (Vk) pro materiál č.1.

Naměřené hodnoty se vztahují na materiál:

Ocel ČSN 41 4109, ISO 683/17-73

EURO 100Cr6, DIN 17230-80

S obsahem: C = 1,0 %, Mn = 0,5 %, Cr = 1,5 %, Si = 0,3 %

Jako brusivo byl použit:

Superfinišovací kámen z umělého korundu s keramickou vazbou.

Tab. 11. Naměřené hodnoty pro měření č. 1 až č. 5

Číslo měření	Číslo měření hodnoty Ra [µm]				
	1	2	3	4	5
1	0,132	0,122	0,095	0,09	0,09
2	0,128	0,118	0,11	0,088	0,084
3	0,125	0,125	0,109	0,1	0,079
4	0,125	0,118	0,12	0,09	0,089
5	0,136	0,122	0,105	0,089	0,083
6	0,134	0,115	0,103	0,089	0,091

Tab. 12. Naměřené hodnoty pro měření č. 6 až č. 10

Číslo měření	Číslo měření hodnoty Ra [µm]				
	6	7	8	9	10
1	0,08	0,06	0,048	0,04	0,022
2	0,077	0,051	0,04	0,041	0,016
3	0,072	0,05	0,039	0,035	0,018
4	0,081	0,052	0,038	0,032	0,022
5	0,072	0,049	0,045	0,036	0,02
6	0,074	0,056	0,048	0,038	0,022

Tab. 13. Vypočtená střední hodnota z 6 měření s příslušnými hodnotami Vk a Vw

Číslo měření	Ra [µm]	Vk (min^{-1})	Vw ($m.min^{-1}$)
1	0,130	42,0	39
2	0,120	40,0	40
3	0,110	35,0	40
4	0,090	25,3	38
5	0,090	22,6	34
6	0,080	12,8	32
7	0,050	10,0	30
8	0,040	8,0	30
9	0,040	6,0	28
10	0,020	3,0	28
Součet:		**204,7**	**339**

7.1.1 Výpočet jednotlivých kořenů pro danou závislost

Samotnému výpočtu regresní analýzy byla věnována kapitola č. 5 a ta nám samostatně poslouží jako návod k výpočtu jednotlivých kořenů pro předpokládanou závislost. Prvním krokem pro praktický výpočet je dosazení do příslušných determinantů, aby bylo možno do determinantů dosadit správné hodnoty je nutno provést výpočet příslušných konstant, které jsou potřeba k samotnému výpočtu dodat. Hodnoty konstant pro toto měření jsou uvedeny v tab. 14. A tab. 15.

Tab. 14. Vypočtené hodnoty a jednotlivé součty potřebné k výpočtu determinantů

Číslo měření	∑ Ln Ra	∑ ln Vw	∑ ln (vw)^2	∑ ln(Ra).ln(Vw)
1	-2,040	3,664	13,422	-7,474
2	-2,120	3,689	13,608	-7,821
3	-2,207	3,689	13,608	-8,142
4	-2,408	3,638	13,232	-8,759
5	-2,408	3,526	12,435	-8,491
6	-2,526	3,466	12,011	-8,754
7	-2,996	3,401	11,568	-10,189
8	-3,219	3,401	11,568	-10,948
9	-3,219	3,332	11,104	-10,726
10	-3,912	3,332	11,104	-13,036
Součet:	**-27,055**	**35,138**	**123,659**	**-94,341**

Tab.15. Vypočtené hodnoty a jednotlivé součty potřebné k výpočtu determinantů

Číslo měření	∑ ln Vk	∑ (ln Vk)^2	∑ ln(Vw)*ln(Vk)	∑ ln(Ra)*ln(Vk)
1	3,738	13,970	13,693	-7,626
2	3,689	13,608	13,608	-7,821
3	3,555	12,640	13,115	-7,848
4	3,231	10,438	11,752	-7,780
5	3,118	9,722	10,995	-7,508
6	2,549	6,500	8,836	-6,439
7	2,303	5,302	7,832	-6,898
8	2,079	4,324	7,073	-6,693
9	1,792	3,210	5,971	-5,767
10	1,099	1,207	3,661	-4,298
Součet:	**27,152**	**80,921**	**96,535**	**-68,678**

Prvním determinantem je determinant „D“ v kapitole č. 5 nesoucí číslo 6.

$$D=\begin{bmatrix} n & \ln V_k & \ln V_w \\ \ln V_k & \ln {V_k}^2 & \ln V_w . \ln V_k \\ \ln V_w & \ln V_w . lnV_k & \ln {V_w}^2 \end{bmatrix}$$

$$=\begin{bmatrix} 10 & 27{,}152 & 35{,}138 \\ 27{,}152 & 80{,}921 & 96{,}535 \\ 35{,}138 & 96{,}535 & 123{,}659 \end{bmatrix} = (10\,.\,80{,}921\,.\,123{,}659) + (27{,}152\,.\,96{,}535\,.\,35{,}138) +$$

$$(96{,}535\,.\,27{,}152\,.\,35{,}138) - (35{,}138\,.\,80{,}921\,.\,35{,}138) - (96{,}535\,.\,96{,}535\,.\,10) -$$

$$(27{,}152\,.\,27{,}152\,.\,123{,}659) = \mathbf{34387}$$

Následuje determinant D lnC R_a kterému v kapitole č. 5 patří číslo 7

$$D\ln C\ R_a = \begin{bmatrix} \ln R_a & \ln V_k & \ln V_w \\ \ln R_a.\ln V_k & \ln V_k{}^2 & \ln V_w.\ln V_k \\ \ln R_a.\ln V_w & \ln V_w.\ln V_k & \ln V_w{}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -27{,}055 & 27{,}152 & 35{,}138 \\ -68{,}678 & 80{,}921 & 96{,}535 \\ -94{,}341 & 96{,}535 & 123{,}659 \end{bmatrix}$$

$$= (-27{,}055\ .\ 80{,}921\ .\ 123{,}659) + \big(27{,}152\ .\ 96{,}535\ .(-94{,}341)\big)$$

$$+ \big((-68{,}678)\ .\ 96{,}535\ .\ 35{,}138\big) - \big(35{,}138\ .\ 80{,}921\ .\ (-94{,}341)\big)$$

$$- \big(96{,}535\ .\ 96{,}535\ .\ (-27{,}055)\big) - (27{,}152\ .\ (-68{,}678)\ .\ 123{,}659) = \mathbf{0{,}232}$$

Následujícím determinantem je determinant D_{Xk} kterému je v kapitole č. 5 přiřazeno číslo 8

$$\mathrm{D}x_k = \begin{bmatrix} n & \ln R_a & \ln V_w \\ \ln V_k & \ln R_a.\ln V_k & \ln V_w.\ln V_k \\ \ln V_w & \ln R_a.\ln V_w & \ln V_w{}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 & -27{,}055 & 35{,}138 \\ 27{,}152 & -68{,}678 & 96{,}535 \\ 35{,}138 & -94{,}341 & 123{,}659 \end{bmatrix} =$$

$(10\ .\ (-68{,}678).\ 123{,}659) + (96{,}535\ .\ (-27{,}055)\ .\ 35{,}138) +$

$(27{,}152\ .\ (-94{,}341)\ .\ 35{,}138) - (35{,}128\ .\ (-68{,}678)\ .\ 35{,}138) -$

$(27{,}152\ .\ (-27{,}055)\ .\ 123{,}659) - (96{,}535\ .\ (-94{,}341)\ .\ 10)$ = **30726**

Posledním determinantem v této podkapitole je determinant D_{Yw} který v kapitole č. 5 nese číslo 9

$$\mathrm{D}y_w = \begin{bmatrix} n & \ln V_k & \ln V_w \\ \ln V_k & \ln V_k{}^2 & \ln V_w.\ln V_k \\ \ln R_a & \ln R_a.\ln V_k & \ln R_a.\ln V_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 & 27{,}152 & -27{,}055 \\ 27{,}152 & 80{,}921 & -68{,}678 \\ 35{,}138 & 96{,}535 & -94{,}341 \end{bmatrix} =$$

$\big(10\ .\ 80{,}921\ .\ (-94{,}341)\big) + (27{,}152\ .\ (-68{,}678)\ .\ 35{,}138) + (27{,}152\ .\ 96{,}535\ .(-27{,}055) -$

$\big((-27{,}055)\ .\ 80{,}921\ .\ 35{,}138\big) - \big(27{,}152\ .\ 27{,}152\ .(-94{,}341)\big) - ((-68{,}678)\ .96{,}535\ .\ 10)$ =

= **-50220**

Výsledky získané výpočtem determinantů se musí dosadit do příslušných vztahů:

$$\mathrm{C\ R_a} = e^{\frac{D\ln C_{Ra}}{D}} = e^{\frac{0{,}232}{34387}} = \mathbf{1}$$

$$\mathrm{X_K} = \frac{D_{Xk}}{D} = \frac{30726}{34387} = \mathbf{0{,}894}$$

$$\mathrm{Yw} = \frac{D_{Yw}}{D} = \frac{-50220}{34387} = \mathbf{-1{,}46}$$

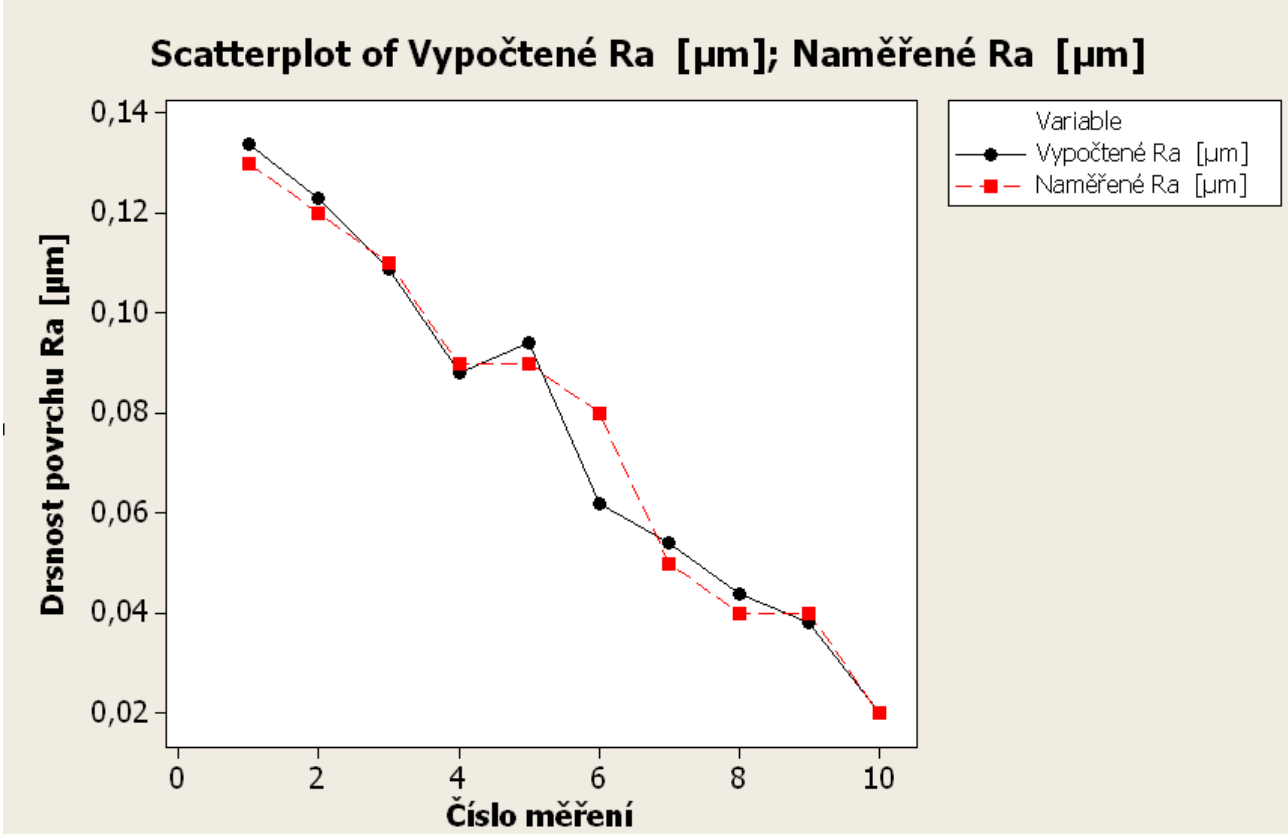
Po dosazení vypočtených kořenů C R_a, X_K, Y_w do předpokládané závislosti viz. rov. č.1 má předpokládaná závislost tvar:

$$R_a = 1\ .\ V_k{}^{0{,}894}\ .\ V_w{}^{-1{,}46}$$

Po dosazení hodnot V_k, V_W do rovnice č. 1, by mělo vyjít, že Ra vypočtené se přibližně rovná Ra naměřenému. To můžeme porovnat v přiložené tabulce č. 16.

Tab. 16. Přehled pro porovnání Ra naměřeného s Ra vypočteným

Číslo měření	Vypočtené Ra [µm]	Naměřené Ra [µm]
1	0,134	0,130
2	0,123	0,120
3	0,109	0,110
4	0,088	0,090
5	0,094	0,090
6	0,062	0,080
7	0,054	0,050
8	0,044	0,040
9	0,038	0,040
10	0,020	0,020



Obr. 54. Grafické porovnání Ra naměřené s Ra vypočteným

7.1.2 Výpočet statistiky

Aritmetický průměr

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} xi = \frac{1}{6}\sum_{i=1}^{6}(0{,}132 + 0{,}128 + 0{,}125 + 0{,}125 + 0{,}136 + 0{,}134) = \mathbf{0,130}\ \textbf{[µm]}$$

Kde: xi- naměřená hodnota

n- počet hodnot

Směrodatná odchylka

$$s = +\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(xi - \bar{x})^2} = +\sqrt{\frac{1}{6}\sum_{i=1}^{6}(0{,}132 - 0{,}130)^2 + (0{,}128 - 0{,}130)^2 + (0{,}125 - 0{,}130)^2 +}$$

$$+(0{,}125 - 0{,}130)^2 + (0{,}136 - 0{,}130)^2 + (0{,}134 - 0{,}130)^2 = \mathbf{0{,}004}\ \textbf{[µm]}$$

Kde: xi- naměřená hodnota

$\bar{x}$- aritmetický průměr

n- počet hodnot

Výpočet Ra maximální a Ra minimální s pravděpodobností 95%,

Ra max= $\bar{x}$ + 2s= 0,130 + 2. 0,004 = **0,139 µm**

Ra min= $\bar{x}$ - 2s= 0,130 - 2. 0,004 = **0,121 µm**

Kde: $\bar{x}$- aritmetický průměr

s- směrodatná odchylka

Výpočet pravděpodobnosti, že drsnost povrchu bude v rozmezí zadaných hodnot

Rozmezí hodnot pro tento výpočet je pro hodnoty $x_1 = 0{,}125$ µm a $x_2 = 0{,}136$ µm.

$$z_1 = \frac{x_1 - \bar{x}}{s} = \frac{0{,}125 - 0{,}130}{0{,}004} = \mathbf{-1{,}168}$$

$$z_2 = \frac{x_2 - \bar{x}}{s} = \frac{0{,}136 - 0{,}130}{0{,}004} = \mathbf{1{,}401}$$

Kde: $\bar{x}$- aritmetický průměr

s- směrodatná odchylka

x_1 a x_2- zvolené rozmezí hodnot pro výpočet pravděpodobnosti

Pro z_1 a z_2 odečteno z tabulek:

$Ø_{(z1=1,401)}$= **0,419**

$Ø_{(z2=-1,168)}$= **-0,377**

P=$Ø_{(z1)}$ - $Ø_{(z2)}$ = 0,419-(-0,377) = 0,7962 = **79,62%**

Pravděpodobnost, že drsnost povrchu bude v rozmezí zadaných hodnot (0,125 a 0,136 µm) je 79,62%.

Tab. 17. Souhrn statistických výpočtů pro hodnoty souborů 1 až 5

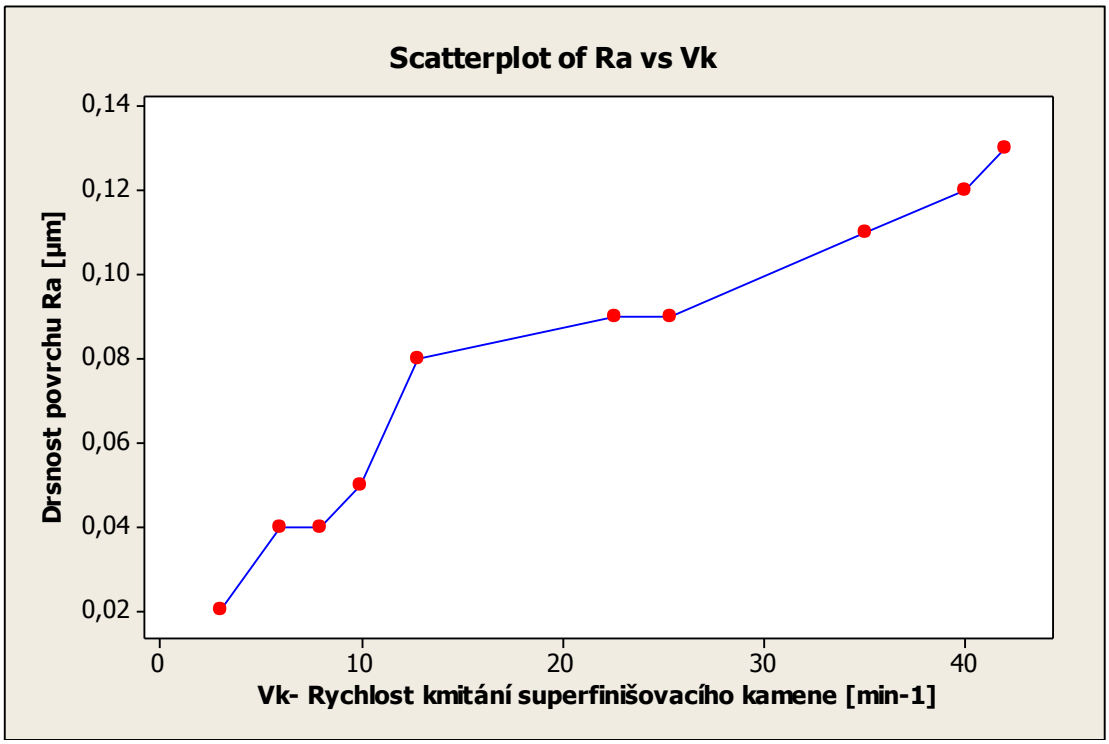
Číslo měření	Číslo měření hodnoty Ra [µm]				
	1	2	3	4	5
1	0,132	0,122	0,095	0,09	0,09
2	0,128	0,118	0,11	0,088	0,084
3	0,125	0,125	0,109	0,1	0,079
4	0,125	0,118	0,12	0,09	0,089
5	0,136	0,122	0,105	0,089	0,083
6	0,134	0,115	0,103	0,089	0,091
Průměr [µm]	0,130	0,120	0,107	0,091	0,086
Smodch [µm]	0,004	0,003	0,008	0,004	0,004
2s(+)	0,139	0,127	0,122	0,099	0,095
2s(-)	0,121	0,113	0,092	0,083	0,077
Dolní mez [µm]	0,125	0,115	0,095	0,088	0,079
Horní mez [µm]	0,136	0,125	0,120	0,100	0,091
Z1	-1,168	-1,508	-1,580	-0,735	-1,620
Z2	1,401	1,508	1,712	2,205	1,157
P1	-0,377	-0,433	-0,443	-0,267	-0,447
P2	0,419	0,433	0,456	0,486	0,364
P(%)	0,796	0,866	0,899	0,753	0,812
Pravděpodobnost (%)	79,620	86,640	89,900	75,340	81,170

Tab. 18. *Souhrn statistických výpočtů pro hodnoty souborů 6 až 10*

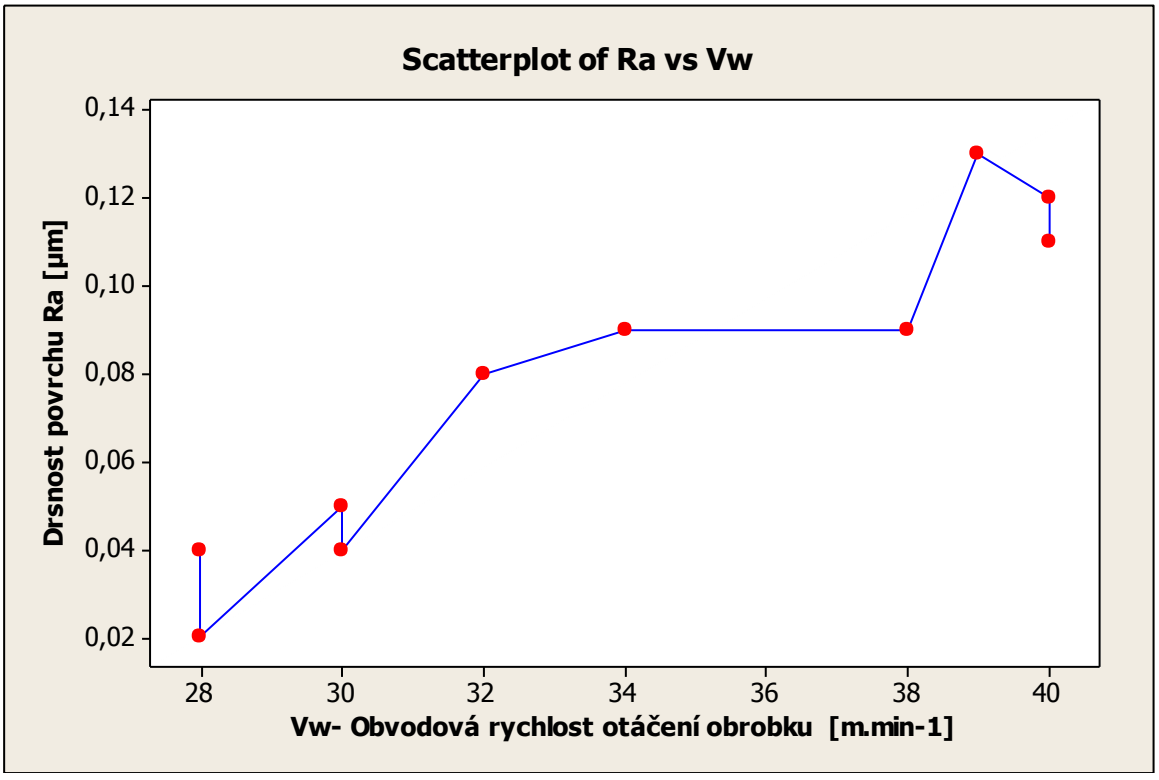
Číslo měření	Číslo měření hodnoty Ra [µm]				
	6	7	8	9	10
1	0,08	0,06	0,048	0,04	0,022
2	0,077	0,051	0,04	0,041	0,016
3	0,072	0,05	0,039	0,035	0,018
4	0,081	0,052	0,038	0,032	0,022
5	0,072	0,049	0,045	0,036	0,02
6	0,074	0,056	0,048	0,038	0,022
Průměr [µm]	0,076	0,053	0,043	0,037	0,020
Smodch [µm]	0,004	0,004	0,004	0,003	0,002
2s(+)	0,083	0,061	0,051	0,043	0,025
2s(-)	0,069	0,045	0,035	0,031	0,015
Dolní mez [µm]	0,072	0,049	0,038	0,032	0,016
Horní mez [µm]	0,081	0,060	0,048	0,041	0,022
Z1	-1,109	-1,044	-1,201	-1,637	-1,732
Z2	1,387	1,828	1,201	1,309	0,866
P1	-0,364	-0,341	-0,385	-0,445	-0,455
P2	0,419	0,464	0,385	0,403	0,316
P(%)	0,784	0,805	0,770	0,848	0,771
Pravděpodobnost (%)	78,350	80,540	76,980	84,840	77,130

7.1.3 Grafické zhodnocení získaných výsledků

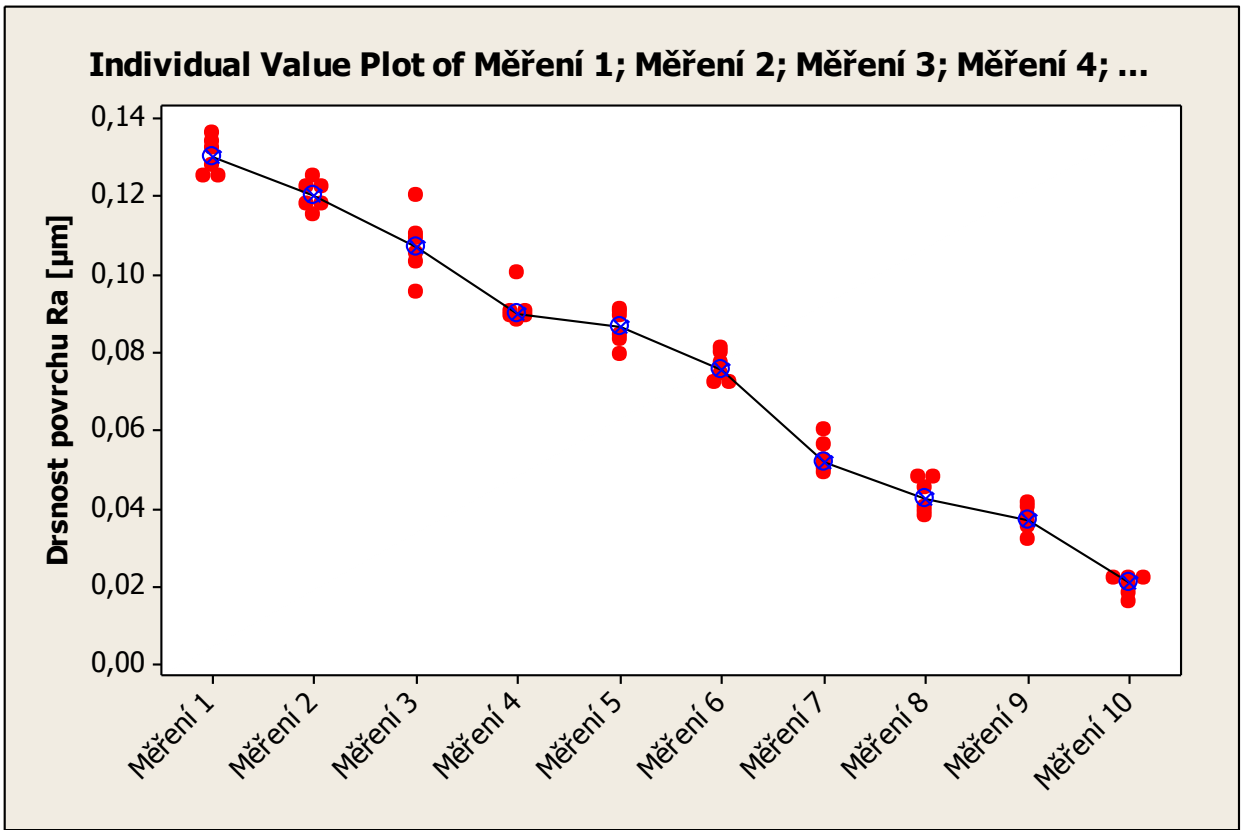
Pro grafické vyhodnocení výsledků jsem použil software minilab 16.



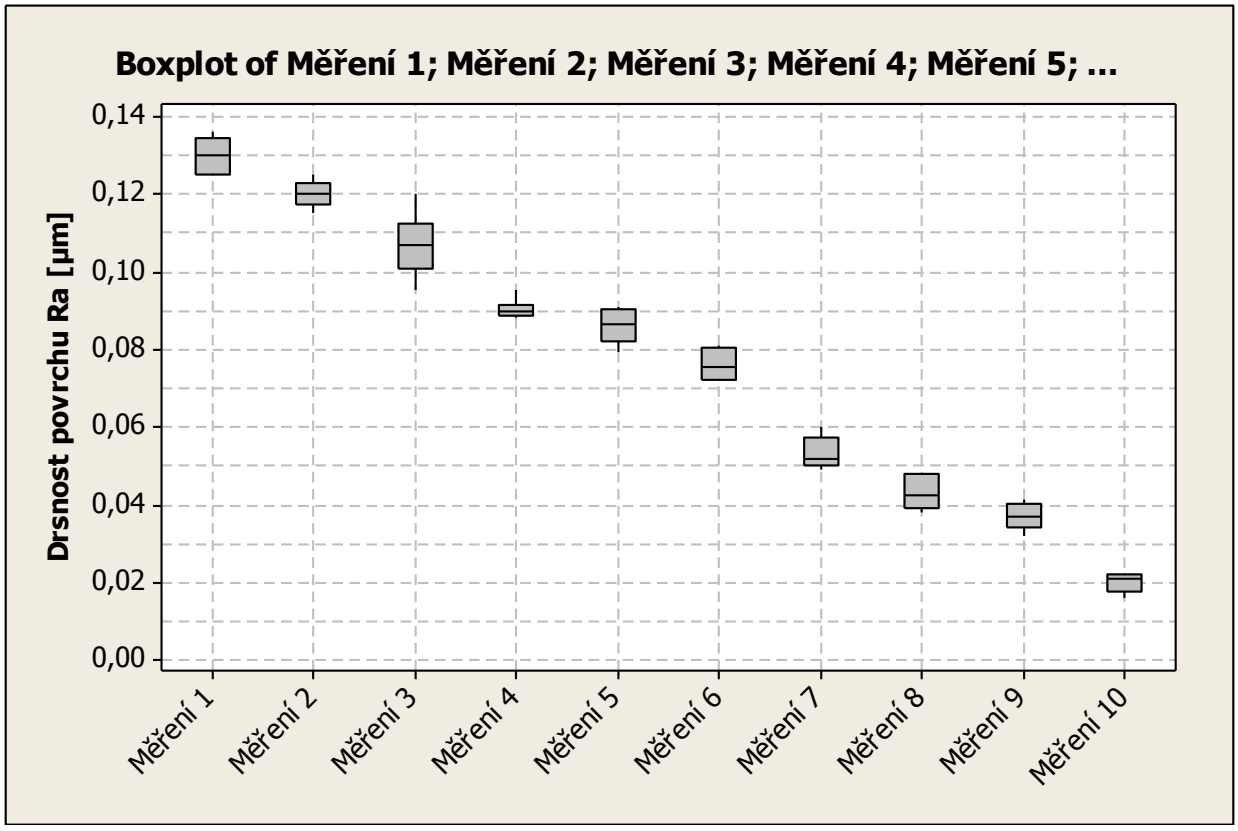
Obr. 55. Graf závislosti drsnosti povrchu na rychlosti kmitání superfinišovacího kamene



Obr. 56. Graf závislosti drsnosti povrchu na obvodové rychlosti otáčení obrobku



Obr. 57. Individual value plot



Obr. 58. Vývoj boxplotových diagramů

Tab. 19. Hodnoty boxplotových diagramů

Číslo měření	Výsledek boxplotu	Číslo měření	Výsledek boxplotu
1	Variable: Měření 1 Q1 = 0,125 Median = 0,13 Q3 = 0,1345 IQRange = 0,0095 Whiskers to: 0,125, 0,136 N = 6	6	Variable: Měření 6 Q1 = 0,072 Median = 0,0755 Q3 = 0,08025 IQRange = 0,00825 Whiskers to: 0,072, 0,081 N = 6
2	Variable: Měření 2 Q1 = 0,11725 Median = 0,12 Q3 = 0,12275 IQRange = 0,0055 Whiskers to: 0,115, 0,125 N = 6	7	Variable: Měření 7 Q1 = 0,04975 Median = 0,053 Q3 = 0,057 IQRange = 0,00725 Whiskers to: 0,049, 0,06 N = 6
3	Variable: Měření 3 Q1 = 0,101 Median = 0,107 Q3 = 0,1125 IQRange = 0,0115 Whiskers to: 0,095, 0,12 N = 6	8	Variable: Měření 8 Q1 = 0,03875 Median = 0,0425 Q3 = 0,048 IQRange = 0,00925 Whiskers to: 0,038, 0,048 N = 6
4	Variable: Měření 4 Q1 = 0,08875 Median = 0,091 Q3 = 0,0925 IQRange = 0,00375 Whiskers to: 0,088, 0,09 N = 6	9	Variable: Měření 9 Q1 = 0,03425 Median = 0,037 Q3 = 0,04025 IQRange = 0,006 Whiskers to: 0,032, 0,041 N = 6
5	Variable: Měření 5 Q1 = 0,082 Median = 0,0865 Q3 = 0,09025 IQRange = 0,00825 Whiskers to: 0,079, 0,091 N = 6	10	Variable: Měření 10 Q1 = 0,0175 Median = 0,02 Q3 = 0,022 IQRange = 0,0045 Whiskers to: 0,016, 0,022 N = 6

7.2 Naměřené hodnoty Ra na rychlosti rotace povrchu (Vw) a rychlosti kmitavého pohybu (Vk) pro materiál č.2.

Naměřené hodnoty se vztahují na materiál:

Ocel ČSN 41 4109.4, ISO 683/17-73

EURO 100Cr6, DIN 17230-80

S obsahem: C = 1,0 %, Mn = 0,5 %, Cr = 1,5 %, Si = 0,3 %

Chlazení: Petrolej + 15% minerálního olej

Jako brusivo byl použit:

Superfinišovací kámen, KNB- Kubický nitrid bóru

Tab. 20. Naměřené hodnoty pro měření č. 1 až č. 5

Číslo měření	Číslo měření hodnoty Ra [µm]				
	1	2	3	4	5
1	0,13	0,131	0,105	0,1	0,085
2	0,135	0,127	0,106	0,098	0,083
3	0,13	0,128	0,11	0,091	0,082
4	0,129	0,126	0,108	0,089	0,087
5	0,132	0,127	0,11	0,088	0,089
6	0,134	0,13	0,106	0,091	0,091

Tab. 21. Naměřené hodnoty pro měření č. 6 až č. 10

Číslo měření	Číslo měření hodnoty Ra [µm]				
	6	7	8	9	10
1	0,078	0,056	0,045	0,039	0,023
2	0,074	0,051	0,043	0,035	0,018
3	0,077	0,052	0,041	0,038	0,024
4	0,075	0,054	0,046	0,034	0,019
5	0,075	0,05	0,043	0,037	0,019
6	0,077	0,061	0,052	0,033	0,026

Tab. 22. Vypočtená střední hodnota z 6 měření s příslušnými hodnotami Vk a Vw

Číslo měření	Ra [µm]	Vk (min^{-1})	Vw ($m.min^{-1}$)
1	0,132	37,5	45
2	0,128	30,8	42
3	0,108	25,0	41
4	0,093	19,0	38
5	0,086	11,3	34
6	0,076	8,0	32
7	0,054	5,0	30
8	0,045	3,5	30
9	0,036	2,2	28
10	0,022	2,0	32
Součet:		**144,3**	**352**

7.2.1 Výpočet jednotlivých kořenů pro danou závislost

Tab. 23. Vypočtené hodnoty a jednotlivé součty potřebné k výpočtu determinantů

Číslo měření	Ra[µm]	Vk (min^{-1})	Vw ($m.min^{-1}$)	∑Ln Ra	∑ln Vw	∑ln (Vw)^2
1	0,132	37,5	45	-2,025	3,807	14,491
2	0,128	30,8	42	-2,056	3,738	13,970
3	0,108	25,0	41	-2,226	3,714	13,791
4	0,093	19,0	38	-2,375	3,638	13,232
5	0,086	11,3	34	-2,453	3,526	12,435
6	0,076	8,0	32	-2,577	3,466	12,011
7	0,054	5,0	30	-2,919	3,401	11,568
8	0,045	3,5	30	-3,101	3,401	11,568
9	0,036	2,2	28	-3,324	3,332	11,104
10	0,022	2,0	32	-3,817	3,466	12,011
Součet:		**144,3**	**352**	**-26,873**	**35,488**	**126,181**

Tab. 24. Vypočtené hodnoty a jednotlivé součty potřebné k výpočtu determinantů

Číslo měření	∑ ln(Ra).ln(Vw)	∑ ln Vk	∑(ln Vk)^2	∑ ln(Vw)*ln(Vk)	∑ln(Ra)*ln(Vk)
1	-7,708	3,624	13,136	13,797	-7,339
2	-7,684	3,428	11,748	12,811	-7,046
3	-8,265	3,219	10,361	11,954	-7,164
4	-8,640	2,944	8,670	10,711	-6,994
5	-8,652	2,425	5,880	8,551	-5,949
6	-8,931	2,079	4,324	7,207	-5,359
7	-9,927	1,609	2,590	5,474	-4,698
8	-10,547	1,253	1,569	4,261	-3,885
9	-11,077	0,788	0,622	2,627	-2,621
10	-13,228	0,693	0,480	2,402	-2,646
Součet:	**-94,659**	**22,063**	**59,380**	**79,794**	**-53,700**

Prvním determinantem je determinant „D“ v kapitole č. 5 nesoucí číslo 6.

$$D=\begin{bmatrix} n & \ln V_k & \ln V_w \\ \ln V_k & \ln {V_k}^2 & \ln V_w . \ln V_k \\ \ln V_w & \ln V_w . lnV_k & \ln {V_w}^2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 10 & 22{,}063 & 35{,}488 \\ 22{,}063 & 59{,}380 & 79{,}794 \\ 35{,}488 & 79{,}794 & 126{,}181 \end{bmatrix}$$

$$= (10\,.\,59{,}380\,.\,126{,}181) + (22{,}063\,.\,79{,}794\,.\,35{,}488) + (22{,}063\,.\,79{,}794\,.\,35{,}488) - (35{,}488\,.\,59{,}380\,.\,35{,}488) - (22{,}063\,.\,22{,}063\,.\,126{,}181) - (79{,}794\,.\,79{,}794\,.\,10) = \mathbf{56284}$$

Následuje determinant D lnC R_a kterému v kapitole č. 5 patří číslo 7

$$D\ln C\ R_a = \begin{bmatrix} \ln R_a & \ln V_k & \ln V_w \\ \ln R_a.\ln V_k & \ln V_k{}^2 & \ln V_w.\ln V_k \\ \ln R_a.\ln V_w & \ln V_w.\ln V_k & \ln V_w{}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -26{,}873 & 22{,}063 & 35{,}488 \\ -53{,}700 & 59{,}380 & 79{,}794 \\ -94{,}659 & 79{,}794 & 126{,}181 \end{bmatrix}$$

$$= (-26{,}873\ .\ 59{,}380\ .\ 126{,}181) + \big(22{,}063\ .\ 79{,}794\ .(-94{,}659)\big)$$

$$+ \big((-53{,}700)\ .\ 79{,}794\ .\ 35{,}488\big) - \big(35{,}488\ .\ 59{,}380\ .\ (-94{,}659)\big)$$

$$- \big(79{,}794\ .\ 79{,}794\ .\ (-26{,}873)\big) - (22{,}063\ .\ (-53{,}700)\ .\ 126{,}181) = \mathbf{12{,}50}$$

Následujícím determinantem je determinant D_{Xk} kterému je v kapitole č. 5 přiřazeno číslo 8

$$\mathrm{D}x_k = \begin{bmatrix} n & \ln R_a & \ln V_w \\ \ln V_k & \ln R_a.\ln V_k & \ln V_w.\ln V_k \\ \ln V_w & \ln R_a.\ln V_w & \ln V_w{}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 & -26{,}873 & 35{,}488 \\ 22{,}063 & -53{,}700 & 79{,}794 \\ 35{,}488 & -94{,}659 & 126{,}181 \end{bmatrix} =$$

$(10\ .\ (-53{,}700).\ 126{,}181) + (22{,}063\ .\ (-94{,}659)\ .\ 35{,}488) +$

$(79{,}794\ .\ (-26{,}873)\ .\ 35{,}488) - (35{,}488\ .\ (-53{,}700)\ .\ 35{,}488) -$

$(79{,}794\ .\ (-94{,}659)\ .\ 10) - (22{,}063\ .\ (-26{,}873)\ .\ 126{,}181) =$ **38869**

Posledním determinantem v této podkapitole je determinant D_{Yw} který v kapitole č. 5 nese číslo 9

$$\mathrm{D}y_w = \begin{bmatrix} n & \ln V_k & \ln V_w \\ \ln V_k & \ln V_k{}^2 & \ln V_w.\ln V_k \\ \ln R_a & \ln R_a.\ln V_k & \ln R_a.\ln V_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 & 22{,}063 & -26{,}873 \\ 22{,}063 & 59{,}380 & -53{,}700 \\ 35{,}488 & 79{,}794 & -94{,}659 \end{bmatrix} =$$

$\big(10\ .\ 59{,}380\ .\ (-94{,}659)\big) + (22{,}063\ .\ (-53{,}700)\ .\ 35{,}488) +$

$(22{,}063\ .\ 79{,}794\ .(-26{,}873) — (26{,}873\ .\ 59{,}380\ .\ 35{,}488) - \big(22{,}063\ .\ 22{,}063\ .(-94{,}659)\big) -$

$((-53{,}700)\ .79{,}794\ .\ 10) =$ **-66807**

Výsledky získané výpočtem determinantů se musí dosadit do příslušných vztahů:

$$\mathrm{C\ R_a} = e^{\frac{D\ln C_{Ra}}{D}} = e^{\frac{12{,}5}{56284}} = \mathbf{1}$$

$$\mathrm{X_K} = \frac{D_{Xk}}{D} = \frac{38869}{56284} = \mathbf{0{,}69}$$

$$\mathrm{Yw} = \frac{D_{Yw}}{D} = \frac{-66807}{56284} = \mathbf{-1{,}18}$$

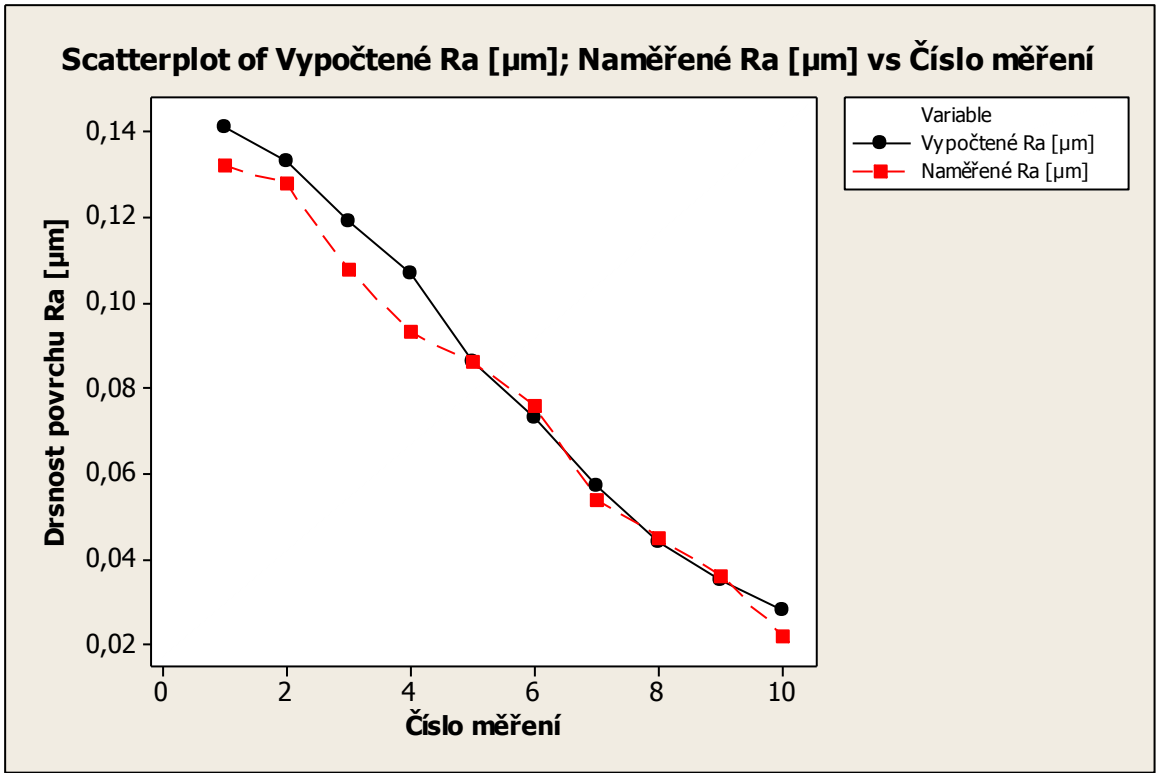
Po dosazení vypočtených kořenů C R_a, X_K, Y_w do předpokládané závislosti viz. rov. č.1 má předpokládaná závislost tvar:

$$R_a = 1\ .\ V_k{}^{0{,}69}\ .\ V_w{}^{-1{,}18}$$

Po dosazení hodnot V_k, V_W do rovnice č. 1, by mělo vyjít, že Ra vypočtené se přibližně rovná Ra naměřenému. To můžeme porovnat v přiložené tabulce č. 25.

Tab. 25. Přehled pro porovnání Ra naměřeného s Ra vypočteným

Číslo měření	Vypočtené Ra [µm]	Naměřené Ra [µm]
1	0,141	0,132
2	0,133	0,128
3	0,119	0,108
4	0,107	0,093
5	0,086	0,086
6	0,073	0,076
7	0,057	0,054
8	0,044	0,045
9	0,035	0,036
10	0,028	0,022



Obr. 59. Grafické porovnání Ra naměřené s Ra vypočteným

7.2.2 Výpočet statistiky

Aritmetický průměr

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} xi = \frac{1}{6}\sum_{i=1}^{6}(0{,}130 + 0{,}135 + 0{,}130 + 0{,}129 + 0{,}132 + 0{,}134) = \mathbf{0,132}\ \textbf{[µm]}$$

Kde: xi- naměřená hodnota

n- počet hodnot

Směrodatná odchylka

$$s = +\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(xi - \bar{x})^2} = +\sqrt{\frac{1}{6}\sum_{i=1}^{6}(0{,}130 - 0{,}132)^2 + (0{,}135 - 0{,}132)^2 + (0{,}130 - 0{,}132)^2 +}$$

$$+(0{,}129 - 0{,}132)^2 + (0{,}132 - 0{,}132)^2 + (0{,}134 - 0{,}132)^2 = \mathbf{0,002}\ \textbf{[µm]}$$

Kde: xi- naměřená hodnota

x̄- aritmetický průměr

n- počet hodnot

Výpočet Ra maximální a Ra minimální s pravděpodobností 95%,

Ra max= x̄ + 2s= 0,132 + 2. 0,002 = **0,136 µm**

Ra min= x̄ - 2s= 0,132 - 2. 0,002 = **0,127 µm**

Kde: x̄- aritmetický průměr

s- směrodatná odchylka

Výpočet pravděpodobnosti, že drsnost povrchu bude v rozmezí zadaných hodnot

Rozmezí hodnot pro tento výpočet je pro hodnoty $x_1 = 0{,}129$ µm a $x_2 = 0{,}135$ µm.

$$z_1 = \frac{x_1 - \bar{x}}{s} = \frac{0{,}129 - 0{,}132}{0{,}002} = \mathbf{-1{,}21}$$

$$z_2 = \frac{x_2 - \bar{x}}{s} = \frac{0{,}135 - 0{,}132}{0{,}002} = \mathbf{1{,}51}$$

Kde: x̄- aritmetický průměr

s- směrodatná odchylka

x_1 a x_2- zvolené rozmezí hodnot pro výpočet pravděpodobnosti

Pro z_1 a z_2 odečteno z tabulek:

$Ø_{(z1=1,51)}$= **0,4854**

$Ø_{(z2=-1,21)}$= **-0,2549**

P=$Ø_{(z1)}$ - $Ø_{(z2)}$ = 0,4854-(-0,2549) = 0,7403 = **74,03%**

Pravděpodobnost, že drsnost povrchu bude v rozmezí zadaných hodnot (0,129 a 0,135 µm) je 74,03%.

Tab. 26. Souhrn statistických výpočtů pro hodnoty souborů 1 až 5

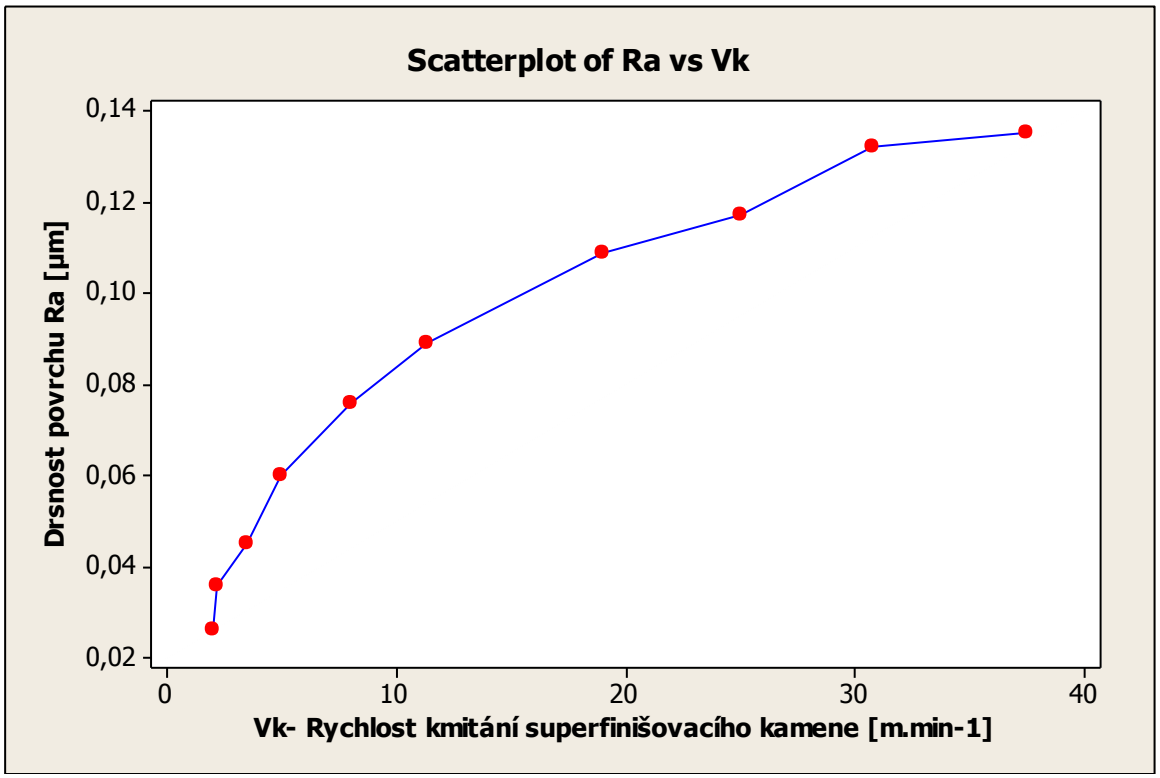
Číslo měření	Číslo měření hodnoty Ra [µm]				
	1	2	3	4	5
1	0,13	0,131	0,105	0,1	0,085
2	0,135	0,127	0,106	0,098	0,083
3	0,13	0,128	0,11	0,091	0,082
4	0,129	0,126	0,108	0,089	0,087
5	0,132	0,127	0,11	0,088	0,089
6	0,134	0,13	0,106	0,091	0,091
Průměr [µm]	0,132	0,128	0,108	0,093	0,086
Smodch [µm]	0,002	0,002	0,002	0,005	0,003
2s(+)	0,136	0,132	0,111	0,102	0,093
2s(-)	0,127	0,125	0,104	0,084	0,080
Spodní mez [µm]	0,129	0,126	0,105	0,088	0,082
Horní mez [µm]	0,135	0,131	0,110	0,100	0,091
Z1	-1,206	-1,223	-1,263	-1,068	-1,309
Z2	1,508	1,599	1,263	1,584	1,518
P1	-0,255	-0,236	-0,222	-0,222	-0,285
P2	0,485	0,486	0,488	0,487	0,485
P	0,740	0,722	0,710	0,709	0,770
Pravděpodobnost (%)	74,030	72,180	70,990	70,920	76,980

Tabulka 27 Souhrn statistických výpočtů pro hodnoty souborů 6 až 10

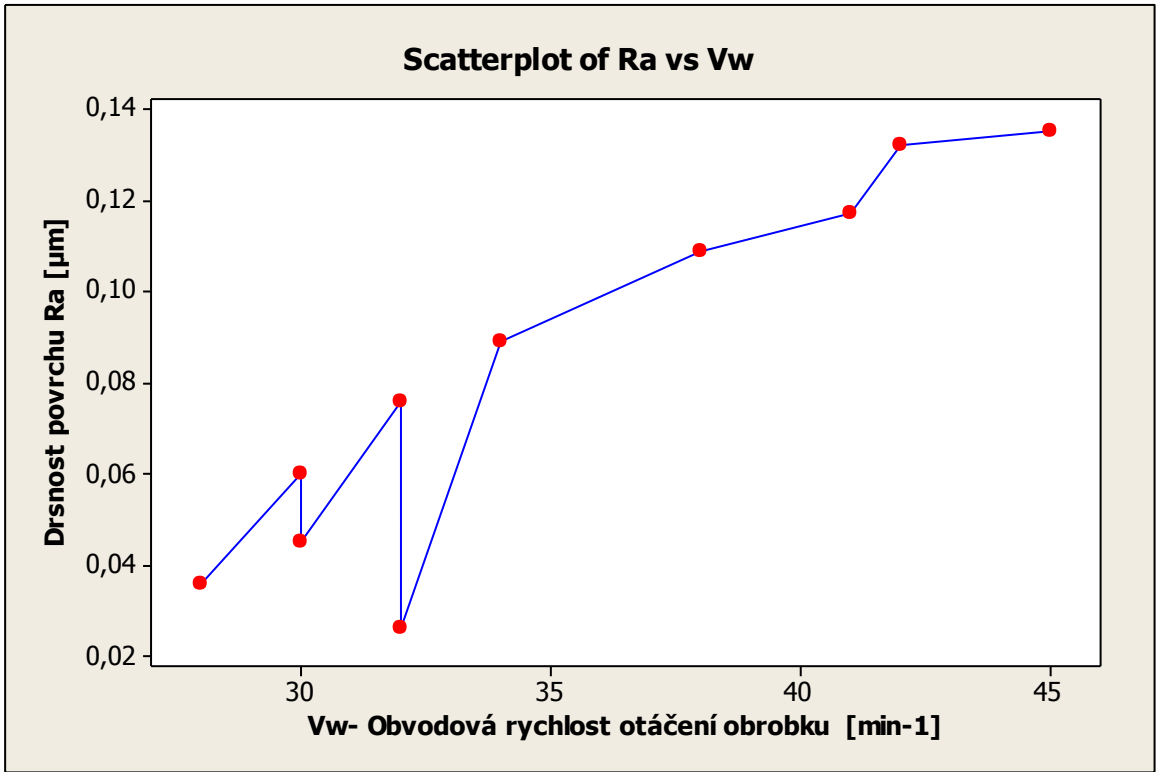
Číslo měření	Číslo měření hodnoty Ra [µm]				
	6	7	8	9	10
1	0,078	0,056	0,045	0,039	0,023
2	0,074	0,051	0,043	0,035	0,018
3	0,077	0,052	0,041	0,038	0,024
4	0,075	0,054	0,046	0,034	0,019
5	0,075	0,05	0,043	0,037	0,019
6	0,077	0,061	0,052	0,033	0,026
Průměr [µm]	0,076	0,054	0,045	0,036	0,022
Smodch [µm]	0,001	0,004	0,004	0,002	0,003
2s(+)	0,079	0,061	0,052	0,040	0,027
2s(-)	0,073	0,047	0,038	0,032	0,016
Spodní mez [µm]	0,074	0,050	0,041	0,033	0,018
Horní mez [µm]	0,078	0,061	0,052	0,039	0,026
Z1	-1,414	-1,082	-1,139	-1,389	-1,172
Z2	1,414	1,894	1,993	1,389	1,507
P1	-0,421	-0,226	-0,373	-0,418	-0,379
P2	0,421	0,487	0,477	0,418	0,435
P	0,841	0,713	0,850	0,835	0,814
Pravděpodobnost (%)	84,140	71,250	84,960	83,540	81,350

7.2.3 Grafické zhodnocení získaných výsledků

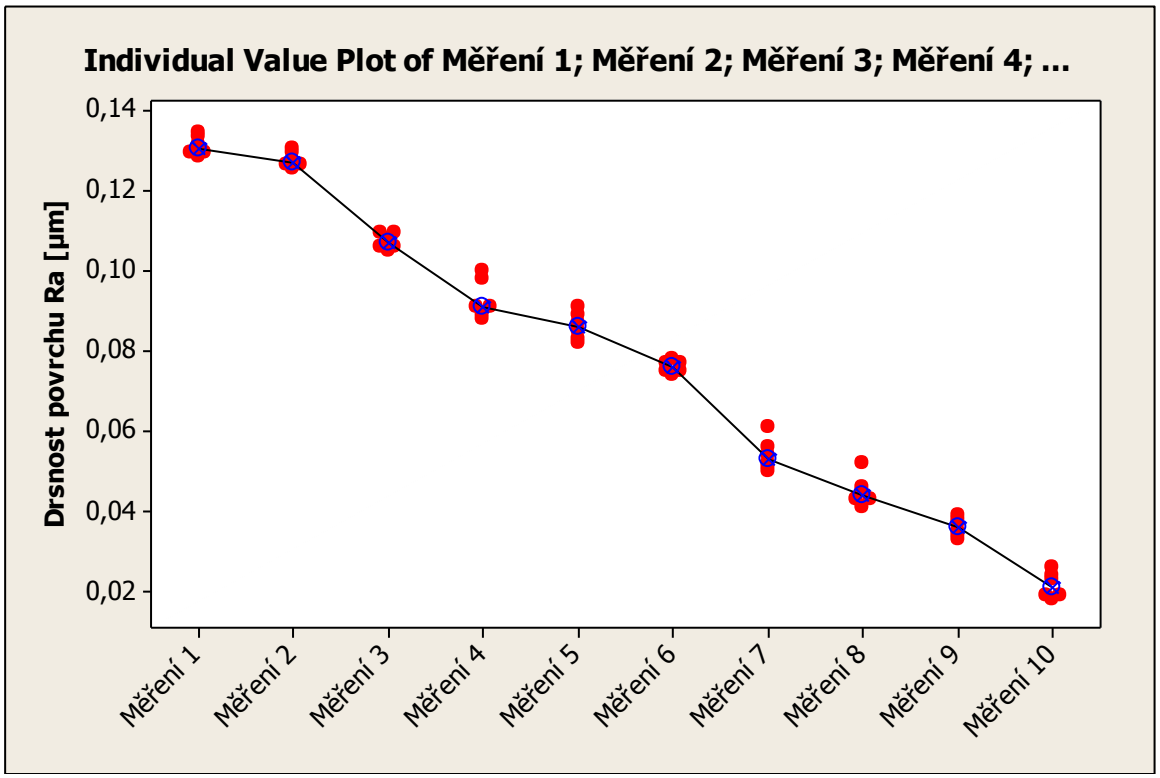
Pro grafické vyhodnocení výsledků jsem použil software minilab 16.



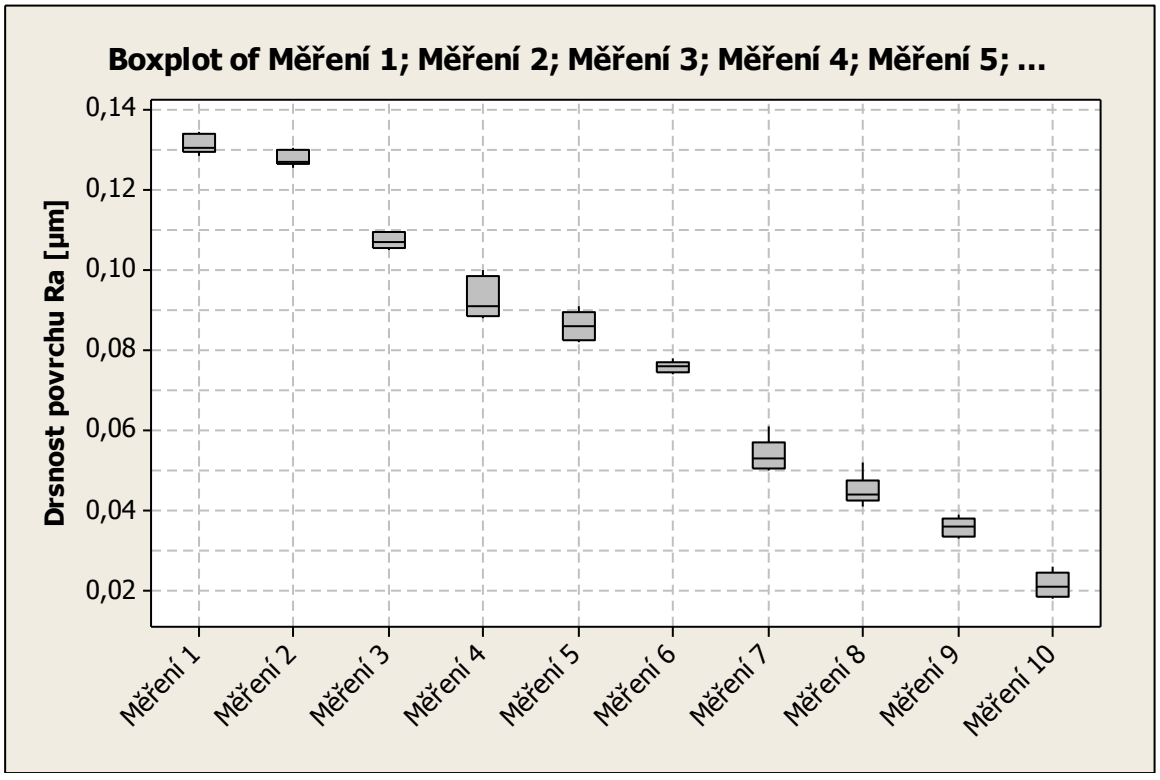
Obr. 60. Graf závislosti drsnosti povrchu na rychlosti kmitání superfinišovacího kamene



Obr. 61. Graf závislosti drsnosti povrchu na obvodové rychlosti otáčení obrobku



Obr. 62. Individual value plot



Obr. 63. Vývoj boxplotových diagramů

Tab. 28. Hodnoty boxplotových diagramů

Číslo měření	Výsledek boxplotu	Číslo měření	Výsledek boxplotu
1	Variable: Měření 1 Q1 = 0,12975 Median = 0,132 Q3 = 0,13425 IQRange = 0,0045 Whiskers to: 0,129, 0,135 N = 6	6	Variable: Měření 6 Q1 = 0,07475 Median = 0,076 Q3 = 0,07725 IQRange = 0,0025 Whiskers to: 0,074, 0,078 N = 6
2	Variable: Měření 2 Q1 = 0,12675 Median = 0,1275 Q3 = 0,13025 IQRange = 0,0035 Whiskers to: 0,126, 0,131 N = 6	7	Variable: Měření 7 Q1 = 0,05075 Median = 0,054 Q3 = 0,05725 IQRange = 0,0065 Whiskers to: 0,05, 0,061 N = 6
3	Variable: Měření 3 Q1 = 0,10575 Median = 0,108 Q3 = 0,11 IQRange = 0,00425 Whiskers to: 0,105, 0,11 N = 6	8	Variable: Měření 8 Q1 = 0,0425 Median = 0,045 Q3 = 0,0475 IQRange = 0,005 Whiskers to: 0,041, 0,052 N = 6
4	Variable: Měření 4 Q1 = 0,08875 Median = 0,093 Q3 = 0,0985 IQRange = 0,00975 Whiskers to: 0,088, 0,1 N = 6	9	Variable: Měření 9 Q1 = 0,03375 Median = 0,036 Q3 = 0,03825 IQRange = 0,0045 Whiskers to: 0,033, 0,039 N = 6
5	Variable: Měření 5 Q1 = 0,08275 Median = 0,086 Q3 = 0,0895 IQRange = 0,00675 Whiskers to: 0,082, 0,091 N = 6	10	Variable: Měření 10 Q1 = 0,01875 Median = 0,022 Q3 = 0,0245 IQRange = 0,00575 Whiskers to: 0,018, 0,026 N = 6

7.3 Naměřené hodnoty Ra na rychlosti rotace povrchu (Vw) a rychlosti kmitavého pohybu (Vk) pro materiál č.3.

Naměřené hodnoty se vztahují na materiál:

Temperovaná litina

EN- GJL- 300

ČSN 42 2430, Rm = 300 – 400 MPa

Jako brusivo byl použit:

Superfinišovací kámen z karbidu křemíku (SiC)

Tab. 29. Naměřené hodnoty pro měření č. 1 až č. 5

Číslo měření	Číslo měření hodnoty Ra [µm]				
	1	2	3	4	5
1	0,32	0,3	0,28	0,2	0,16
2	0,315	0,32	0,265	0,22	0,15
3	0,33	0,312	0,28	0,211	0,165
4	0,31	0,31	0,28	0,23	0,155
5	0,345	0,322	0,27	0,211	0,145
6	0,306	0,308	0,269	0,224	0,161

Tab. 30. Naměřené hodnoty pro měření č. 6 až č. 10

Číslo měření	Číslo měření hodnoty Ra [µm]				
	6	7	8	9	10
1	0,1	0,09	0,07	0,056	0,04
2	0,13	0,085	0,065	0,048	0,042
3	0,12	0,088	0,069	0,049	0,038
4	0,15	0,092	0,0655	0,055	0,042
5	0,11	0,07	0,068	0,049	0,035
6	0,128	0,097	0,065	0,055	0,037

Tab. 31. Vypočtená střední hodnota z 6 měření s příslušnými hodnotami Vk a Vw

Číslo měření	Ra [µm]	Vk (min^{-1})	Vw ($m.min^{-1}$)
1	0,321	37,5	45
2	0,312	30,8	40
3	0,274	26,7	40
4	0,216	19,0	38
5	0,156	11,3	34
6	0,123	8,0	32
7	0,087	5,0	30
8	0,067	3,5	30
9	0,052	2,5	28
10	0,039	1,9	28
Součet:		**146,2**	**345**

7.3.1 Výpočet jednotlivých kořenů pro danou závislost

Tab. 32. Vypočtené hodnoty a jednotlivé součty potřebné k výpočtu determinantů

Číslo měření	∑ Ln Ra	∑ ln Vw	∑ ln (Vw)^2	∑ ln(Ra).ln(Vw)
1	-1,136	3,807	14,491	-4,326
2	-1,165	3,689	13,608	-4,297
3	-1,295	3,689	13,608	-4,776
4	-1,532	3,638	13,232	-5,575
5	-1,858	3,526	12,435	-6,552
6	-2,096	3,466	12,011	-7,263
7	-2,442	3,401	11,568	-8,305
8	-2,703	3,401	11,568	-9,194
9	-2,957	3,332	11,104	-9,852
10	-3,244	3,332	11,104	-10,810
Součet:	**-20,427**	**35,281**	**124,728**	**-70,948**

Tab. 33. Vypočtené hodnoty a jednotlivé součty potřebné k výpočtu determinantů

Číslo měření	∑ ln Vk	∑ (ln Vk)^2	∑ ln(Vw)*ln(Vk)	∑ ln(Ra)*ln(Vk)
1	3,624	13,136	13,797	-4,118
2	3,428	11,748	12,644	-3,992
3	3,285	10,789	12,117	-4,252
4	2,944	8,670	10,711	-4,512
5	2,425	5,880	8,551	-4,505
6	2,079	4,324	7,207	-4,358
7	1,609	2,590	5,474	-3,930
8	1,253	1,569	4,261	-3,386
9	0,916	0,840	3,053	-2,709
10	0,642	0,412	2,139	-2,082
Součet:	**22,206**	**59,957**	**79,952**	**-37,846**

Prvním determinantem je determinant „D“ v kapitole č. 5 nesoucí číslo 6.

$$D=\begin{bmatrix} n & \ln V_k & \ln V_w \\ \ln V_k & \ln {V_k}^2 & \ln V_w . \ln V_k \\ \ln V_w & \ln V_w . lnV_k & \ln {V_w}^2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 10 & 22{,}206 & 35{,}281 \\ 22{,}206 & 59{,}957 & 79{,}952 \\ 35{,}281 & 79{,}952 & 124{,}728 \end{bmatrix} = (10 \,.\, 59{,}957 \,.\, 124{,}728) +$$

$$(22{,}206 \,.\, 79{,}952 \,.\, 35{,}281) + (22{,}206 \,.\, 79{,}952 \,.\, 35{,}281) - (35{,}281 \,.\, 59{,}952 \,.\, 35{,}281) -$$

$$(22{,}206 \,.\, 22{,}206 \,.\, 124{,}728) - (79{,}952 \,.\, 79{,}952 \,.\, 10) = \mathbf{54303}$$

Následuje determinant D lnC R_a kterému v kapitole č. 5 patří číslo 7

$$D\ln C\ R_a = \begin{bmatrix} \ln R_a & \ln V_k & \ln V_w \\ \ln R_a.\ln V_k & \ln V_k{}^2 & \ln V_w.\ln V_k \\ \ln R_a.\ln V_w & \ln V_w.\ln V_k & \ln V_w{}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -20{,}427 & 22{,}206 & 35{,}281 \\ -37{,}846 & 59{,}957 & 79{,}952 \\ -70{,}948 & 79{,}952 & 124{,}728 \end{bmatrix}$$

$$= (-20{,}427\ .\ 59{,}957\ .\ 124{,}728) + \big(22{,}206\ .\ 79{,}728\ .(-70{,}948)\big)$$

$$+ \big((-37{,}846)\ .\ 79{,}952\ .\ 35{,}281\big) - \big(35{,}281\ .\ 59{,}957\ .\ (-70{,}948)\big)$$

$$- \big(79{,}952\ .\ 79{,}952\ .\ (-20{,}427)\big) - (22{,}206\ .\ (-37{,}846)\ .\ 124{,}728) = \mathbf{0,46}$$

Následujícím determinantem je determinant D_{Xk} kterému je v kapitole č. 5 přiřazeno číslo 8

$$\mathrm{D}x_k = \begin{bmatrix} n & \ln R_a & \ln V_w \\ \ln V_k & \ln R_a.\ln V_k & \ln V_w.\ln V_k \\ \ln V_w & \ln R_a.\ln V_w & \ln V_w{}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 & -20{,}427 & 35{,}281 \\ 22{,}206 & -37{,}846 & 79{,}952 \\ 35{,}281 & -70{,}948 & 124{,}728 \end{bmatrix} =$$

$(10\ .\ (-37{,}846).\ 124{,}728) + (22{,}206\ .\ (-70{,}948)\ .\ 35{,}281) +$

$(79{,}752\ .\ (-20{,}427)\ .\ 35{,}281) - (35{,}281\ .\ (-37{,}846)\ .\ 35{,}281) -$

$(79{,}952\ .\ (-70{,}948)\ .\ 10) - (22{,}206\ .\ (-20{,}427)\ .\ 124{,}728) =$ **47601**

Posledním determinantem v této podkapitole je determinant D_{Yw} který v kapitole č. 5 nese číslo 9

$$\mathrm{D}y_w = \begin{bmatrix} n & \ln V_k & \ln V_w \\ \ln V_k & \ln V_k{}^2 & \ln V_w.\ln V_k \\ \ln R_a & \ln R_a.\ln V_k & \ln R_a.\ln V_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10 & 22{,}206 & -20{,}427 \\ 22{,}206 & 59{,}957 & -37{,}846 \\ 35{,}281 & 79{,}952 & -70{,}948 \end{bmatrix} =$$

$\big(10\ .\ 59{,}957\ .\ (-70{,}948)\big) + (22{,}206\ .\ (-37{,}846)\ .\ 35{,}281) +$

$(22{,}206\ .\ 79{,}952\ .(-20{,}427) — ((-20{,}427)\ .\ 59{,}957\ .\ 35{,}281) -$

$\big(22{,}206\ .\ 22{,}206\ .(-70{,}948)\big) - ((-37{,}846)\ .79{,}952\ .\ 10) =$ **-61401**

Výsledky získané výpočtem determinantů se musí dosadit do příslušných vztahů:

$$\mathrm{C\ R_a} = e^{\frac{D\ln C_{Ra}}{D}} = e^{\frac{0{,}46}{54303}} = \mathbf{1}$$

$$\mathrm{X_K} = \frac{D_{Xk}}{D} = \frac{47601}{54303} = \mathbf{0{,}877}$$

$$\mathrm{Yw} = \frac{D_{Yw}}{D} = \frac{-61401}{54303} = \mathbf{-1{,}13}$$

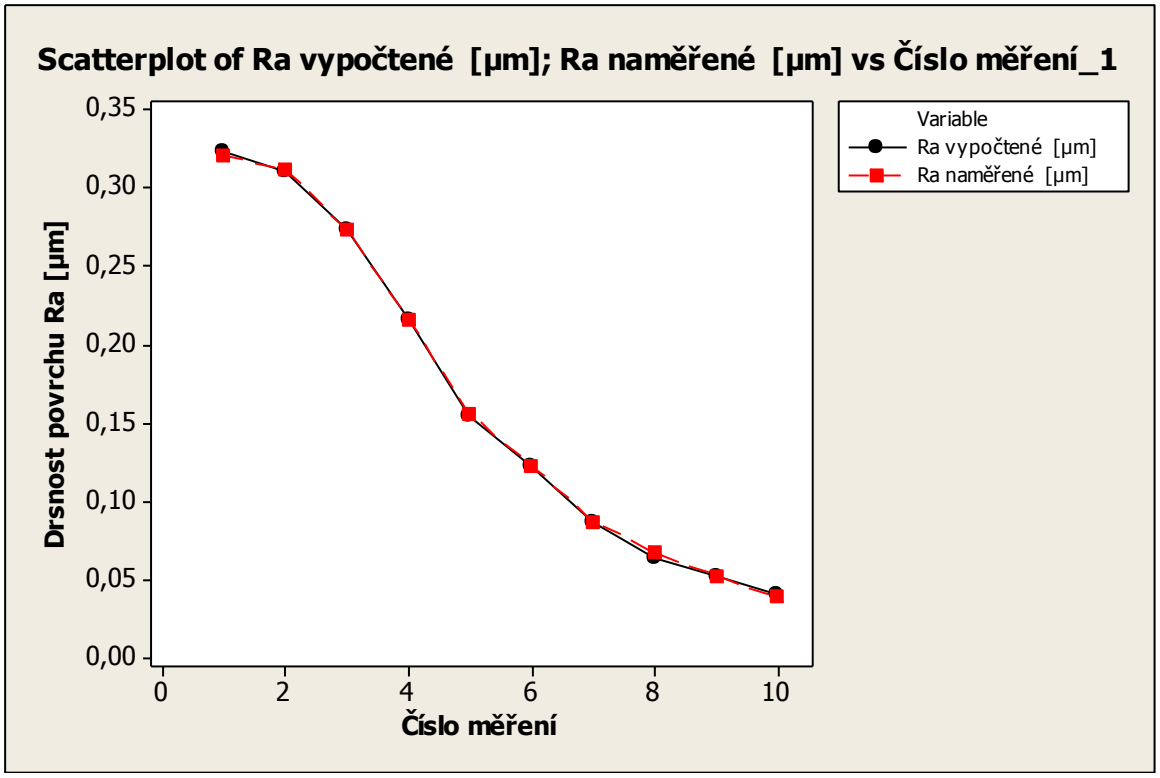
Po dosazení vypočtených kořenů C R_a, X_K, Y_w do předpokládané závislosti viz. rov. č.1 má předpokládaná závislost tvar:

$$\mathrm{R_a} = 1\ .\ \mathrm{V_k}^{0{,}877}\ .\ \mathrm{V_w}^{-1{,}13}$$

Po dosazení hodnot V_k, V_W do rovnice č. 1, by mělo vyjít, že Ra vypočtené se přibližně rovná Ra naměřenému. To můžeme porovnat v přiložené tabulce č.34.

Tab. 34. Přehled pro porovnání Ra naměřeného s Ra vypočteným

Číslo měření	Ra vypočtené [µm]	Ra naměřené [µm]
1	0,324	0,321
2	0,311	0,312
3	0,274	0,274
4	0,216	0,216
5	0,155	0,156
6	0,1229	0,123
7	0,087	0,087
8	0,064	0,067
9	0,0515	0,052
10	0,04	0,039



Obr.64. Grafické porovnání Ra naměřené s Ra vypočteným.

7.3.2 Výpočet statistiky

Aritmetický průměr

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} xi = \frac{1}{6}\sum_{i=1}^{6}(0{,}32 + 0{,}315 + 0{,}33 + 0{,}31 + 0{,}345 + 0{,}306) = \mathbf{0,321}\ \textbf{[µm]}$$

Kde: xi- naměřená hodnota

n- počet hodnot

Směrodatná odchylka

$$s = +\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(xi - \bar{x})^2} = +\sqrt{\frac{1}{6}\sum_{i=1}^{6}(0{,}32 - 0{,}321)^2 + (0{,}315 - 0{,}321)^2 + (0{,}33 - 0{,}321)^2 +}$$

$$+(0{,}31 - 0{,}321)^2 + (0{,}345 - 0{,}321)^2 + (0{,}306 - 0{,}321)^2 = \mathbf{0,013}\ \textbf{[µm]}$$

Kde: xi- naměřená hodnota

x̄- aritmetický průměr

n- počet hodnot

Výpočet Ra maximální a Ra minimální s pravděpodobností 95%,

Ra max= x̄ + 2s= 0,321 + 2. 0,013 = **0,347 µm**

Ra min= x̄ - 2s= 0,321 - 2. 0,013 = **0,295 µm**

Kde: x̄- aritmetický průměr

s- směrodatná odchylka

Výpočet pravděpodobnosti, že drsnost povrchu bude v rozmezí zadaných hodnot

Rozmezí hodnot pro tento výpočet je pro hodnoty $x_1 = 0{,}306$ µm a $x_2 = 0{,}345$ µm.

$$z_1 = \frac{x_1 - \bar{x}}{s} = \frac{0{,}306 - 0{,}321}{0{,}013} = \mathbf{-1{,}139}$$

$$z_2 = \frac{x_2 - \bar{x}}{s} = \frac{0{,}345 - 0{,}321}{0{,}013} = \mathbf{1{,}823}$$

Kde: x̄- aritmetický průměr

s- směrodatná odchylka

x_1 a x_2- zvolené rozmezí hodnot pro výpočet pravděpodobnosti

Pro z_1 a z_2 odečteno z tabulek:

$Ø_{(z1=1,823)}$= **0,466**

$Ø_{(z2=-1,139)}$= **-0,373**

P=$Ø_{(z1)}$ - $Ø_{(z2)}$ = 0,466-(-0,373) = 0,839 = **83,85%**

Pravděpodobnost, že drsnost povrchu bude v rozmezí zadaných hodnot (0,306 a 0,345 µm) je 83,85%.

Tab. 35. Souhrn statistických výpočtů pro hodnoty souborů 1 až 5

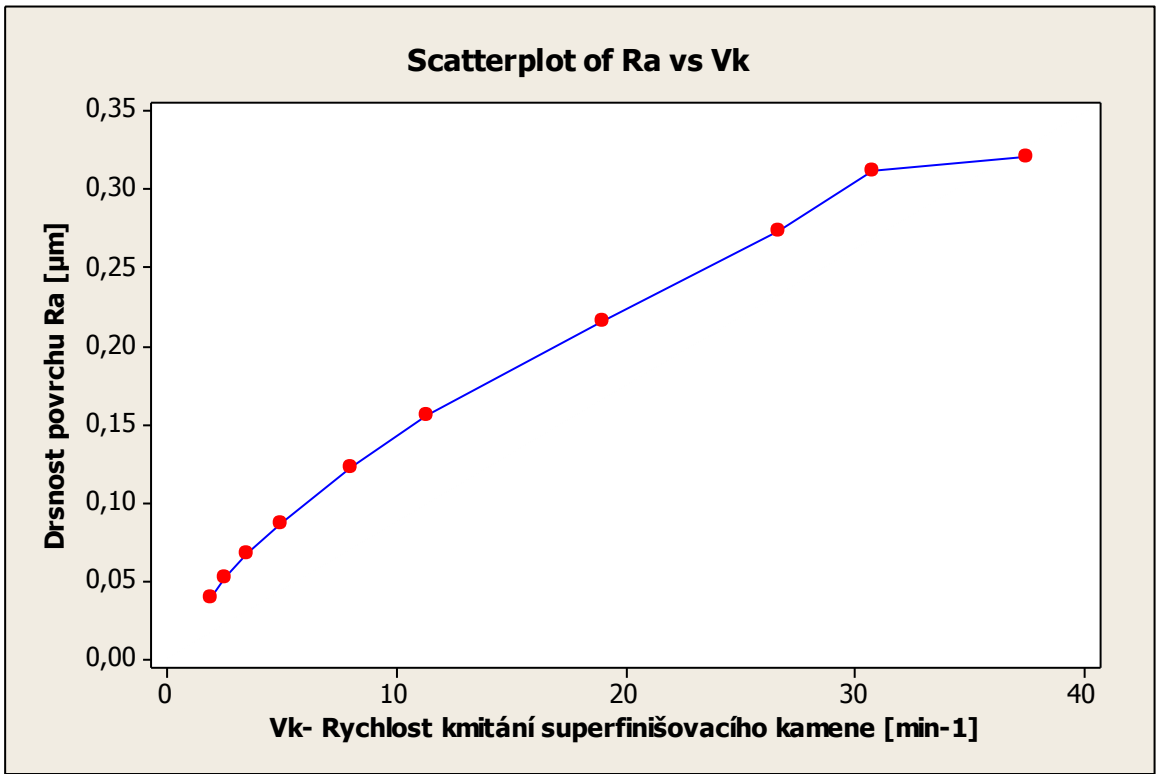
Číslo měření	Číslo měření hodnoty Ra [µm]				
	1	2	3	4	5
1	0,32	0,3	0,28	0,2	0,16
2	0,315	0,32	0,265	0,22	0,15
3	0,33	0,312	0,28	0,211	0,165
4	0,31	0,31	0,28	0,23	0,155
5	0,345	0,322	0,27	0,211	0,145
6	0,306	0,308	0,269	0,224	0,161
Průměr [µm]	0,321	0,312	0,274	0,216	0,156
Smodch [µm]	0,013	0,007	0,006	0,010	0,007
2s(+)	0,347	0,327	0,286	0,236	0,170
2s(-)	0,295	0,297	0,262	0,196	0,142
Dolní mez [µm]	0,306	0,300	0,265	0,200	0,145
Horní mez [µm]	0,345	0,322	0,280	0,230	0,165
Z1	-1,139	-1,623	-1,454	-1,625	-1,610
Z2	1,823	1,353	0,969	1,421	1,317
P1	-0,373	-0,447	-0,427	-0,445	-0,445
P2	0,466	0,415	0,334	0,422	0,407
P(%)	0,839	0,862	0,761	0,867	0,852
Pravděpodobnost (%)	83,850	86,240	76,050	86,740	85,190

Tab. 36. Souhrn statistických výpočtů pro hodnoty souborů 6 až 10

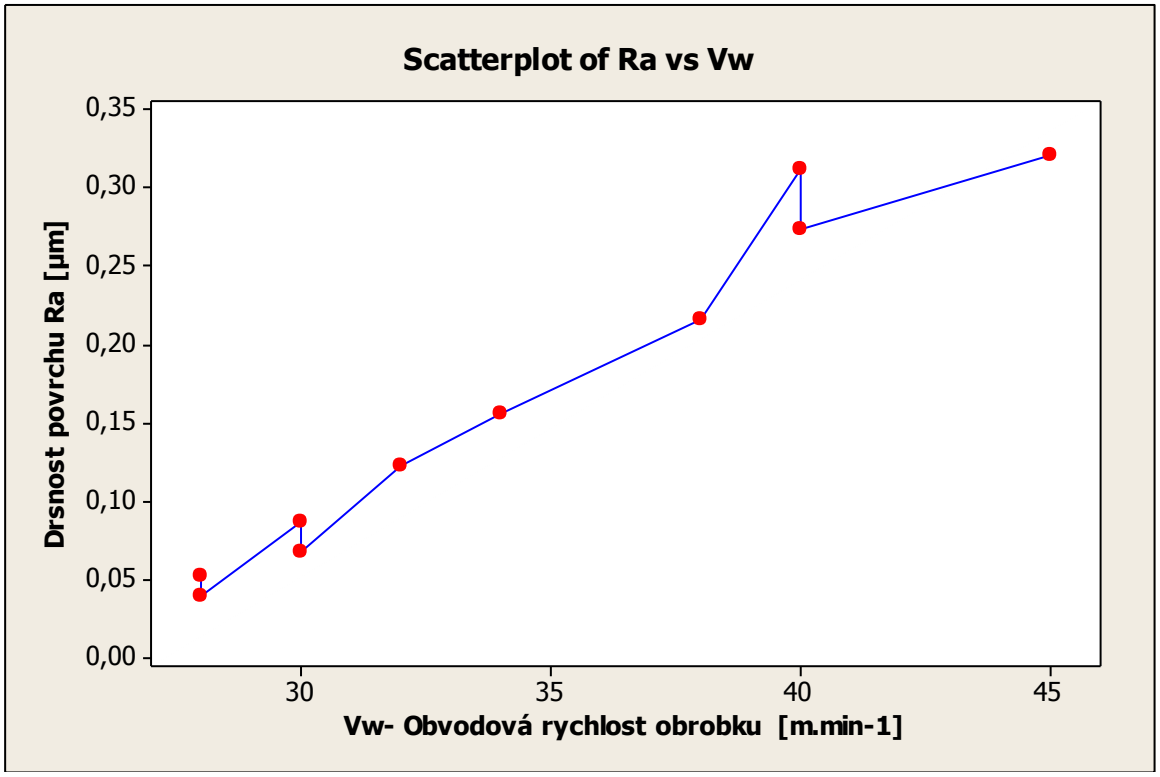
Číslo měření	Číslo měření hodnoty Ra [µm]				
	6	7	8	9	10
1	0,1	0,09	0,07	0,056	0,04
2	0,13	0,085	0,065	0,048	0,042
3	0,12	0,088	0,069	0,049	0,038
4	0,15	0,092	0,0655	0,055	0,042
5	0,11	0,07	0,068	0,049	0,035
6	0,128	0,097	0,065	0,055	0,037
Průměr [µm]	0,123	0,087	0,067	0,052	0,039
Smodch [µm]	0,016	0,008	0,002	0,003	0,003
2s(+)	0,155	0,104	0,071	0,059	0,044
2s(-)	0,091	0,070	0,063	0,045	0,034
Dolní mez [µm]	0,100	0,070	0,065	0,048	0,035
Horní mez [µm]	0,150	0,097	0,070	0,056	0,042
Z1	-1,450	-2,013	-1,037	-1,188	-1,549
Z2	1,702	1,184	1,452	1,188	1,162
P1	-0,427	-0,477	-0,351	-0,383	-0,439
P2	0,455	0,381	0,427	0,383	0,377
P(%)	0,882	0,858	0,777	0,766	0,816
Pravděpodobnost (%)	88,190	85,820	77,730	76,600	81,640

7.3.3 Grafické zhodnocení získaných výsledků

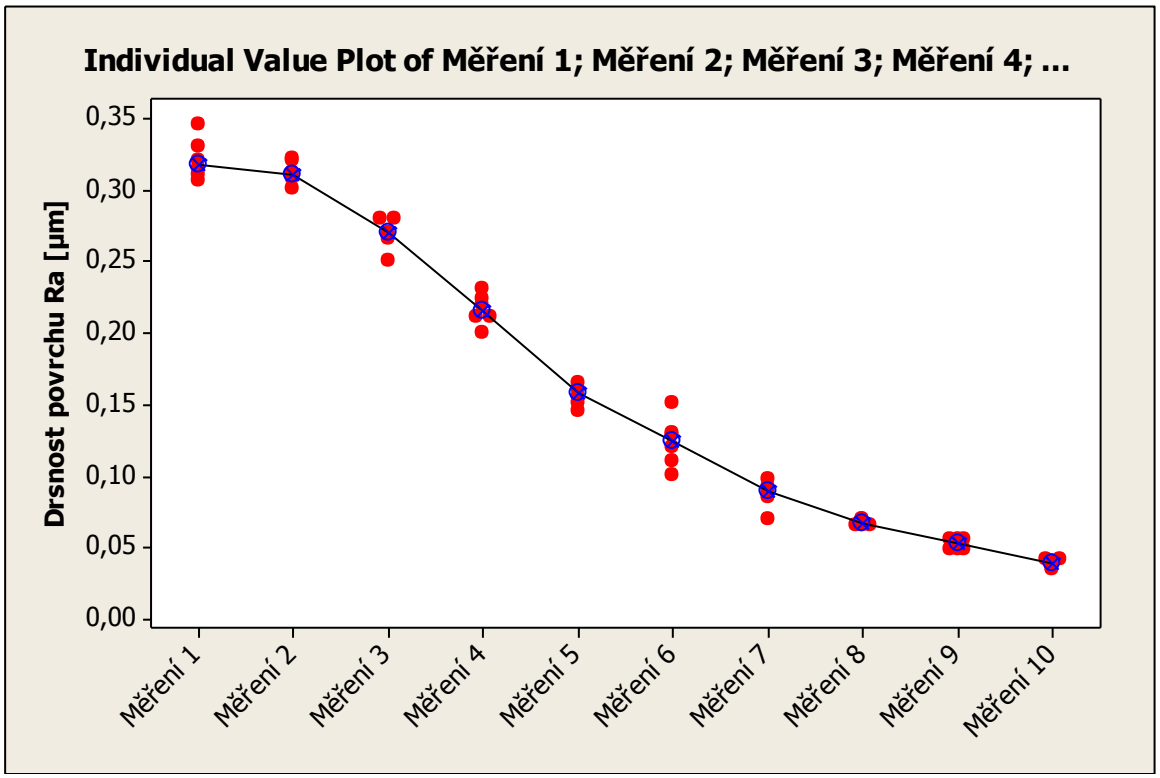
Pro grafické vyhodnocení výsledků jsem použil software minilab 16.



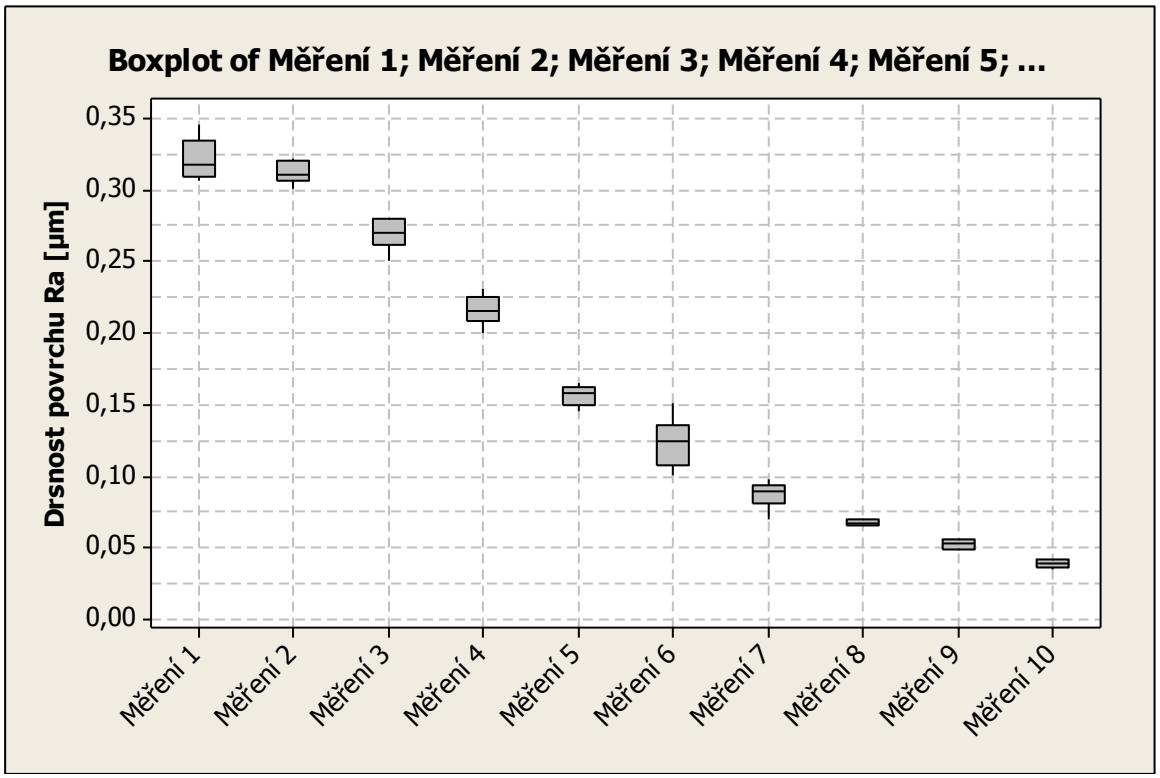
Obr. 65. Graf závislosti drsnosti povrchu na rychlosti kmitání superfinišovacího kamene



Obr. 66. Graf závislosti drsnosti povrchu na obvodové rychlosti otáčení obrobku



Obr. 67. Individual value plot



Obr. 68. Vývoj boxplotových diagramů

Tab. 37. Hodnoty boxplotových diagramů

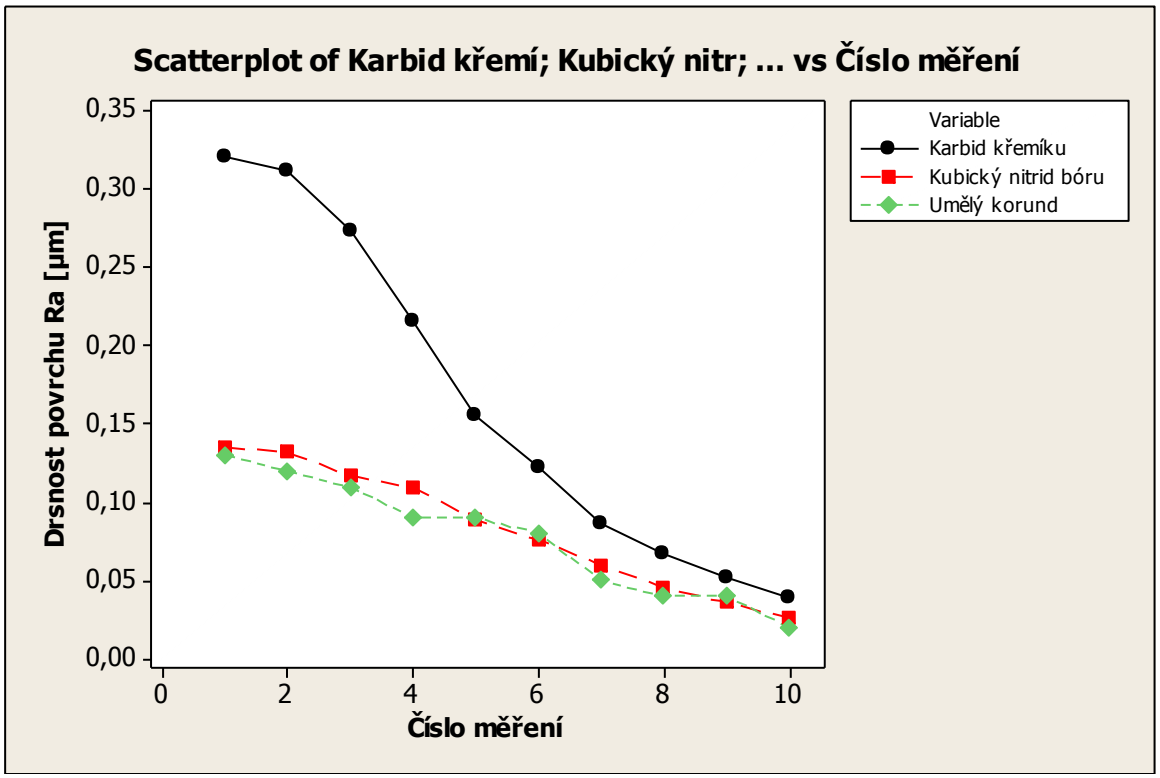
Číslo měření	Výsledek boxplotu	Číslo měření	Výsledek boxplotu
1	Variable: Měření 1 Q1 = 0,309 Median = 0,321 Q3 = 0,33375 IQRange = 0,02475 Whiskers to: 0,306, 0,345 N = 6	6	Variable: Měření 6 Q1 = 0,1075 Median = 0,124 Q3 = 0,135 IQRange = 0,0275 Whiskers to: 0,1, 0,15 N = 6
2	Variable: Měření 2 Q1 = 0,306 Median = 0,311 Q3 = 0,3205 IQRange = 0,0145 Whiskers to: 0,3, 0,322 N = 6	7	Variable: Měření 7 Q1 = 0,08125 Median = 0,087 Q3 = 0,09325 IQRange = 0,012 Whiskers to: 0,07, 0,097 N = 6
3	Variable: Měření 3 Q1 = 0,26125 Median = 0,274 Q3 = 0,28 IQRange = 0,01875 Whiskers to: 0,26, 0,28 N = 6	8	Variable: Měření 8 Q1 = 0,065 Median = 0,06675 Q3 = 0,06925 IQRange = 0,00425 Whiskers to: 0,065, 0,07 N = 6
4	Variable: Měření 4 Q1 = 0,20825 Median = 0,2155 Q3 = 0,2255 IQRange = 0,01725 Whiskers to: 0,2, 0,23 N = 6	9	Variable: Měření 9 Q1 = 0,04875 Median = 0,052 Q3 = 0,05525 IQRange = 0,0065 Whiskers to: 0,048, 0,056 N = 6
5	Variable: Měření 5 Q1 = 0,14875 Median = 0,156 Q3 = 0,162 IQRange = 0,01325 Whiskers to: 0,145, 0,165 N = 6	10	Variable: Měření 10 Q1 = 0,0365 Median = 0,039 Q3 = 0,042 IQRange = 0,0055 Whiskers to: 0,035, 0,042 N = 6

8 CELKOVÉ ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ, JEJÍ DISKUZE A DOPORUČENÍ PRO PRAXI

Superfinišování a následné měření drsnosti povrchu bylo provedeno ve firmě BEST Kunštát na Moravě.

Na přidělených výsledcích je zřejmé, že hlavní vliv na výslednou drsnost povrchu Ra má zpočátku výběr superfinišovacího kamene a superfinišovaný materiál. Na přiloženém Obrázku č. 69 je zřejmé, že nejhorší výsledky zaznamenáváme u superfinišovacího kamene z Karbidu křemíku a materiálu z temperované litiny, kdy při vyšších rychlostech kmitavého pohybu superfinišovacího kamene a vyšších rychlostech rotace obrobku získáváme hodnoty výrazně vyšší s porovnáním s jinými použitými superfinišovacími kameny a jiným materiálem. Kdežto se snižující se rychlostí kmitavého pohybu superfinišovacího kamene a snižující se rychlostí rotace obrobku se výrazně snižuje i drsnost povrchu u dokončovaného materiálu z temperované litiny, která nabývá hodnot jen nepatrně vyšších s porovnáním s jinými superfinišovacími kameny a superfinišovaným materiálem.

Nejuspokojivějších výsledků bylo získáno u superfinišovacího kamene z umělého korundu s keramickou vazbou a dokončovaného materiálu z ložiskové oceli, kdy hodnoty drsnosti povrchu Ra nabývají z počátku nejnižších hodnot s porovnáním se superfinišovacím kamenem z Kubického nitridu boru, ale v průběhu superfinišování můžeme na přiděleném obrázku č. 69 vidět, že některé hodnoty drsnosti povrchu Ra nabývají u superfinišovacího kamene z kubického nitridu boru nižších hodnot než u superfinišovacího kamene z umělého korundu s keramickou vazbou a to hlavně z důvodu použití nižší rychlosti kmitavého pohybu superfinišovacího kamene.



Obr. 69. Porovnání průběhu hodnoty Ra s měnícími se podmínkami superfinišování

S dosahovanou kvalitou a výslednou drsností povrchu superfinišovaných ploch můžeme pro toto odvětví nalézt mnoho technických aplikací a to hlavně například pro zhotovení styčných ploch valivých ložisek, lamel, upínacích ploch kuželových pro různou škálu obráběcích nástrojů, ale také i nejpřesnějších funkčních prvků jako např. přesné plochy vřeten, pinol a pístů. Tato aplikace je vhodná i pro doteky přesných měřidel a jiných funkčních prvků u, kterých je potřeba dodržet vysoké nároky na kvalitu povrchu a přesnost. Výsledky mohou být použity k návrhu výrobních postupů včetně optimalizace operace s cílem minimalizovat náklady, aby nedocházelo ke zbytečné náročnosti, která není nutná, protože čím přesnější plocha tím náklady na výrobu rostou. Operace superfinišování je vhodná pro hromadnou výrobu.

Požadovanou drsnost lze získat i jinými metodami dokončovacích operací, ale záleží také hlavně na funkčnosti a tvaru dokončované plochy, aby bylo možno plochu danou operací zhotovit.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo zhodnocení výsledků měření drsnosti povrchu po získání hodnot ze tří různých superfinišovacích kamenů. Jako první byl použit superfinišovací kámen z Kubického nitridu boru, dále byl použit superfinišovací kámen z umělého korundu s keramickou vazbou a jako poslední byl použit kámen z karbidu křemíku. Bylo provedeno celkem 6 měření při 10 různých řezných rychlostech. Jako superfinišovací materiál byla použita ložisková ocel ČSN 41 4109.4 a temperovaná litina ČSN 422430, jako chlazení byl použit petrolej + 15% minerální olej.

V prvním kroku byla zhotovena regresní analýza u operace superfinišování v závislosti drsnosti povrchu Ra u válcové plochy na rychlosti rotace povrchu a rychlosti kmitavého pohybu s předpokládanou závislostí: $R_a = C\,R_a \cdot V_k^{Xk} \cdot V_w^{Yw}$

Po, vypočtu konstant „C R_a“, „X_k“, „Y_w“ byly dosazeny naměřené hodnoty za předpokládané závislosti a došlo k porovnání s Ra naměřeným a s Ra vypočteným. Po dosazení bylo zjištěno, že se výsledky takřka shodují a tím byl také ověřen správný postup řešení.

Dále se diplomová práce zabývá výpočtem statistiky, kde byl zahrnut výpočet střední hodnoty Ra, výpočet směrodatné odchylky, s pravděpodobností 95% byl proveden výpočet pro každý soubor maximální a minimální hodnoty Ra max a Ra min, dále bylo potřeba určit pravděpodobnost, že drsnost povrchu bude u jednotlivých souborů v rozmezí zadaných hodnot.

V posledním kroku diplomové práce bylo potřeba výsledky měření zhodnotit do přehledných grafů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] KOCMAN, K. *Technologické procesy obrábění.* 1.vyd.. Brno, CERM s.r.o., 2011, 330s., ISBN 978- 80-7304-732-2

[2] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. 1. vydání. Ostrava: Ediční středisko VŠB – TUO, 2008. 252s. [online].. Dostupné z WWW: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/NDPO/texty.pdf>.

[3] Joseph, R.Davis.; a kol. *metals handbook ninth edition volume 16 machining*, 1.vyd. 1990, USA, 942 s., ISBN 0-87270-008-8

[4] KOCMAN, K.; Prokop J. *Speciální technologie obrábění řešené příklady.1.* vyd.. Brno,CERM s.r.o., 2004, 227 s., ISBN 80-2132-532-8

[5] HUMÁR, A.; *Technologie I, Technologie obrábění – 3. část, Interaktivní multimediální text pro bakalářský a magisterský studijní program*, vyd.. Brno, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2006,58 s.,

[6] KOCMAN, K. *Speciální technologie. Obrábění*. 3. přepracované a doplněné vyd.. Brno, CERM s.r.o., 2004, 226 s., ISBN 80-214-2652-8.

[7] ČSN EN ISO 4287:1999. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. ČSNI, Praha, 1999

[8] ČSN EN ISO 4288 *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) Struktura povrchu: Profilová metoda, Termíny, definice a parametry struktury povrchu.* ČSNI, Praha, 1999

[9] KOCMAN, K. *Analysis of development grinding Wheel on the basic of microcrystallino corundum.In manufacturing technology,journal for science and production,* December 2010,vol.x, φ 2-10.ISSN 1214-2581

[10] JANÁČ, A ; BÁTORA, B ; BARÁNEK, I ; LÍPA, Z. Technologie obrábění. 1.vyd..Bratislava.,2003,223 s., ISBN 80-237-2041-3.

[11] TICHÁ Š. *Strojírenská metrologie část 1*, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Ostrava., 2005, 113 s., ISBN 80-249-1309-6

[12] *Portal UTB* [online]. 2009. Dostupné z: http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10663/5125/mit%C4%A1%C5%A2_2009_dp.pdf. sequence=2

[13] *Meopta* [online]. c 2012 .Dostupné z: http://www.meopta.cz/cz/interferometricka-laborator-1405041214.html

[14] *ChemPoint* [online]. c 2013. Dostupné z: http://www.chempoint.cz/konfokalni-laserova-rastrovaci-mikroskopie-clsm

[15] KOCMAN, K. a kol.: *Aktuální příručka pro technologický úsek*. Verlag Dashofer, 16. Aktualizované vydání, Praha 2001, ISBN 80-902348-2-5

[16] AB SANDVIK COROMANT-SANDVIK CZ, s.r.o. *příručka obrábění*. Přel. Kúdela, 1. vydání Praha: Scientia, s.r.o., 1998. 858s. 858. ISBN 91-97-22 99-3-

[17] *4.B @ SPŠ Teplice* [online]. c 2007. Dostupné z: http://sps.watzke.cz/dl/KOM/ULOHA_3.1.4_MERENI_DRSNOSTI_POVRCHU.pdf

[18] BUMBALEK, Bohumil, Vladimír ODVODY a Bohuslav OŠŤÁDAL. *Drsnost povrchu*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1990, 339 s.

[19] *Technomat* [online]. c 2014. Dostupné z: http://www.technomat.cz/data/katedry/kom/KOM_MMM_PR_10_CZE_Karasek_Geometricke_vla

stnosti_povrchu.pdf

[20] *Vysoke učení technické v Brn*ě [online]. c 2011. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=1679

[21] *Portal UTB* [online]. 2013. Dostupné z: http://portal.utb.cz/wps/portal/

[22] *Mitutoyo* [online]. c 2013. Dostupné z: http://www.mitutoyo.cz/ebook/index-cz.html#/551/zoomed

[23] *Oddeleni povrchoveho inzenyrstvi* [online]. c 2006. Dostupné z: http://www.ateamd.zdu.cz/download/drsnost.pdf

[24] *Mitutoyo* [online]. c 2013. Dostupné z: http://www.mitutoyo.cz/ebook/index-cz.html#/559/zoomed

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

mm	Milimentr	[-]
MPa	Megapascal	[-]
γ_n	Normálný úhel čela (nástroje)	[rad]
r_n	Poloměr zaoblení ostří (nástroje)	[mm]
a_e	Radiální pracovní záběr	[mm]
h_p	Ovlivněná vrstva plastickou deformací	[mm]
h_e	Ovlivněná vrstva pružnou deformací	[mm]
v_c	Řezná rychlost	[$m.min^{-1}$]
v_f	Posuvová rychlost	[$mm.min^{-1}$]
Tab	Tabulka	[-]
P_p	Rovina zadní (nástrojová)	[-]
P_r	Rovina základní (nástrojová)	[-]
P_f	Rovina boční (nástrojová)	[-]
CNC	Číslicové řízení pomocí počítače	[-]
N_s	Frekvence otáčení brousícího nástroje (kotouče)	[$ot.s^{-1}$]
N_w	Frekvence otáček obrobku	[$ot.s^{-1}$]
f_a	Šířka broušené plochy	[mm]
v_c	Řezná rychlost	[$m.min^{-1}$]
v_w	Rychlost otáčení obrobku (Obvodová)	[$ot.s^{-1}$]
f_r	Posuv stolu na jednu otáčku obrobku (radiální)	[$ot.s^{-1}$]
l	Délka obráběné plochy	[mm]
n_{pk}	Rychlost podávacího kotouče (obvodová)	[$ot.s^{-1}$]
V_{fa}	Rychlost obrobku (obvodová)	[$ot.s^{-1}$]
V_{fa}	Rychlost posuvu obrobku (axiální)	[$mm.min^{-1}$]

v_{fr}	Rychlost posuvu stolu (radiální)	[$m.min^{-1}$]
b_s	Rozměr brousícího kotouče (šířka)	[mm]
$v_{vř}$	Rychlost otáčení kotouče kolem osy díry	[$ot.s^{-1}$]
v_{ft}	Radiální rychlost posuvu stolu (příčného)	[$m.min^{-1}$]
l_k	Délka honovacích kamenů	[mm]
v_e	Rychlost pohybu řezného	[$m.min^{-1}$]
l_z	Zdvih honovací hlavy	[mm]
Např	Například	[-]
IT	Přesnosti	[-]
μm	Mikrony	[-]
$m.s^{-1}$	Metry za sekundu	[-]
kHz	Kilohertz	[-]
ČSN	Česká technická norma	[-]
Ra	Průměrná aritmetická úchylka posuzované části profilu	[μm]
Pp, Rp, Wp	Největší výška výstupku	[μm]
Pv, Rv, Wv	Největší hloubka prohlubně	[μm]
Pz, Rz, Wz	Největší výška profilu	[μm]
Rsm	Šířka prvků profilu	[mm]
D_w	Průměr obrobku	[μm]
n_w	Frekvence otáčení obrobku	[$ot.s^{-1}$]
a	Amplituda základního pohybu kmitavého	[-]
ν	Frekvence základního pohybu kmitavého	[$ot.s^{-1}$]
A	Dvojnásobná amplituda pohybu kmitavého	[-]
N	Newton	[-]
°	Stupně	[-]

viz	Odkaz na odlišnou část	[-]
obr.	Obrázek	[-]
č	Číslo	[-]
a	Konstanta úměrnosti	[-]
C	Konstanta integrační	[-]
b_o, b_1, b_2, b_3	Koeficienty regresní	[-]
x_1, x_2, x_3	Faktory etalonu	[-]
t	Čas	[-]
s	Sekunda	[-]
Ø	Průměr	[mm]
s^2	Rozptyl	[-]
s	Směrodatná odchylka	[-]
P	Pravděpodobnost	[-]
atd	A tak dále	[-]
popř	Popřípadě	[-]
%	Procento	[-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Popis úběru brousícího elementu 15
Obr. 2. Přehled označování tvarů a rozměrů brousících kotoučů 16
Obr. 3. Znázornění stavby brousícího kotouče 17
Obr. 4. Kinematické charakteristiky broušení 20
Obr. 5. Vyobrazení a popis základních způsobů broušení čelního 21
Obr. 6. obvodové broušení s axiálním posuvem 22
Obr. 7. Nejčastější způsoby obvodového broušení 23
Obr. 8. Hloubkové broušení 24
Obr. 9. Princip radiálního broušení 24
Obr. 10. Princip bezhrotého průběžného broušení 25
Obr. 11. Princip zápichového broušení bezhrotého 26
Obr. 12. Broušení vnitřní s posuvem podélným a přísuvem radiálním 27
Obr. 13. Princip vnitřního broušení 29
Obr. 14. Vnitřního broušení (bezhrotého) 29
Obr. 15. Princip bezhrotého broušení v tuhých opěrkách 30
Obr. 16. Princip vnitřního planetového broušení 31
Obr. 17. Princip rovinného broušení obvodového – přímočarý pohyb stolu 32
Obr. 18. Princip rovinného broušení čelního 33
Obr. 19. Přípravek pro tvarování brousícího kotouče pomocí šablony 34
Obr. 20 Popis honovacího nástroje 35
Obr. 21. Schéma honovacího procesu 36
Obr. 22. Schéma řezného procesu při lapování 38
Obr. 23. Schéma superfinišování 39
Obr. 24. Válečkovací nástroj 41
Obr. 25. Schéma válečkování 41
Obr. 26. Schéma kuličkové hlavy pro statické kuličkování děr 42
Obr. 27. Normy týkající se struktury povrchu 45
Obr. 28. Skutečný profil povrchu 45
Obr. 29. Drsnost povrchu (jemná nerovnost) 45
Obr. 30. Vlnitost povrchu 46
Obr. 31. Obecný tvar povrchu 46
Obr. 32. Vlnitost povrchu 46

Obr. 33. Drsnost povrchu 46
Obr. 34. Posuzování drsnosti povrchu Ra 47
Obr. 35. Nejvyšší výška výstupku profilu 48
Obr. 36. Největší hloubka prohlubně profilu 48
Obr. 37. Největší výška profilu 49
Obr. 38. Šířka prvku profilu 50
Obr. 39. Přehledný princiup superfinišování 51
Obr. 40. Schéma vzorkovnice drsnosti 54
Obr. 41. Schéma dotykového profiloměru 55
Obr. 42. Princip profilové metody 56
Obr. 43. Schéma dotykového drsnoměru 56
Obr. 44. Bezdotykový profiloměr 58
Obr. 45. Profilometr Zygo NewView 7000 59
Obr. 46. Mikroskop Lext OLS 3000, Olympus 60
Obr. 47. Schéma a popis konfokálního principu 60
Obr. 48. Hustota normálního rozdělení pro různé hodnoty směrodatné odchylky 67
Obr. 49. Rozdělení výrobních chyb při seřizování stroje na jmenovitou 68
Obrá.50. Procento výrobních chyb při seřízení stroje pod středem tolerančního pole……. 69
Obr. 51. Procento výrobních chyb při seřízení stroje nad středem tolerančního pole 69
Obr. 52. Charakteristika součinitele α pro normální rozdělení (∆Ai=δ) 74
Obr. 53. Normální rozdělení četnosti 76
Obr. 54. Grafické porovnání Ra naměřené s Ra vypočteným 82
Obr. 55. Graf závislosti drsnosti povrchu na rychlosti kmitání superfinišovacího kamene 85
Obr. 56. Graf závislosti drsnosti povrchu na obvodové rychlosti otáčení obrobku 85
Obr. 57. Individual value plot 86
Obr. 58. Vývoj boxplotových diagramů 86
Obr. 59. Grafické porovnání Ra naměřené s Ra vypočteným 91
Obr. 60. Graf závislosti drsnosti povrchu na rychlosti kmitání superfinišovacího kamene 94
Obr. 61. Graf závislosti drsnosti povrchu na obvodové rychlosti otáčení obrobku 94
Obr. 62. Individual value plot 95
Obr. 63. Vývoj boxplotových diagramů 95
Obr.64. Grafické porovnání Ra naměřené s Ra vypočteným. 100
Obr. 65. Graf závislosti drsnosti povrchu na rychlosti kmitání superfinišovacího kamene 103

Obr. 66. Graf závislosti drsnosti povrchu na obvodové rychlosti otáčení obrobku 103
Obr. 67. Individual value plot.....104
Obr. 68. Vývoj boxplotových diagramů 104
Obr. 69. Porovnání průběhu hodnoty Ra s měnícími se podmínkami superfinišování.....107

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. *Dosahované parametry při broušení* 15
Tab. 2. Označení jakosti BK 17
Tab. 3. Druhy brousících materiálů 18
Tab. 4. Tvrdost BK 18
Tab. 5. Struktura BK 19
Tab. 6. Druhy pojiva a jeho značení [9] 19
Tab. 7. Řezné podmínky pro bezhroté broušení- způsob průběžný 27
Tab. 8. Řezné podmínky pro broušení bezhroté- způsob zapichovací 27
Tab. 9. Volba řezných parametrů (poměrů) při vnitřním broušení 28
Tab.10. Hodnoty p_b pro výpočet provozní nepřesnosti stroje s pravděpodobností 95%. 72
Tab. 11. Naměřené hodnoty pro měření č. 1 až č. 5 79
Tab. 12. Naměřené hodnoty pro měření č. 6 až č. 10 79
Tab. 13. Vypočtená střední hodnota z 6 měření s příslušnými hodnotami Vk a Vw 79
Tab. 14. Vypočtené hodnoty a jednotlivé součty potřebné k výpočtu determinantů 80
Tab.15. Vypočtené hodnoty a jednotlivé součty potřebné k výpočtu determinantů 80
Tab. 16. Přehled pro porovnání Ra naměřeného s Ra vypočteným 82
Tab. 17. Souhrn statistických výpočtů pro hodnoty souborů 1 až 5 84
Tab. 18. *Souhrn statistických výpočtů pro hodnoty souborů 6 až 10* 84
Tab. 19. Hodnoty boxplotových diagramů 87
Tab. 20. Naměřené hodnoty pro měření č. 1 až č. 5 88
Tab. 21. Naměřené hodnoty pro měření č. 6 až č. 10 88
Tab. 22. Vypočtená střední hodnota z 6 měření s příslušnými hodnotami Vk a Vw 88
Tab. 23. Vypočtené hodnoty a jednotlivé součty potřebné k výpočtu determinantů 89
Tab. 24. Vypočtené hodnoty a jednotlivé součty potřebné k výpočtu determinantů 89
Tab. 25. Přehled pro porovnání Ra naměřeného s Ra vypočteným 91
Tab. 26. Souhrn statistických výpočtů pro hodnoty souborů 1 až 5 93
Tabulka 27 Souhrn statistických výpočtů pro hodnoty souborů 6 až 10 93
Tab. 28. Hodnoty boxplotových diagramů 96
Tab. 29. Naměřené hodnoty pro měření č. 1 až č. 5 97
Tab. 30. Naměřené hodnoty pro měření č. 6 až č. 10 97
Tab. 31. Vypočtená střední hodnota z 6 měření s příslušnými hodnotami Vk a Vw 97
Tab. 32. Vypočtené hodnoty a jednotlivé součty potřebné k výpočtu determinantů 97

Tab. 33. Vypočtené hodnoty a jednotlivé součty potřebné k výpočtu determinantů 98
Tab. 34. Přehled pro porovnání Ra naměřeného s Ra vypočteným 100
Tab. 35. Souhrn statistických výpočtů pro hodnoty souborů 1 až 5 102
Tab. 36. Souhrn statistických výpočtů pro hodnoty souborů 6 až 10 102
Tab. 37. Hodnoty boxplotových diagramů 104

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA P I: NÁZEV PŘÍLOHY